

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**“METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA HUELLA  
HÍDRICA DEL CULTIVO DE PAPA EMPLEANDO RIEGO POR  
GOTEO, EN LA UNALM”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE  
INGENIERO AGRÍCOLA**

**RAÚL DIEGO LÓPEZ BENITES**

**LIMA – PERÚ**

**2019**

---

La UNALM es titular de los derechos patrimoniales de la presente tesis

(Art. 24. Reglamento de Propiedad Intelectual)

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**

**“METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA  
DEL CULTIVO DE PAPA EMPLEANDO RIEGO POR GOTEO, EN LA  
UNALM”**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE:

**INGENIERO AGRÍCOLA**

Presentado por:

**BACH. RAÚL DIEGO LÓPEZ BENITES**

Sustentado y aprobado por el siguiente jurado:

Mg. Sc. GONZALO RAMCÉS FANO MIRANDA  
Presidente

Mg. Sc. MIGUEL ANGEL SANCHEZ DELGADO  
Asesor

Mg.Sc. GILBERTO RODRÍGUEZ SOTO  
Miembro

Mg. Sc. ANTONIO CELESTINO ENCISO GUTIÉRREZ  
Miembro

Dr. JESÚS ABEL MEJÍA MARCACUZCO  
Co-Asesor

LIMA – PERÚ

2019

## ***DEDICATORIA***

A mi madre y a mi padre, gracias a su apoyo incondicional, acompañamiento y consejos que supieron darme en todo momento.

## ***AGRADECIMIENTO***

A la Universidad Nacional Agraria La Molina y a la Facultad de Ingeniería Agrícola por la formación brindada a través de sus grandes maestros.

A mis padres Jaime López y Fausta Benites, quienes me apoyaron incondicionalmente en cada meta que me fui proponiendo.

Agradezco en particular a Katherine Galván, una compañera que la vida me permitió conocer y que desde entonces ha sido mi complemento y cómplice.

A mis colegas Piero Natividad, Carlos Zamata, Franklin Oviedo y al asesor Ing. Miguel Sánchez, por batallar en un proyecto con presupuesto reducido, pero con la intención de aportar conocimiento y experiencia a la sociedad.

# ÍNDICE GENERAL

<b>I.</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivos de la investigación	2
<b>II.</b>	<b>REVISIÓN LITERARIA.....</b>	<b>3</b>
2.1	Definición y componentes de la huella hídrica	3
2.1.1	Huella hídrica azul .....	5
2.1.2	Huella hídrica verde.....	6
2.1.3	Huella hídrica gris.....	6
2.2	Riego deficitario	8
2.2.1	Riego deficitario controlado (RDC).....	8
2.2.2	Riego deficitario de secado parcial de la zona de raíces (PRD) .....	9
2.3	Modelo agrometeorológico AquaCrop	10
2.3.1	Esquema de cálculo del modelo AquaCrop .....	11
2.3.2	Descripción del modelo agrometeorológico AquaCrop .....	18
2.3.3	Resultados del modelo AquaCrop .....	23
<b>III.</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>25</b>
3.1	Ubicación y características del campo experimental	25
3.1.1	Ubicación del campo experimental.....	25
3.1.2	Descripción del área experimental.....	26
3.2	Materiales y equipos utilizados en el experimento	28
3.2.1	Material genético .....	28
3.2.2	Fertilizantes.....	29
3.2.3	Equipos para el monitoreo de la evapotranspiración de referencia .....	31
3.2.4	Equipos para el monitoreo de la humedad en el suelo.....	32
3.3	Metodología para la determinación de la huella hídrica con el modelo AquaCrop	33
3.3.1	Análisis estadístico.....	36
3.3.2	Caracterización del clima, suelo, riego y cultivo .....	37

3.3.3	Calibración y validación del modelo AquaCrop.....	46
3.3.4	Cuantificación de la huella hídrica azul, verde y gris .....	51
<b>IV.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIONES .....</b>	<b>55</b>
4.1	Caracterización del clima, cultivo, riego y suelo	55
4.1.1	Clima.....	55
4.1.2	Suelo .....	56
4.1.3	Riego.....	56
4.1.4	Cultivo.....	57
4.2	Modelamiento del cultivo de papa variedad UNICA con el modelo AquaCrop	59
4.2.1	Calibración y validación de la Cobertura de dosel del cultivo de papa .....	60
4.2.2	Calibración y validación de la materia seca total.....	63
4.2.3	Calibración y validación de la biomasa seca de tubérculo (rendimiento) .....	65
4.3	Determinación de la huella hídrica azul, verde y gris	66
4.3.1	Huella hídrica azul y verde .....	66
4.3.2	Huella hídrica gris.....	66
<b>V.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>69</b>
<b>VI.</b>	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>70</b>
<b>VII.</b>	<b>REFERENCIA BIBLIOGRAFICA .....</b>	<b>71</b>
<b>VIII.</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>76</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Componentes de la huella hídrica directa.....	4
Tabla 2: Resultados obtenidos con el modelo AquaCrop.....	24
Tabla 3: Características de la parcela experimental .....	26
Tabla 4: Fertilización empleada (kg/ha) .....	30
Tabla 5 : Índices del análisis de varianza .....	37
Tabla 6 : Datos meteorológicos mensuales en el periodo de investigación .....	38
Tabla 7: Análisis de suelo.....	39
Tabla 8: Análisis químico de agua .....	41
Tabla 9: Parámetros a calibrar en el modelo AquaCrop, para el cultivo de papa .....	46
Tabla 10: Eficiencia de la modelación según el índice de Nash-Sutcliffe (E) .....	50
Tabla 11: Cobertura de dosel promedio según la lámina de riego aplicada .....	58
Tabla 12: Datos de materia seca total (MST), materia seca de tubérculos (MSt) e índice de cosecha (HI) .....	58
Tabla 13: Parámetros calibrados del modelo AquaCrop para el cultivo de papa variedad UNICA en la estación de invierno. ....	59
Tabla 14: Indicadores estadísticos de la evolución de la cobertura de dosel en el cultivo de papa con AquaCrop, aplicando una lámina normal.....	61
Tabla 15: Indicadores estadísticos de la evolución de la cobertura de dosel en el cultivo de papa con AquaCrop, aplicando una lámina reducida .....	63
Tabla 16: Análisis estadístico de la evolución del grado de cobertura (%) observando en el cultivo de papa .....	63
Tabla 17: Indicadores estadísticos de la evolución de la materia seca total (MST) .....	64
Tabla 18: Análisis estadístico materia seca total (t/ha) observado en el cultivo de papa....	64
Tabla 19: Rendimiento (t/ha) obtenido en la cosecha .....	65
Tabla 20: Huella hídrica verde y azul del cultivo de papa (m <sup>3</sup> /ha), para el tratamiento testigo (T) y deficitario (RP). ....	66
Tabla 21: Tasa de aplicación de los productos químicos en el cultivo.....	67
Tabla 22: Huella hídrica gris del cultivo de papa (m <sup>3</sup> /ha), para el tratamiento testigo (T) y deficitario (RP). ....	68

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Huella Hídrica de una cuenca .....	5
Figura 2: Esquema de dos formas de aplicación de agua .....	9
Figura 3: Esquema simplificado del modelo AquaCrop, en el que se resalta la separación de la evaporación del suelo (E) y la transpiración del cultivo (Tr); además de la separación del rendimiento (Y) en la biomasa (B) y el índice de la cosecha (HI). ....	10
Figura 4: Esquema general del cálculo del modelo AquaCrop .....	11
Figura 5: Zona radicular descrita como un depósito. Se indican la profundidad de agua equivalente ( $W_r$ ) y el agotamiento en la zona radicular ( $D_r$ ). .....	12
Figura 6: Representación esquemática del desarrollo del dosel durante las etapas de crecimiento exponencial (Ec. 1) y decadencia exponencial (Ec. 2) .....	13
Figura 7: Disminución de la cubierta verde del dosel durante la senescencia para varios todos coeficientes de disminución (CDC) .....	14
Figura 8: Esquema de cálculo para la producción de la biomasa aérea producida .....	16
Figura 9: Incremento del índice de cosecha desde la floración hasta la maduración fisiológica de los cultivos que producen frutos y granos .....	17
Figura 10: Interfaz del modelo Agrometeorológico AquaCrop .....	18
Figura 11: Evapotranspiración de referencia ( $E_{To}$ ) durante la investigación .....	19
Figura 12: Variación del coeficiente de evaporación del suelo ( $K_e$ ) y del coeficiente de transpiración del cultivo ( $K_{ctr}$ ) .....	20
Figura 13: Desarrollo de la cobertura vegetal y profundidad efectiva de raíces .....	21
Figura 14: Modulo de suelo .....	22
Figura 15: Laminas aplicadas en el cultivo .....	22
Figura 16: Resultados del modelo AquaCrop .....	23
Figura 17: Ubicación del campo experimental, UNALM .....	25
Figura 18 : Distribución de campo experimental y descripción de la parcela experimental .....	27
Figura 19: Tallo, hoja, tubérculo y flor de la variedad UNICA .....	28
Figura 20: Desarrollo del cultivo de papa (variedad UNICA) .....	29
Figura 21: Características del tanque evaporímetro clase A .....	31

Figura 22: a) Barreno espiral, b) Horno a 105° C de temperatura.....	32
Figura 23: Sensor de humedad GS1 Decagon .....	33
Figura 24: Esquema para el cálculo de la huella hídrica .....	33
Figura 25: Diagrama de flujo de la metodología empleada en el estudio .....	35
Figura 26: Distribución de los tratamientos realizados en la investigación .....	36
Figura 27: Parcela experimental y plantas monitoreadas .....	42
Figura 28: Procedimiento para tomar la fotografía .....	43
Figura 29: a) Escalado y delimitación del perímetro de la planta en AutoCAD, b) Área de la cobertura de dosel .....	44
Figura 30: Cobertura del dosel simulado y observado .....	44
Figura 31: Procedimiento para la obtención de la materia seca .....	45
Figura 32: Síntesis conceptual de la modelación.....	52
Figura 33: Variabilidad diaria de las variables climáticas durante el periodo de investigación.....	55
Figura 34: Características del suelo requeridas por el AquaCrop .....	56
Figura 35: Eventos de riego durante el periodo vegetativo del cultivo .....	57
Figura 36: Etapas del cultivo a lo largo del periodo.....	57
Figura 37: Evolución del grado de cobertura de dosel del cultivo de papa, aplicándole una lámina de riego igual al 100 por ciento de la ETo.....	60
Figura 38: Grado de cobertura promedio simulado vs simulado del tratamiento testigo ....	61
Figura 39: Evolución del grado de cobertura de dosel del cultivo de papa, aplicándole una lámina de riego deficitaria. ....	62
Figura 40: Grado de cobertura promedio simulado vs simulado del tratamiento testigo ....	62
Figura 41: Evolución de la materia seca total (MST) promedio del cultivo de papa. ....	64

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Resultados del Análisis de agua de riego aplicada durante el experimento, obtenido del Laboratorio de Agua, Suelo, Medio Ambiente y Fertirriego.....	76
Anexo 2: Resultados del Análisis de suelo, obtenido del Laboratorio de Agua, Suelo, Medio Ambiente y Fertirriego .....	77
Anexo 3: Registro de datos meteorológicos promedio mensual en el periodo de la investigación (junio – septiembre del 2017).....	78
Anexo 4: Fotografías de la preparación del terreno – pre-siembra .....	79
Anexo 5: Fotografías de la prueba de bulbo húmedo .....	80
Anexo 6: Labores culturales realizadas .....	81
Anexo 7: Láminas de riego aplicadas durante el experimento .....	82
Anexo 8 : Resultados de la simulación en la calibración, representación gráfica de la transpiración, cobertura de dosel y de la humedad de suelo. ....	83
Anexo 9: Análisis de sensibilidad de la evolución de la cobertura de dosel en la calibración del modelo: línea continua (simulado) y puntos (medidos).....	84
Anexo 10: Análisis de sensibilidad de la evolución de la materia seca total en la calibración del modelo: línea continua (simulado) y puntos (medidos).....	85
Anexo 11: Resultados de la simulación en la validación, representación gráfica de la transpiración, cobertura de dosel y de la humedad de suelo. ....	86
Anexo 12: Análisis de sensibilidad de la evolución de la cobertura de dosel en la calibración del modelo: línea continua (simulado) y puntos (medidos).....	87
Anexo 13: Análisis de sensibilidad de la evolución de la materia seca total en la calibración del modelo: línea continua (simulado) y puntos (medidos).....	88
Anexo 14: Resultado del análisis foliar donde se determinó el porcentaje de materia seca del tubérculo .....	89

## **RESUMEN**

El presente proyecto fue realizado en la parcela experimental de la Facultad de Ingeniería Agrícola de la UNALM, durante los meses de junio y septiembre del 2017. El objetivo principal fue determinar la huella hídrica del cultivo de papa, variedad UNICA, aplicando dos tratamiento de riego, el tratamiento testigo (T) y el tratamiento deficitario (RP). El diseño experimental empleado en la investigación fue completamente al azar, para dos tratamientos con diez repeticiones cada uno, evaluando los efectos producidos por el tipo de riego en donde la variable independiente fue la lámina de agua aplicada y las variables dependientes fueron la producción de biomasa, el rendimiento y cobertura de dosel. Para la determinación de la huella hídrica del cultivo de papa variedad UNICA, se modelo el cultivo de papa en el modelo AquaCrop, y fue calibrado con los parámetros de cobertura de dosel (CC), biomasa total (MST) y rendimiento (Y), obtenidos en el tratamiento testigo (T) y posteriormente validando el modelo con los datos obtenidos en el tratamiento deficitario (RP). El análisis estadístico mostro que los resultados de la cobertura de dosel y biomasa total no presentan diferencia estadística significativa entre ambos tratamientos, mientras que los rendimientos obtenidos para los tratamientos testigos y deficitarios fueron de 65 t.ha-1 y 60 t.ha-1 respectivamente, presentando diferencia estadística significativa. La huella hídrica total para el tratamiento testigo resulto un valor de 149 m<sup>3</sup>/tn, y para el caso del tratamiento deficitario la huella hídrica total resulto un valor de 149.33 m<sup>3</sup>/tn. Concluyéndose que no existe diferencia significativa en la huella hídrica en ambos tratamientos.

Palabras claves: Riego deficitario, AquaCrop, Cobertura de dosel, Huella hídrica.

## **ABSTRACT**

The present project was carried out in the experimental plot of the Faculty of Agricultural Engineering of the UNALM, during the months of June and September of 2017. The main objective of determining the water footprint of the potato crop, UNICA variety, applying two irrigation treatments, the control treatment (T) and the deficit treatment (RP). The experimental design used in the investigation was completely random, for two treatments with ten repetitions each, evaluating the effects produced by the type of irrigation where the independent variable was the sheet of water applied and the dependent variables were the production of biomass, the yield and canopy coverage. For the determination of the water footprint of the UNICA variety potato crop, the potato crop was modeled in the AquaCrop model, where the model was calibrated with canopy coverage (CC), total biomass (MST) and yield parameters (Y), obtained in the control treatment (T) and later validating the model with the data obtained in the deficit treatment (RP). The statistical analysis showed that the results of canopy and total biomass coverage do not show significant statistical difference between both treatments, while the yields obtained for the control and deficit treatments were 65 t.ha<sup>-1</sup> and 60 t.ha<sup>-1</sup> respectively, presenting significant statistical difference. The total water footprint for the control treatment resulted in a value of 149 m<sup>3</sup> / ton, and in the case of the deficit treatment the total water footprint resulted in a value of 149.33 m<sup>3</sup> / ton. Concluding that there is no significant difference in the water footprint in both treatments.

**Keywords:** Deficit irrigation, AquaCrop, Canopy coverage, Water footprint.

## I. INTRODUCCIÓN

La situación del agua en el mundo es alarmante, dado que nos enfrentamos a lo que se denomina la crisis del agua, ya que, según las naciones unidas para el 2050 esta crisis afectara a las tres cuartas partes de la población mundial. El Perú no es ajeno a esta situación, aunque paradójicamente nuestro país se ubica entre los veinte países con mayores recursos de agua en el mundo con 75,510.00 metros cúbicos/habitante/año. Siendo el principal problema, la notable descompensación demográfica, que se grafica en tener al 66 por ciento de la población nacional en la costa donde solo dispone del 2 por ciento del recurso hídrico del país.

Aproximadamente el 76 por ciento de la huella hídrica nacional de la producción total se asocia con el sector agropecuario, siendo este el único sector usuario del agua verde y el mayor usuario del agua azul, ya que, el 70 por ciento de las extracciones del recurso hídrico es destinada para la irrigación del 6 por ciento del área total del Perú, que son 7.6 millones de hectáreas aproximadamente (Pregram *et al.*, 2003).

En este contexto es necesario incrementar la eficiencia y mejorar la racionalización del recurso hídrico para el riego, mejorando así la productividad hídrica, la cual se mide mediante la cantidad de producción que se obtiene por unidad de agua, una estrategia potencial para el ahorro de agua en el riego es el secado parcial de raíces (PRD).

Se evaluó en condiciones de campo el efecto del PRD en el cultivo de papa de variedad UNICA, experimento que consistió en evaluar el rendimiento y cuantificación del volumen de agua aplicado en el cultivo de papa bajo condiciones de riego normal (T1) con una lámina de riego al 100 por ciento de las necesidades hídricas del cultivo y otro bajo el sistema PRD (T2) con una lámina de 70 por ciento de la necesidad hídrica del cultivo, utilizando el sistema de riego por goteo. Los resultados respecto a los rendimientos obtenidos a la cosecha para el T1 y T2 mostraron que existe diferencias altamente significativas entre ambos tratamientos, mostrando también que el PRD incremento la eficiencia de uso de agua (Sánchez, 2014).

La presente investigación buscará determinar la huella hídrica verde, azul y gris de la producción del cultivo de papa variedad UNICA aplicando dos tratamientos de riego, tratamiento testigo en donde se aplicará una lámina de riego igual al 100 por ciento de las necesidades hídricas del cultivo en todas las etapas vegetativas y el tratamiento deficitario (RP) aplicando el riego parcial en zona de raíces (PRD), en las etapas de tuberización y desarrollo en donde se repone el 50 por ciento de las necesidades hídricas del cultivo y el 100 por ciento de las necesidades hídricas del cultivo en las etapas de emergencia y maduración.

## **1.1 Objetivos de la investigación**

### **Objetivo principal**

Determinar la huella hídrica verde, azul y gris del cultivo de papa variedad UNICA haciendo uso del modelo AquaCrop, empleando dos tratamientos de riego.

### **Objetivos específicos**

- Caracterización del clima, suelo, riego y cultivo de papa variedad UNICA en la zona de estudio
- Parametrización (Calibración y validación) del modelo AquaCrop, para el cultivo de papa variedad UNICA.
- Determinar la huella hídrica azul y verde del cultivo de papa con el modelo AquaCrop y la huella hídrica gris a partir de la tasa de fertilización aplicada.

## II. REVISIÓN LITERARIA

### 2.1 Definición y componentes de la huella hídrica

La huella hídrica surge a partir del concepto de agua virtual que se define como el volumen de agua requerido para producir un bien o servicio. Este concepto fue introducido por el investigador John Allan, cuando investigaba la opción de importar agua virtual, como una solución parcial al problema de escasez de agua en los países del Medio Oriente.

Muchas naciones ahorran recurso hídrico por la importación de productos de alto consumo de agua y exportación de materias primas que son menos intensivos en el uso de agua. El ahorro nacional del agua a través de la importación de un producto puede suponer el ahorro de agua a nivel global, si el flujo es de los lugares de alta productividad hacia los sitios con baja productividad del agua, actualmente, la huella hídrica ha llegado a ser una herramienta complementaria a las convencionales para la gestión integral del recurso hídrico. (Chapagain *et al.*, 2006).

La huella hídrica es un indicador del uso de agua dulce que abarca no solo el uso directo de un consumidor o productor, sino, el uso indirecto del agua. La huella hídrica de un bien o servicio es la cantidad total de agua que se requiere para producirlo, ya sea externa (al importar los productos) o internas (cuando estos se producen en el territorio nacional) (Castillo, 2016).

El valor final de la huella hídrica se calcula de diversas maneras dependiendo de la metodología que se emplee, puede ser la suma de los tres tipos de agua (azul, verde o gris), o la suma de la huella hídrica directa más la huella hídrica indirecta, dependiendo del sector de actividad o del individuo o comunidad a la que se calcule la huella hídrica por unidad de masa ( $m^3/kg$ ) o de tiempo ( $m^3/año$ ) (Centro Nacional de Información de la Calidad, 2012) .

**Tabla 1: Componentes de la huella hídrica directa**

<b>Huella hídrica azul</b>	Se refiere al volumen de agua superficial y subterráneo evaporado, incorporado al producto o devuelto a otra cuenca o al mar, como resultado de la producción de un bien o servicio.
<b>Huella hídrica verde</b>	Hace referencia al volumen de agua de lluvia evaporado o incorporado al producto durante el proceso de producción. Esto es particularmente relevante para los productos agrícolas y forestales.
<b>Huella hídrica gris</b>	Se define como el volumen de agua dulce que se requiere para asimilar la carga de contaminantes hasta el punto de que la calidad del agua cumpla con los estándares de calidad según la normatividad ambiental legal vigente.

FUENTE: Shen & Qian, (2012)

De forma muy simplificada, la huella hídrica es un indicador del consumo y contaminación de agua dulce, que contempla las dimensiones directa e indirecta, siendo aplicable para una persona, producto, proceso, región o país.

$$HH_{TOTAL} = HH_{AZUL} + HH_{VERDE} + HH_{GRIS} \quad \left( \frac{\text{Volumen}}{\text{Masa}} \right)$$

Donde:

$HH_{AZUL}$  : Huella hídrica azul ( $m^3/t$ )

$HH_{VERDE}$  : Huella hídrica verde ( $m^3/t$ )

$HH_{GRIS}$  : Huella hídrica gris ( $m^3/t$ )

$HH_{TOTAL}$  : Huella hídrica total ( $m^3/t$ )

Cada uno de los componentes de la huella hídrica total (azul, verde y gris) se expresa en volumen de agua por unidad de masa. Por lo general, la huella hídrica en la agricultura se expresa como  $m^3/ton$ , lo que equivale a un litro por kilogramo.

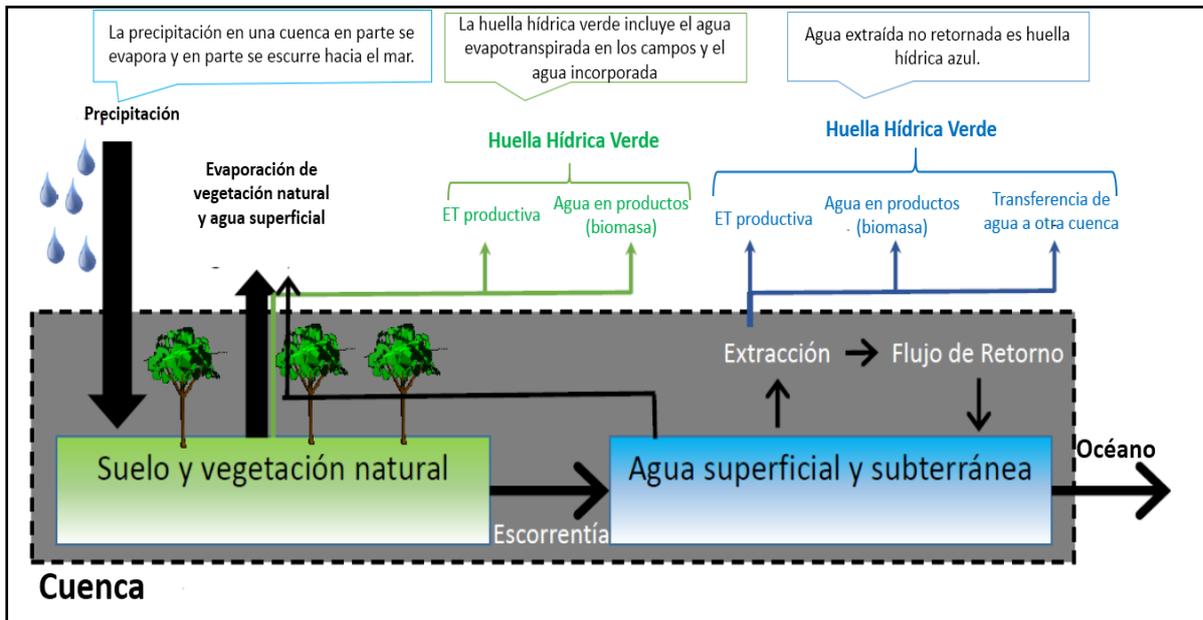


Figura 1: Huella hídrica de una cuenca

FUENTE: Hoekstra, (2011)

### 2.1.1 Huella hídrica azul

Es un indicador del uso consuntivo de agua azul, es decir, agua dulce captada de una fuente superficial o subterránea la cual se ha incorporado en el producto o evaporado o se transvasa a otra cuenca, como resultado de la producción de un bien o servicio (Hoekstra, 2011).

$$HH_{AZUL} = \frac{UAC_{AZUL}}{Y} \left( \frac{m^3}{t} \right)$$

Donde Y = rendimiento del cultivo en (ton/ha); UAC = uso de agua azul del cultivo expresada en (m<sup>3</sup>/ha).

$$UAC_{AZUL} = 10 * \sum_{d=1}^{l_{gp}} ETC_{AZUL}$$

Donde Σ = ciclo de crecimiento del cultivo, es decir, desde la siembra (día 1) hasta la cosecha; l<sub>gp</sub> = longitud, días de cada etapa del ciclo; ETC = evapotranspiración del cultivo (mm/día).

### 2.1.2 Huella hídrica verde

Es el volumen de agua proveniente de la precipitación que no se pierde por escorrentía superficial o se sume a las aguas subterráneas, pero que se mantiene en la superficie y es aprovechada por la vegetación. Esta agua se almacena en los estratos superficiales del terreno, satisfaciendo la demanda natural de la vegetación y de los cultivos e incorporándose en ellos (aunque no toda el agua verde puede ser absorbida por el cultivo, ya que, siempre existirá la evaporación del agua contenida en el suelo) (Hoekstra et al. 2011).

Cabe mencionar que los principales sectores que generan la huella hídrica verde es el agrícola y forestal, siendo necesario para el cálculo considerar las siguientes variables de interés:

$$HH_{VERDE} = \frac{UAC_{VERDE}}{Y} \left( \frac{m^3}{t} \right)$$

Donde Y (t/ha) = rendimiento del cultivo; UAC es el uso de agua verde del cultivo expresada en (m<sup>3</sup>/ha).

$$UAC_{VERDE} = 10 * \sum_{d=1}^{lgp} ETC_{VERDE}$$

Donde  $\Sigma$  = ciclo de crecimiento del cultivo, es decir, desde la siembra (día 1) hasta la cosecha; lgp = longitud, días de cada etapa del ciclo; ETC = evapotranspiración del cultivo (mm/día).

### 2.1.3 Huella hídrica gris

La huella hídrica gris es el volumen de agua necesario para diluir los contaminantes que llegan a los cuerpos de agua receptores, para cumplir los niveles de calidad establecidos, estimándose sólo para los principales contaminantes en el proceso productivo de cada cultivo. Estos contaminantes consisten en fertilizantes como: nitrógeno, fosforo y potasio (NPK), pesticidas e insecticidas. Por lo tanto, la huella hídrica gris es un indicador del grado de contaminación del agua que puede estar asociado a un proceso (Bolaños, 2011).

La huella hídrica gris de un producto o proceso debe ser calculada para cada uno de los contaminantes y considerar al que presenta mayor impacto por ser el más crítico. Se calcula dividiendo la carga contaminante que entra en un cuerpo de agua (L) sobre la diferencia entre el nivel máximo permisible de un contaminante (C<sub>max</sub>) y la concentración natural del mismo (C<sub>nat</sub>), multiplicado por la inversa del rendimiento (Y<sup>-1</sup>).

$$HH_{GRIS} = \frac{L}{Y * (C_{max} - C_{nat})} \left( \frac{m^3}{t} \right)$$

- HH<sub>GRIS</sub> : Huella hídrica gris (m<sup>3</sup>/toneladas)  
L : Carga de contaminantes (masa/área)  
Y : Rendimiento (toneladas/hectárea)  
C<sub>MAX</sub> : Concentración máxima permitida del contaminante (kg/m<sup>3</sup>)  
C<sub>NAT</sub> : Concentración natural permitida del contaminante (kg/m<sup>3</sup>), refiriéndose a la concentración del contaminante en el cuerpo de agua que podría ocurrir sin intervención humana.

En los sistemas agrícolas, la principal fuente de contaminación de agua es difusa, vía aplicación de fertilizantes y pesticidas, donde puede ocurrir que solo una pequeña parte se filtre hacia el agua subterránea o fluya por la superficie a una corriente de agua superficial. De esta forma, se hace dispendioso cuantificar y cualificar el agua que sale del sistema. Para el cálculo de la Huella Hídrica gris se debe determinar la carga (L), la cual se determina por un factor alfa (α) que determina la fracción de lixiviación del compuesto y la cantidad de producto químico aplicado al suelo (Appl) (Franke *et al.*, 2013).

$$HH_{GRIS} = \frac{L}{Y * (C_{max} - C_{nat})} = \frac{a * appl}{Y * (C_{max} - C_{nat})} \left( \frac{volumen}{tiempo} \right)$$

Dónde: a = Factor de lixiviación; appl = aplicación del producto.

## **2.2 Riego deficitario**

El riego deficitario, es la disminución de la cantidad de agua para el riego de los cultivos influyendo lo menos posible en el rendimiento de la planta. Las experiencias realizadas en campos de regadío han permitido determinar la carencia de agua que puede tolerar una planta sin que afecte a la calidad del producto.

Cuando la humedad del suelo desciende a la mitad del nivel disponible, el crecimiento y rendimiento de los cultivos disminuye mucho antes de que se alcance el punto de marchitamiento permanente. Cuando la carencia de agua es muy aguda, el proceso fisiológico de la planta se altera, reduciendo su crecimiento y rendimiento.

Entonces aprovechando la tecnología existente en el riego, principalmente en riego localizado, se está trabajando en busca de la posibilidad de ajustar los aportes de agua de riego a sus estrictas necesidades, ahorrando así el exceso y evitando un consumo consuntivo. Ante ello surge la necesidad de utilizar técnicas de riego como es el riego deficitario, siendo capaces de reducir el agua aplicada con el mínimo impacto posible sobre la producción, toman una especial relevancia en su estudio (Sánchez & Torrecillas, 1995).

### **2.2.1 Riego deficitario controlado (RDC)**

El riego deficitario controlado es una estrategia de aplicación de agua, basada en la idea de reducir los aportes hídricos en aquellos periodos fenológicos en los que un déficit hídrico controlado no afecta sensiblemente a la producción y calidad de la cosecha, cubriendo plenamente la demanda de la planta durante el resto del ciclo de cultivo (Sánchez & Torrecillas, 1995).

Para la aplicación de RDC se tiene que tener en cuenta los factores que pueden condicionar su viabilidad: los periodos críticos del cultivo, nivel de coincidencia entre el crecimiento vegetativo y el del fruto, las características del suelo, el sistema de riego, el clima, el material vegetal y la resistencia a la sequía (Molina, 2015).

Como se mencionó el RDC trata de adecuar los aportes hídricos al comportamiento fisiológico del cultivo, y se basa en reducir las dosis de agua y aplicar en momentos o períodos fenológicos en los que el déficit hídrico no afecta (o afecta menos) a la producción final, aplicando el 100 por ciento de las necesidades hídricas en los períodos críticos (Atoccsa, 2015).

### 2.2.2 Riego deficitario de secado parcial de la zona de raíces (PRD)

“En Australia la Food And Agriculture Organization (2002) con la finalidad de no reducir el rendimiento de la producción de los cultivos, al aplicar el déficit hídrico con el fin del ahorro de agua de riego, otra técnica de riego deficitario planteada es el denominado riego deficitario de secado parcial de la zona de raíces, más conocido como PRD por sus siglas en inglés Partial Rootzone Drying. Se trata de una técnica de riego localizado, desarrollada en Australia que ha permitido importantes ahorros de agua sin pérdidas en el rendimiento y calidad de la cosecha” (McCarthy *et al.*, 1997).

El riego parcial en zona de raíces (PRD), es una técnica de riego deficitario que consiste en someter una parte del sistema radicular a déficit hídrico mientras que la otra parte se mantiene húmeda, con lo que se asegura el aporte hídrico suficiente para mantener el vigor de la parte aérea de la planta. La finalidad del PRD, es inducir la producción de ácido absísico (ABA) en las raíces parcialmente secas y al ser transportada vía xilema a las hojas regulan la apertura estomatal y de esta manera disminuya la pérdida de agua. Al mismo tiempo, las raíces bien irrigadas mantienen el follaje con buen estado hídrico (Rojas, 2007).

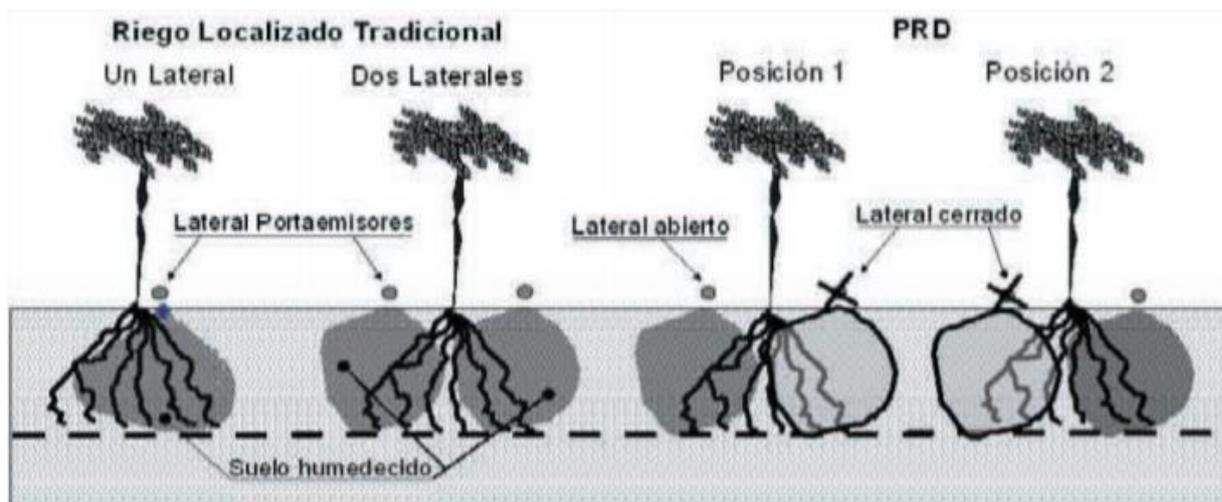


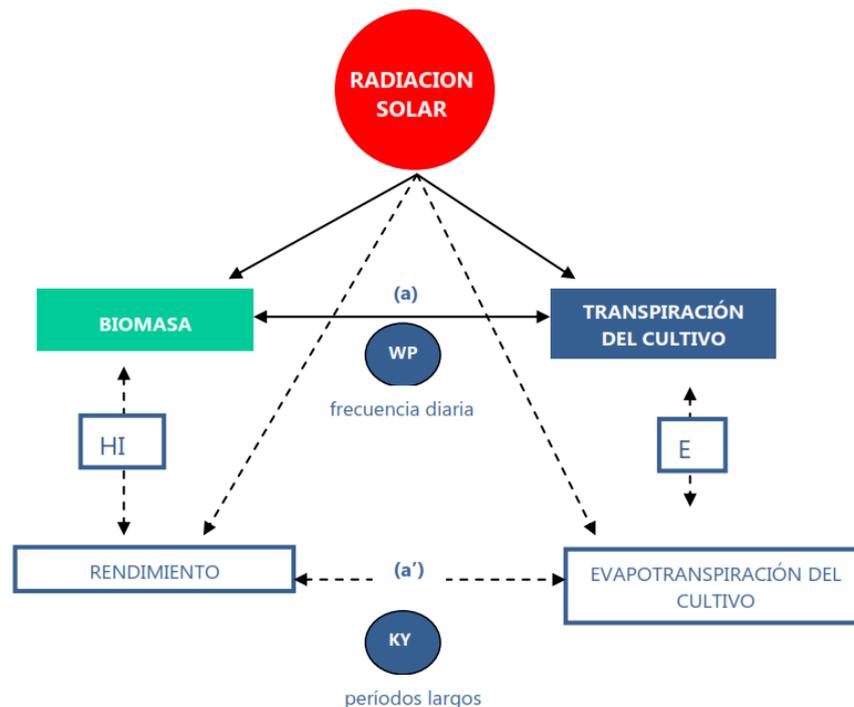
Figura 2: Esquema de dos formas de aplicación de agua

FUENTE: Sánchez & Meza 2015

### 2.3 Modelo agrometeorológico AquaCrop

AquaCrop es un modelo que fue desarrollado por la División de Tierras y Aguas de la FAO, el cual simula el crecimiento y rendimiento de los cultivos en respuesta al agua transpirada que depende del volumen de agua disponible en el suelo.

Durante la simulación del cultivo, AquaCrop realiza el siguiente proceso: a) separa la evapotranspiración (ET), en transpiración del cultivo (Tr) y evaporación del suelo (E); b) modela el crecimiento y senescencia de la cubierta vegetal del cultivo; c) determina el rendimiento final (Y) en función de la materia seca final (B) y el índice de cosecha (HI), y d) estima si el cultivo se encuentra estresado ya sea por estrés hídrico, estrés por temperatura, estrés del aire, estrés por fertilidad o estrés por salinidad del suelo (Steduto *et al.*, 2009).



**Figura 3:** Esquema simplificado del modelo AquaCrop, en el que se resalta la separación de la evaporación del suelo (E) y la transpiración del cultivo (Tr); además de la separación del rendimiento (Y) en la biomasa (B) y el índice de la cosecha (HI).

FUENTE: Steduto et al. 2012

La Figura 3, presenta motor del modelo AquaCrop donde la productividad hídrica (WP) permite estimar la biomasa directamente a partir de la transpiración del cultivo real, gracias a la siguiente relación.

$$B = WP * \sum Tr$$

Donde B es la biomasa acumulada producida (kg/m<sup>2</sup>); Tr es la transpiración del cultivo (mm) y WP es la productividad hídrica (kg/m<sup>3</sup>).

Una vez obtenida la biomasa acumulada (B), se es posible determinar el rendimiento (Y) a través del índice de cosecha (HI), gracias a la siguiente relación.

$$Y = B * HI$$

Considerando el rendimiento final (Y) dividido en la biomasa (B) y el índice de cosecha (HI), evita la confusión de los efectos de estrés hídrico en la biomasa y la cosecha (Steduto, et al. 2012).

### 2.3.1 Esquema de cálculo del modelo AquaCrop

El modelo AquaCrop, además de usarse como una herramienta de planificación o gestión de cultivo con respecto a la programación de riego. Este modelo nos permite simula el rendimiento del cultivo en pasos que se ejecutan a diario y se explican a continuación.

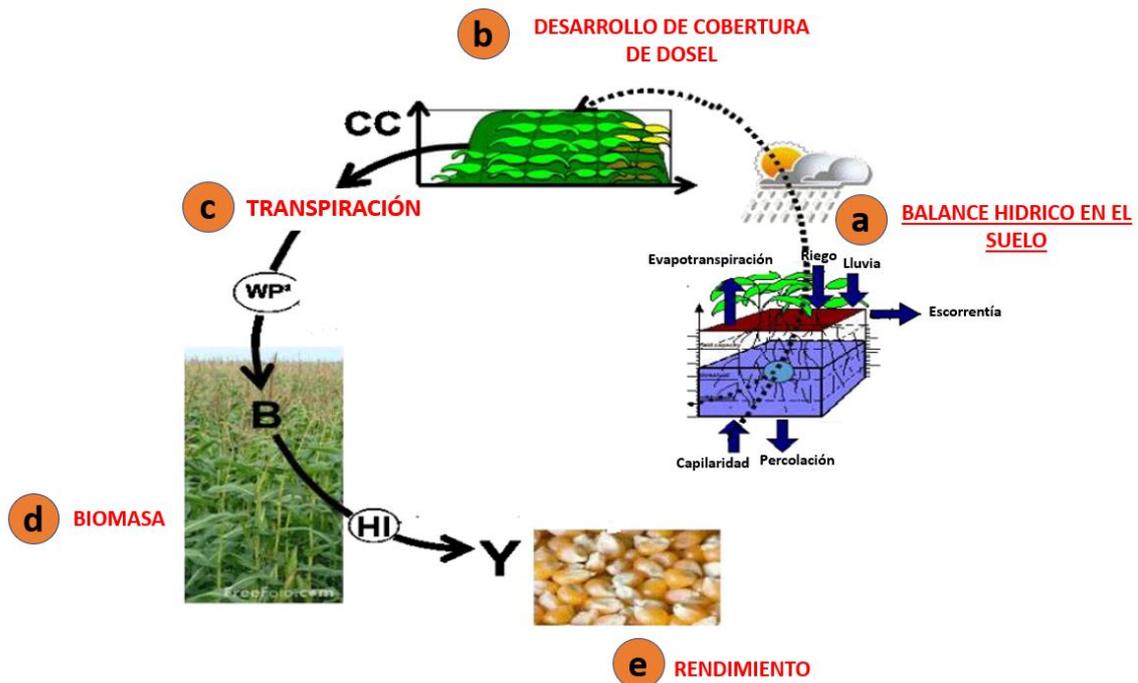


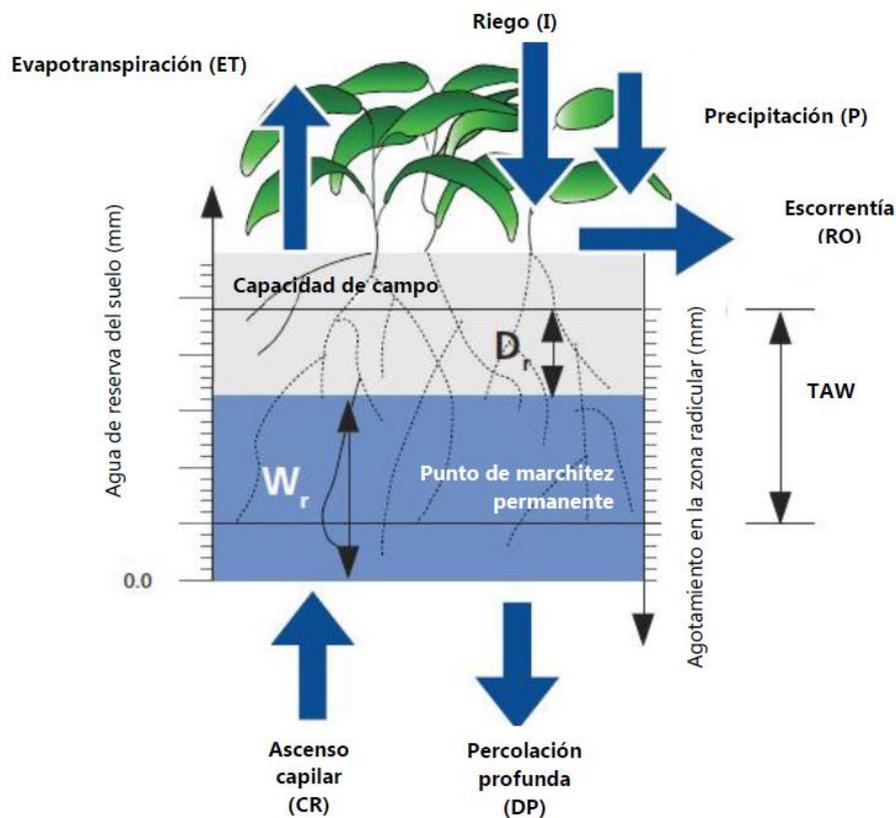
Figura 4: Esquema general del cálculo del modelo AquaCrop

FUENTE: Steduto et al. 2012

### a) Balance hídrico en el suelo

La cantidad de agua almacenada en la zona de la raíz es simulada por la contabilidad de los flujos de agua entrantes (lluvia, riego y aumento capilar) y salientes (escorrentía, evapotranspiración y percolación profunda), los cuales determinan la cantidad de agua retenida en la zona de la raíz ( $W_r$ ). El agua disponible total en el suelo (TAW), es la cantidad de agua retenida en la zona radicular, entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente.

El agotamiento hídrico en la zona de la raíz ( $D_r$ ), determina la magnitud de un conjunto de coeficientes de estrés hídrico ( $k_s$ ) que afecta a: a) la expansión de la cobertura de expansión de dosel, b) la conductancia estomática y por lo tanto la transpiración ( $t_r$ ) por unidad de cobertura de dosel, c) la senescencia de la cobertura de dosel, d) el índice de cosecha (HI) y e) el índice de profundidad del sistema radicular (Allen *et al.*, 2006).



**Figura 5: Zona radicular descrita como un depósito. Se indican la profundidad de agua equivalente ( $W_r$ ) y el agotamiento en la zona radicular ( $D_r$ ).**

FUENTE: Steduto et al. 2012

## b) Simulación del desarrollo de la cobertura de dosel (CC)

La cobertura del dosel (CC), es una característica crucial para AquaCrop y se expresa en fracción o porcentaje respecto al marco de plantación y varía entre 0 (antes de la emergencia) hasta un 100 por ciento siendo este la máxima cobertura de dosel ( $CC_x$ ), esto depende del tipo de cultivo y la densidad de siembra.

El desarrollo y la senescencia de la cobertura de dosel para condiciones óptimas responde a cuatro parámetros: La cobertura inicial de dosel ( $CC_0$ ), esto ocurre cuando el 90 por ciento del cultivo halla emergido, el coeficiente de crecimiento del dosel (CGC), que es la fracción o porcentaje de aumento de la cobertura de dosel por día o día de grado creciente. La cobertura máxima de dosel ( $CC_x$ ), que expresa la máxima cobertura que ha tenido el cultivo durante su etapa vegetativa y el coeficiente de disminución del dosel (CDC), que es la fracción o porcentaje de disminución de la cobertura por día o día de grado creciente.

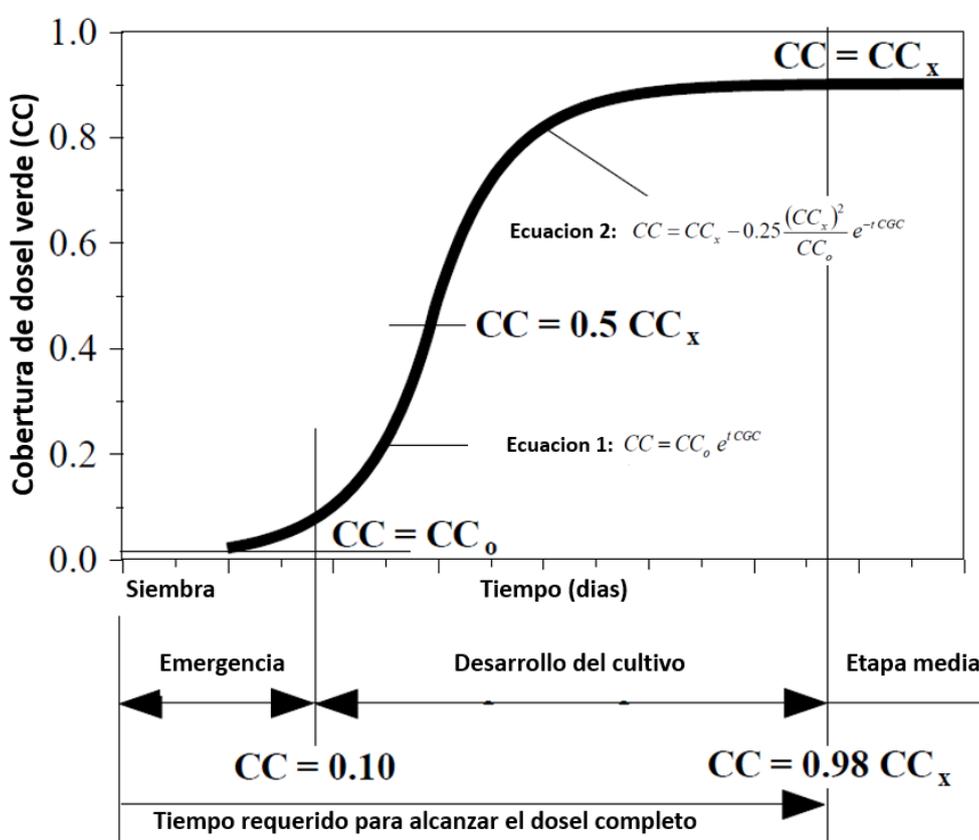


Figura 6: Representación esquemática del desarrollo del dosel durante las etapas de crecimiento exponencial (Ec. 1) y decadencia exponencial (Ec. 2)

FUENTE: Steduto et al. 2012

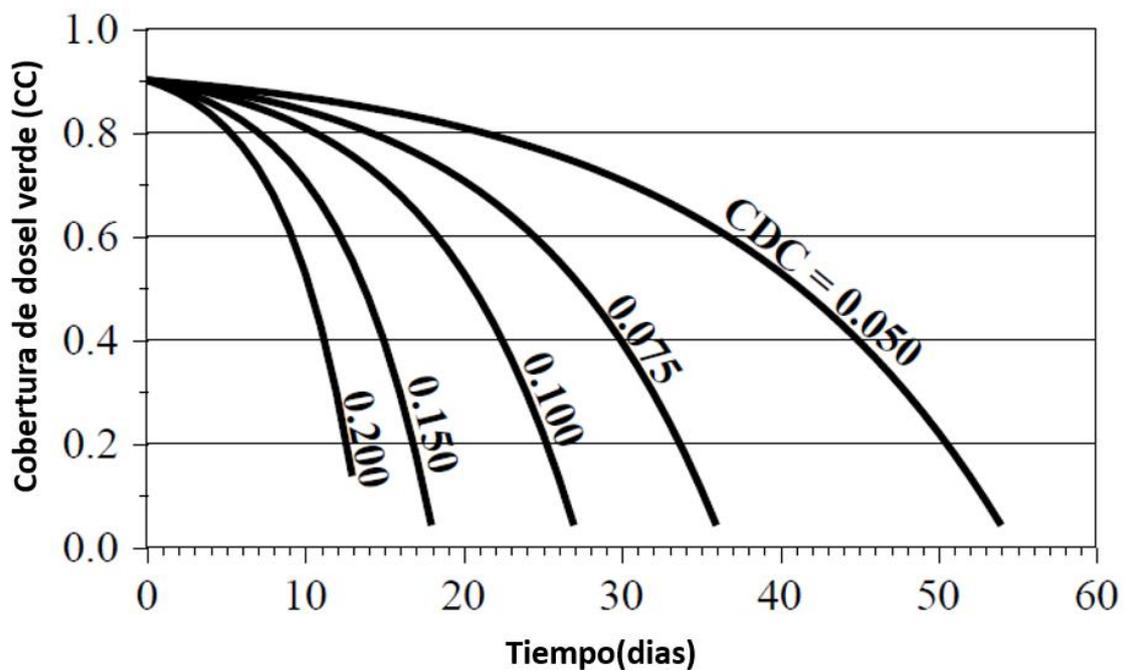
CCo, CGC y CCx determinan el tiempo requerido para alcanzar la cobertura máxima del dosel. Si CCo y CGC son grandes, se alcanza rápidamente el dosel máximo (CCx). Si el desarrollo del cultivo comienza con un CCo pequeño, el período para alcanzar la cobertura máxima del dosel será más largo.

La disminución en el dosel de cultivos verdes se describe por la siguiente ecuación:

$$CC = CC_x \left[ 1 - 0.05 \left( e^{\frac{3.33 \text{ CDC}}{CC_x + 2.29t}} - 1 \right) \right]$$

CC: Cobertura de dosel; CCx: Cobertura de dosel máxima; CDC: Coeficiente de disminución del dosel y t: Tiempo en días.

Donde el coeficiente de disminución del dosel CDC determina la tasa de disminución del dosel verde a finales temporada. Por lo que un CDC alto resulta en una fuerte disminución de la cubierta, mientras que la senescencia será más gradual si selecciona un CDC más pequeño.



**Figura 7: Disminución de la cubierta verde del dosel durante la senescencia para varios taldos coeficientes de disminución (CDC)**

FUENTE: Steduto et al. 2012

### c) **Simulación de la transpiración del cultivo**

El modelo AquaCrop, separa el proceso de evapotranspiración en dos componentes: la evaporación del suelo y la transpiración del cultivo. Para simplificar, AquaCrop asume que la evaporación tiene lugar sólo desde el suelo que no es sombreado por la cobertura de dosel y que es ligeramente inferior al valor proporcional a (1-CC) y a medida que se produce la senescencia, esta continúa brindando sombra al suelo, pero de una manera menos efectiva, porque las hojas han empezado a desintegrarse y es posible que se pierdan hojas muertas. En esta situación el modelo continúa basando la evaporación del suelo en CCx, pero aplica un factor sencillo para reducir la capacidad de protección del dosel que está muriendo.

El otro factor clave que determina la evaporación (E), es la humedad de la superficie del suelo, cuando la superficie del suelo está completamente humedecida la tasa de evaporación aumenta, cuando esta comienza a secarse la evaporación disminuye exponencialmente con la reducción de la humedad del suelo.

La transpiración del cultivo se calcula multiplicando la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) con el coeficiente de transpiración del cultivo (K<sub>cTr</sub>), que es proporcional a la cobertura de dosel, pero se ajusta adicionalmente para la advección entre surcos y la tendencia diurna de intercepción de radiación por el dosel (Steduto, *et al.* 2012).

La transpiración del cultivo también se ve afectado por el coeficiente de estrés hídrico (K<sub>s</sub>) y el de estrés por frío (K<sub>sTr, x</sub>), cuando no hay estrés suficiente para limitar la apertura estomática estos coeficientes toman un valor de 1.

$$T_r = K_s(K_{sTr,x}K_{cTr})ET_o$$

Como ya se mencionó el coeficiente de transpiración del cultivo (K<sub>cTr</sub>) es proporcional a la cubierta verde del dosel (CC)

$$K_{cTr} = (K_{cTr,x})CC^*$$

Donde  $K_{cTr,x}$ , es el coeficiente de cultivo para la transpiración máxima del cultivo y  $CC^*$  es la cobertura del dosel ajustada para efectos micro advectivos. Para la mayoría de los cultivos el  $K_{cTr,x}$  esta en el rango de 1.05 y 1.20.

#### d) Simulación de la Biomasa

La ecuación conceptual del AquaCrop, establece que la producción de biomasa (B) es obtenida a partir de la cantidad acumulada de agua transpirada ( $\Sigma Tr$ ) y a la productividad del agua normalizada para el clima y el  $CO_2$  ( $WP^*$ ).

$$B = WP^* \sum \left( \frac{Tr_i}{ET_{o_i}} \right)$$

Dónde:

B : Biomasa por encima del nivel del suelo [Kg.m<sup>-2</sup>]

WP\* : Es la productividad del agua normalizada [g.m<sup>2</sup>]

Tr : Es la transpiración del cultivo [mm día<sup>-1</sup>]

ET<sub>o</sub> : Es la evapotranspiración de referencia diaria del cultivo [mm día<sup>-1</sup>].

El objetivo de la normalización de la productividad del agua ( $WP^*$ ), es hacer que la esta sea aplicable para diversas condiciones. Xu & Hsiao (2004), mencionan que la normalización de la productividad hídrica implica dos factores ambientales: la demanda evaporativa de la atmósfera representada por la  $ET_o$ , y la concentración de dióxido de carbono del aire ( $CO_2$ ) teniendo como año de referencia, el 2000.

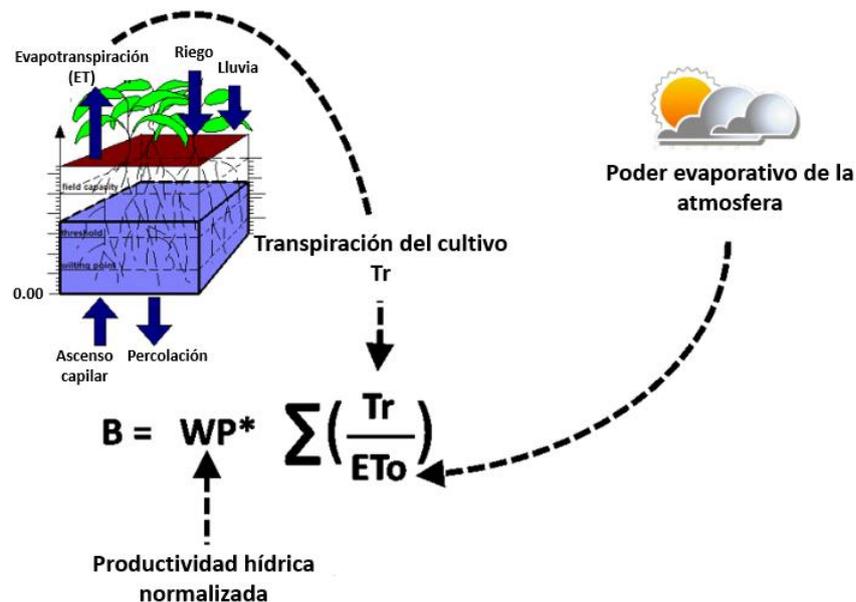


Figura 8: Esquema de cálculo para la producción de la biomasa aérea producida

FUENTE: Steduto et al. 2012

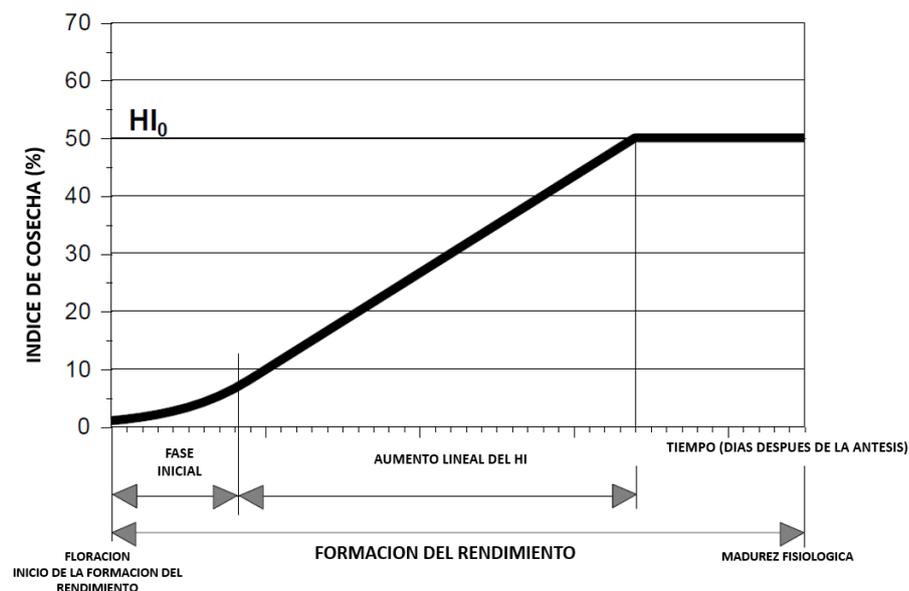
### e) Simulación del rendimiento

AquaCrop determina el rendimiento del cultivo (Y), a partir de la multiplicación de la biomasa total sobre el suelo (B) con el índice de cosecha (HI). Se de tener en cuenta que para los cultivos de raíces/tubérculos, el HI es la relación entre la biomasa de los órganos reservantes y la biomasa total (raíz más tallo). Los pocos datos publicados sobre los cultivos de raíces/tubérculos indican que, en lugar de aumentar de forma lineal después de una fase de retraso, el HI se incrementa rápidamente poco después de la formación de los órganos reservantes, y luego decrece gradualmente hasta la maduración. De este modo, el HI se describe mediante una curva logística para estos cultivos. (Steduto *et al.* 2012)

$$Y = f_{HI} * HI_0 B$$

Donde  $f_{HI}$  es un multiplicador que considera las tensiones que ajustan el índice de cosecha de su valor de referencia, estos ajustes se deben ya sea a un déficit de agua, de temperatura o estrés.

A partir de la floración o iniciación del tubérculo, el índice de cosecha (HI) aumenta gradualmente hasta alcanzar su valor de referencia ( $HI_0$ ) en la madurez fisiológica



**Figura 9: Incremento del índice de cosecha desde la floración hasta la maduración fisiológica de los cultivos que producen frutos y granos**

FUENTE: Steduto *et al.* 2012

### 2.3.2 Descripción del modelo agrometeorológico AquaCrop

Como ya se mencionó el modelo AquaCrop simula el rendimiento esperable en función del consumo de agua, donde la transpiración calculada es traducida en biomasa de acuerdo con parámetros específicos de cada cultivo, este parámetro es la productividad del agua, normalizada por la demanda evaporativa atmosférica y la concentración de CO<sub>2</sub> del aire. Modelando el cultivo con un número pequeño de parámetros y variables de entrada que requieren métodos relativamente sencillos para su determinación.

En la Figura 10, se presenta la interfaz principal del modelo AquaCrop en la que se observan los módulos disponibles para realizar la simulación. En la parte superior del encabezado “Environment and Crop”, se encuentran los cuatro módulos que componen el modelo que son el clima, el cultivo, las prácticas de manejo y el suelo.

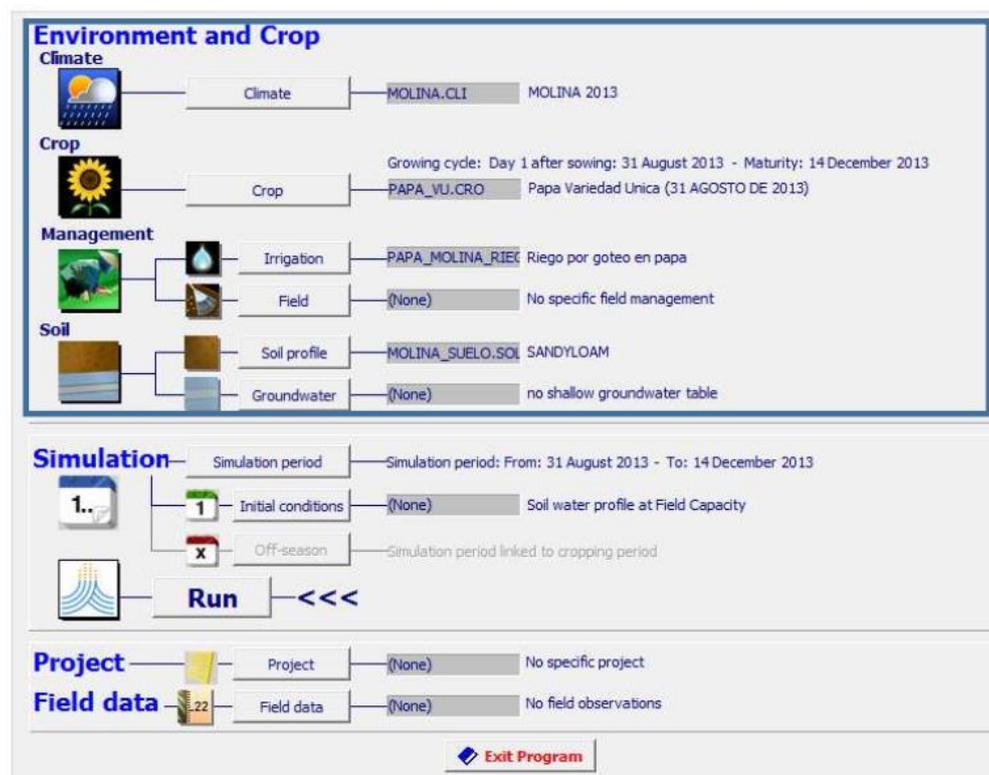
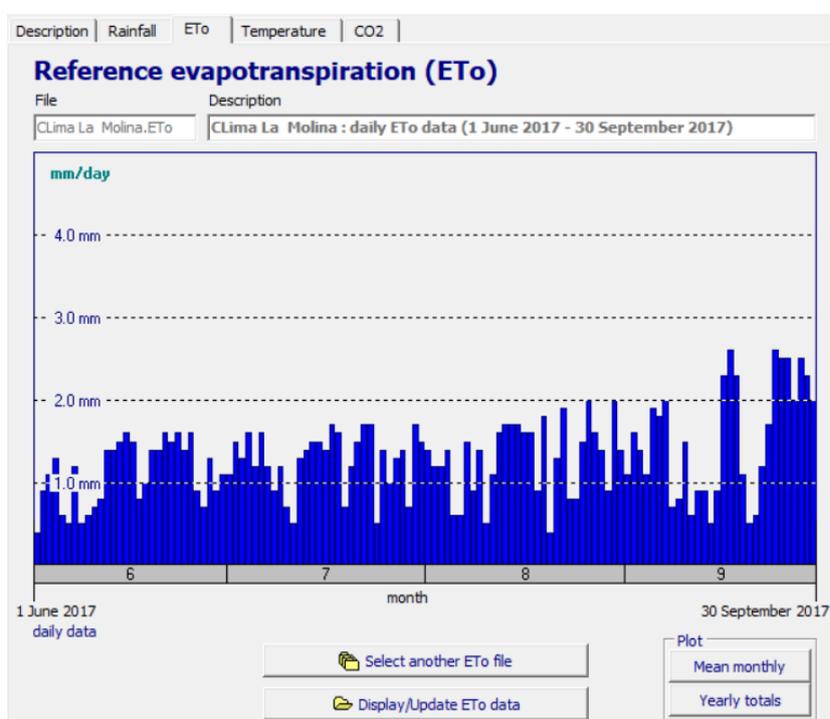


Figura 10: Interfaz del modelo Agrometeorológico AquaCrop

FUENTE: Software AquaCrop

## Datos climáticos (módulo clima)

El ambiente atmosférico se identifica mediante cuatro variables meteorológicas diarias: Temperaturas máximas y mínima del aire, precipitación y demanda de evaporación de la atmósfera, expresada como evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>), la cual se calcula de acuerdo con la ecuación Penman-Monteith (Allen et al. 2006).



**Figura 11: Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) durante la investigación**

FUENTE: Software AquaCrop

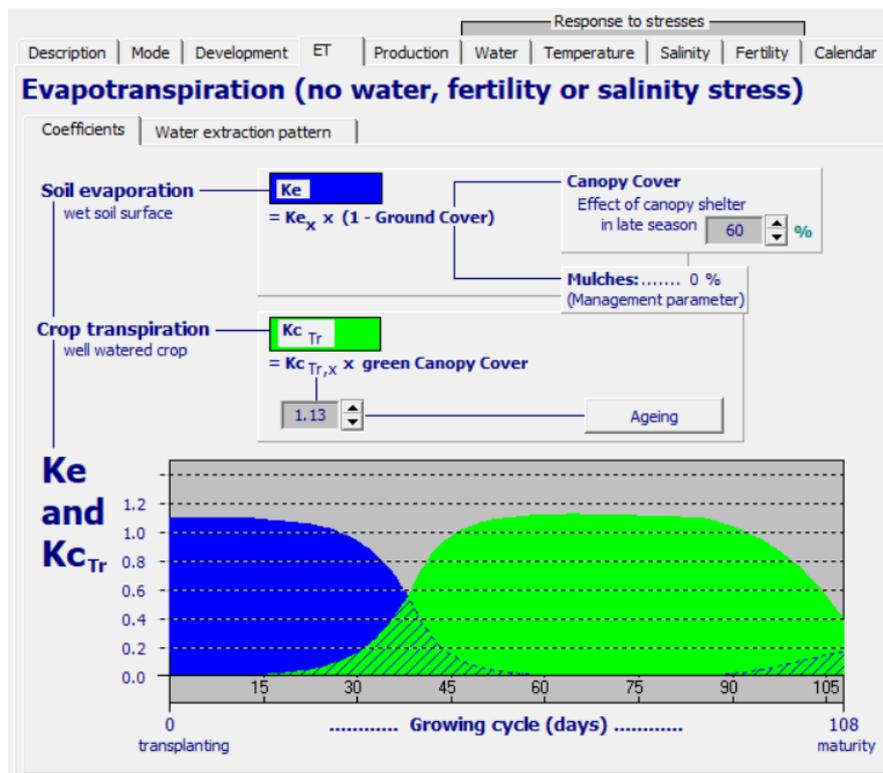
## Características del cultivo (módulo cultivo)

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

Después de su emergencia, el cultivo crece y se desarrolla durante su ciclo de crecimiento, en el cual amplía su dosel y profundiza su sistema radicular, transpira agua y acumula biomasa, al tiempo que avanza por sus etapas fenológicas. El índice de cosecha (HI) modifica el porcentaje de biomasa que será aprovechable. Es importante tener en cuenta que en AquaCrop, aparte de la partición de la biomasa en rendimiento, no existe ninguna otra división entre los diversos órganos de la planta esto permite evadir la complejidad e

incertidumbres asociadas con los procesos de partición, los cuales continúan siendo los más difíciles de modelar.

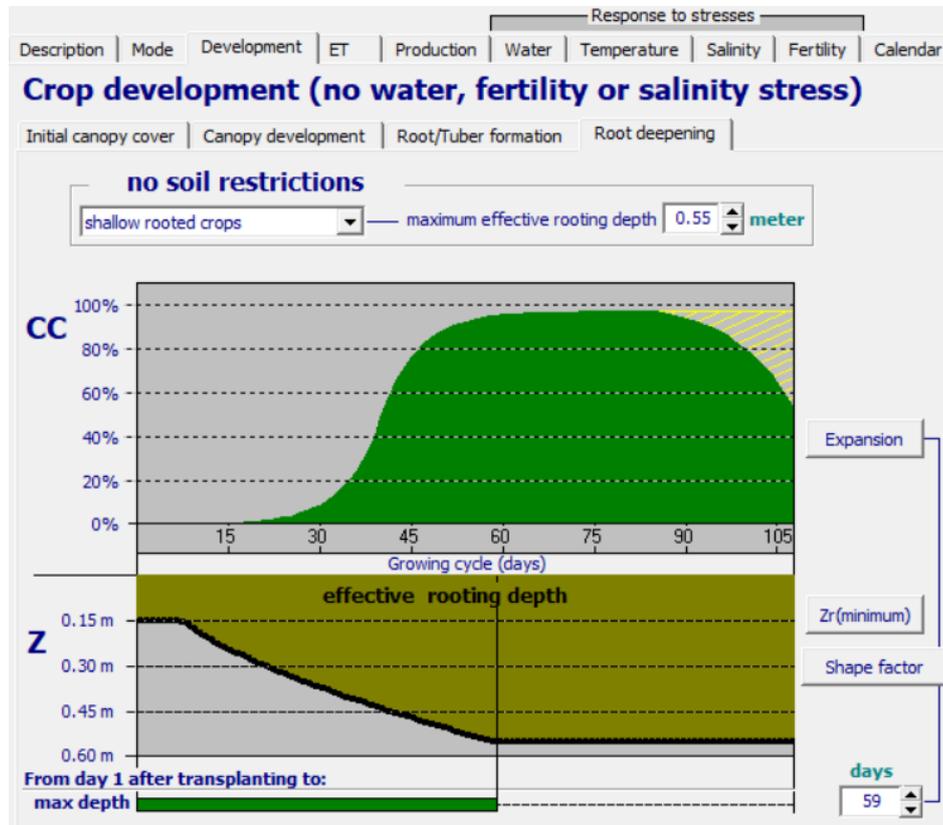
En el módulo de cultivo del modelo AquaCrop puede ingresarse un amplio rango de datos, en donde al tener una mayor disponibilidad de estos denota en una mayor precisión al momento de correr el programa. El modelo nos permite trabajar en dos modos: limitado (limited set), y completo (full set). En el modo limitado, el programa demanda información referida al desarrollo del cultivo y a parámetros de producción, principalmente fenología y longitud del ciclo del cultivo. La información más importante es la relacionada con la densidad de siembra, tipo de siembra, y simulación del porcentaje de cobertura foliar inicial que influye sobre la evaporación del suelo en la etapa de instalación del cultivo, entre otros factores. En el modo completo se pueden cargar la mayoría de los parámetros del cultivo y determinar en nivel de influencia que estos tienen sobre el estrés de la planta. Los distintos estreses se tratan por separado, comprendiendo el estrés hídrico, el térmico, el salino y el de fertilidad.



**Figura 12: Variación del coeficiente de evaporación del suelo ( $K_e$ ) y del coeficiente de transpiración del cultivo ( $K_{ctr}$ ).**

FUENTE: Software AquaCrop

Una vez elegido el cultivo, el programa nos permite visualizar la variación en el tiempo de la evaporación y la transpiración a través del coeficiente de evaporación del suelo ( $K_e$ ) y del coeficiente de transpiración del cultivo ( $K_{ctr}$ ). Estos son valores que aporta el programa, pero a su vez pueden ser modificados si se cuenta con información local validada.

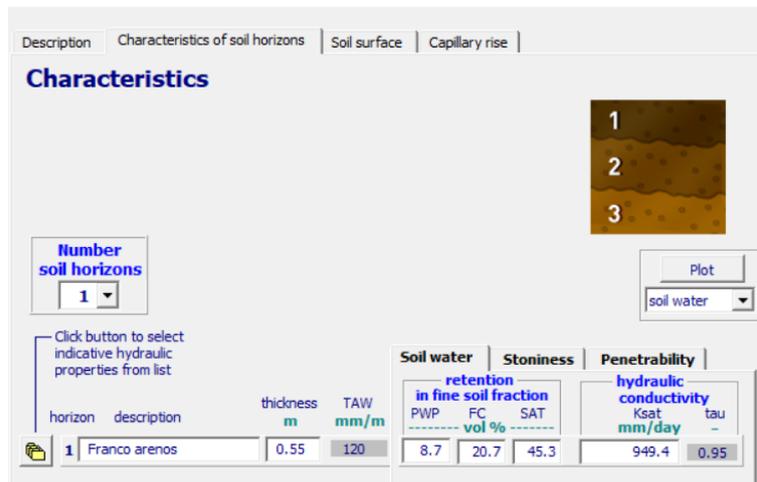


**Figura 13: Desarrollo de la cobertura vegetal y profundidad efectiva de raíces**

FUENTE: Software AquaCrop

### Módulo suelo

El módulo de suelo está compuesto por dos ítems: el perfil del suelo y la presencia de freáticas cercanas. La Figura 14, presenta la información que se debe cargar en cada horizonte del suelo, sus contenidos hídricos referenciales (capacidad de campo, punto de marchitez permanente y saturación), el contenido de humedad del suelo a la siembra, contenidos salinos, la existencia de algún límite al desarrollo de las raíces, la profundidad alcanzada por estas, la existencia de freática cercana a las raíces, la profundidad de esta, su aporte en milímetro por día estimado y su salinidad.



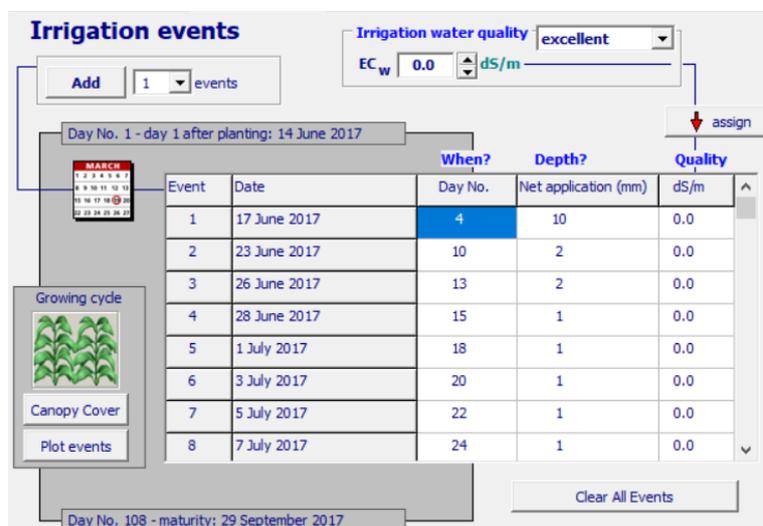
**Figura 14: Modulo de suelo**

FUENTE: Software AquaCrop

### Modulo Manejo

El módulo de manejo está compuesto por dos ítems: el manejo del riego donde se ingresan las láminas aplicadas y el manejo del suelo donde se detalla la fertilidad del suelo, la presencia de cobertura en el suelo que evite la evaporación, y la existencia de prácticas de manejo que eviten el escurrimiento.

- a) Riegos: Aquí se debe precisar el manejo del agua ya sea por secano o por riego (goteo, aspersión o gravedad).
- b) Prácticas agrícolas: Se debe considerar el nivel de fertilidad potencial, por esto se debe realizar el análisis fisicoquímico de suelos, balance de nutrientes y aplicación de enmiendas.



**Figura 15: Laminas aplicadas en el cultivo**

FUENTE: Software AquaCrop

### 2.3.3 Resultados del modelo AquaCrop

Como el modelo está orientado a la simulación de la producción de biomasa con base en la energía presente y especialmente en la incidencia del agua como la productividad hídrica normalizada ( $WP^*$ ), el modelo hace especial énfasis en los efectos del estrés hídrico en el desarrollo del ciclo del cultivo y en la producción.

Una vez cargada toda la información se procede a correr el modelo, permitiéndonos ver tres gráficos como se muestra en la figura 16, el primero se presenta la transpiración del cultivo (Tr) de color azul. En el segundo se aprecia el nivel de cobertura (CC) de color verde alcanzado por el cultivo modelado y por último, se puede ver el contenido hídrico del suelo (Dr) en azul, con tres líneas (de color verde, amarillo y rojo) que indican el nivel de estrés causado sufrido por el cultivo.

Por otro lado, el modelo arroja varios tipos de resultados, entre estos podemos encontrar el balance hídrico del suelo, la producción, y la relación clima – cultivo – suelo – agua, todos los archivos y resultados de la simulación pueden ser exportados a hojas de cálculo para su posterior estudio o análisis. En la Tabla 2, se presenta una lista de algunos de los resultados obtenidos por el modelo AquaCrop.

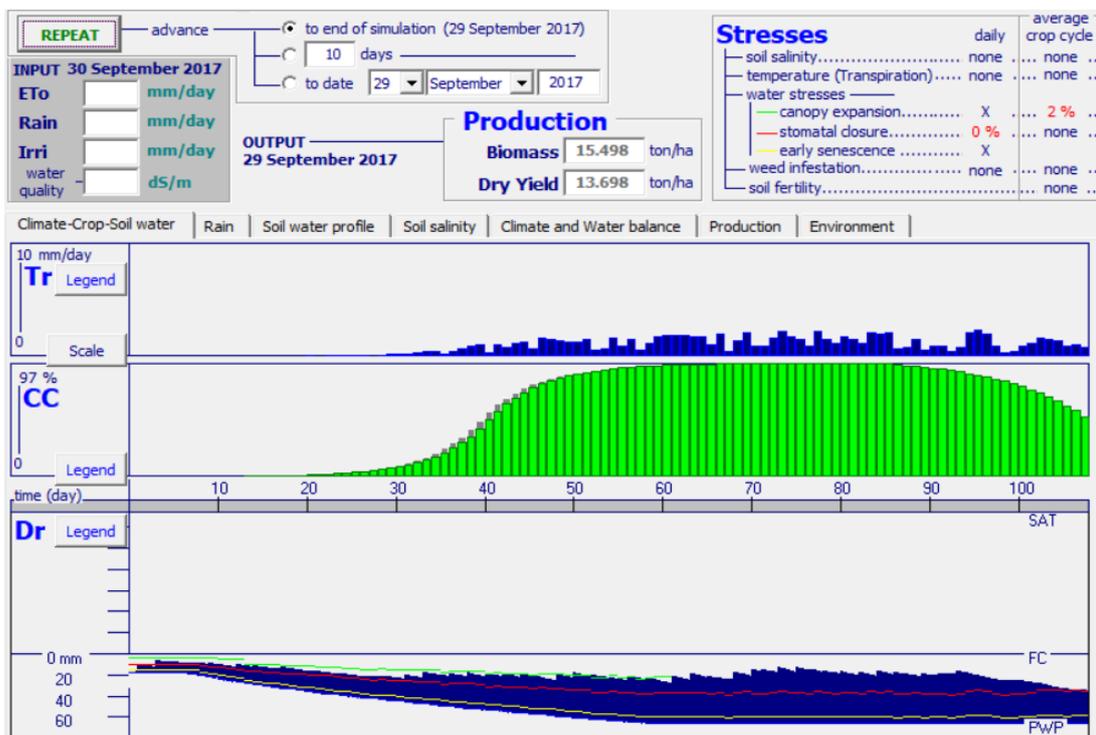


Figura 16: Resultados del modelo AquaCrop

FUENTE: Software AquaCrop

**Tabla 2: Resultados obtenidos con el modelo AquaCrop**

Relación de la interacción clima-cultivo-suelo y agua
El perfil del contenido de agua en el suelo
El balance hídrico del suelo, con la evaluación de la evaporación del suelo, la transpiración del cultivo, la escorrentía superficial, y el drenaje.
La curva de desarrollo de la cobertura vegetal del cultivo a través del ciclo del cultivo
Requerimientos netos de irrigación y el trazado a través del tiempo de la transpiración del cultivo.
La cantidad de biomasa producida, actualizada constantemente
El rendimiento final esperado, también actualizado continuamente
La eficiencia del uso del agua en la producción de biomasa de la evapotranspiración (ET).

FUENTE: Elaboración propia

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Ubicación y características del campo experimental

##### 3.1.1 Ubicación del campo experimental

La investigación se realizó en el campo experimental de la Facultad de Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), ubicado en el distrito de La Molina, provincia de Lima y departamento de Lima.

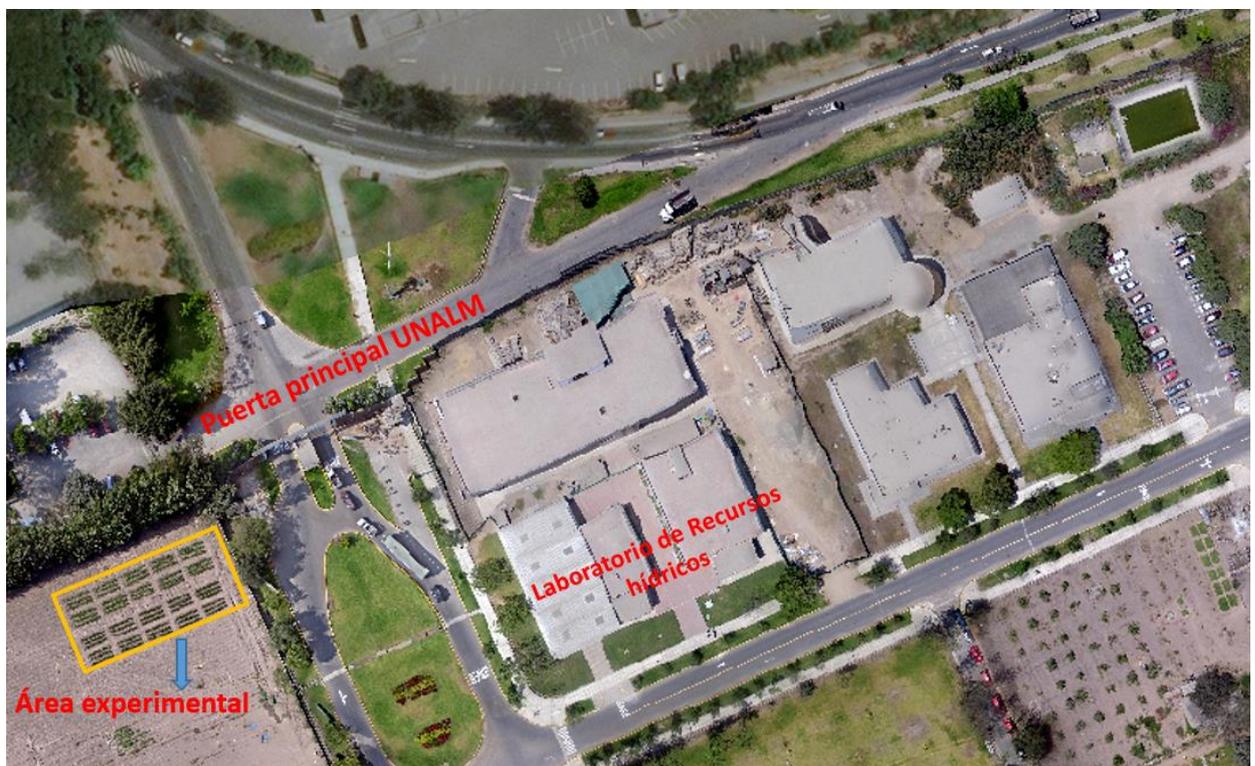


Figura 17: Ubicación del campo experimental, UNALM

Fuente: Google earth (2017)

### 3.1.2 Descripción del área experimental

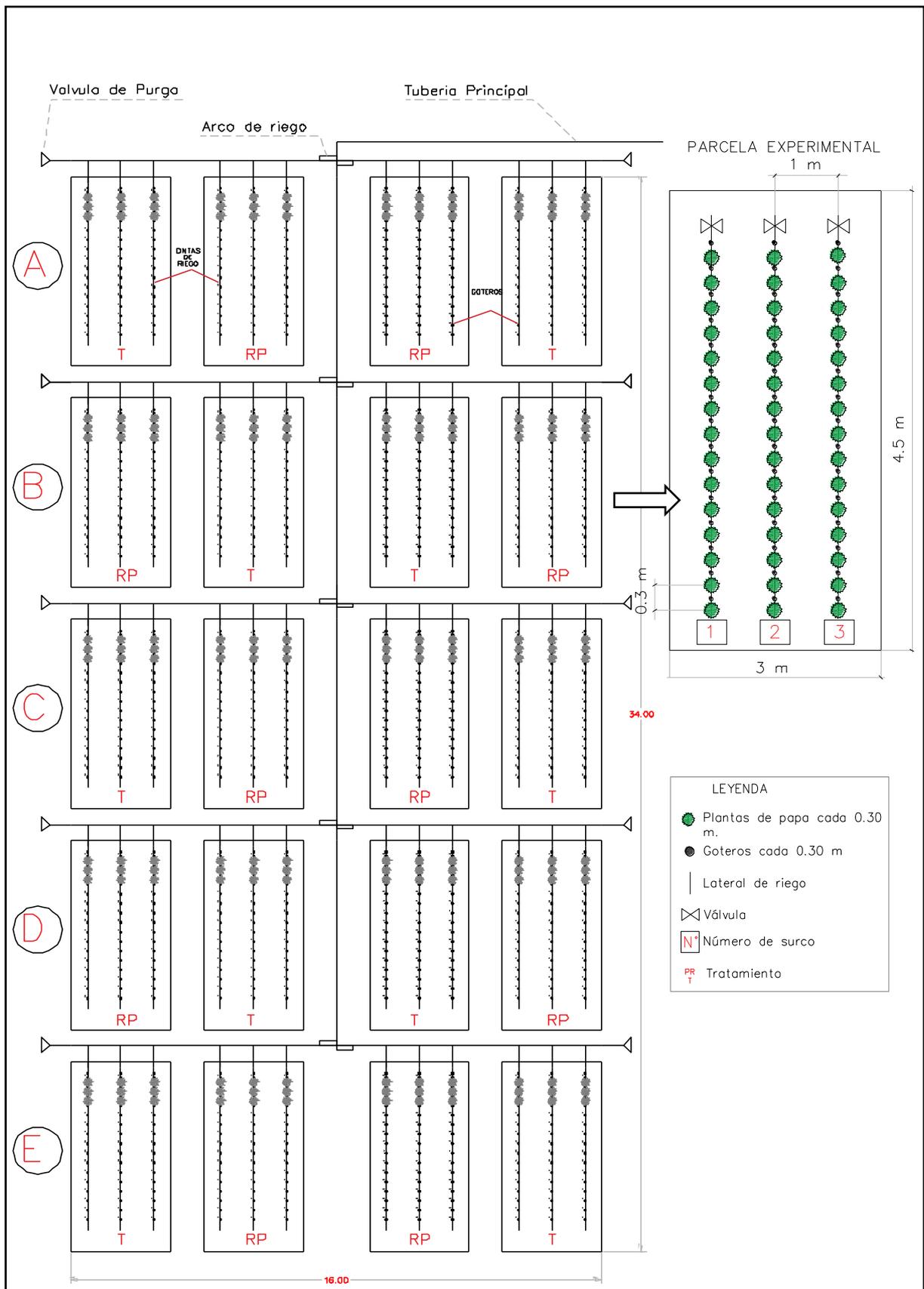
El campo experimental estuvo distribuido en 20 parcelas experimentales cada una de 13.5 m<sup>2</sup> de área, teniendo así un área efectiva de 270 m<sup>2</sup> en todo el campo experimental. En esta área se sembró el cultivo de papa, el cual contó con cuatro etapas vegetativas (emergencia, tuberización, desarrollo y maduración). El espaciamiento entre surcos fue de un metro y una separación entre plantas de 30 centímetros, generando un marco de plantación de 0.3 metros cuadrados por planta.

En el ensayo se llevaron a cabo dos tratamientos: el tratamiento testigo (T) en el cual 10 parcelas fueron aplicadas con una lámina de riego al 100 por ciento de las necesidades hídricas del cultivo en cada una de las etapas vegetativas y el tratamiento deficitario (RP), en donde a 10 parcelas se le aplicó una lámina de riego igual al 50 por ciento de las necesidades hídricas del cultivo en las etapas de emergencia y maduración y el 100 por ciento de las necesidades hídricas del cultivo en las etapas de tuberización y desarrollo.

**Tabla 3: Características de la parcela experimental**

<b>ELEMENTO</b>	<b>NUMERO</b>
Numero de parcelas	20
Área de parcela (m <sup>2</sup> )	13.5
Numero de surcos por parcela	3
Longitud de surco (m)	4.5
Espaciamiento entre surcos (m)	1
Distancia entre plantas (m)	0.3
Número de plantas por surco	15

FUENTE: Elaboracion propia



**Figura 18 : Distribución de campo experimental y descripción de la parcela experimental**

FUENTE: Elaboración propia

## 3.2 Materiales y equipos utilizados en el experimento

### 3.2.1 Material genético

La semilla de papa de variedad UNICA empleada en el experimento presentó un diámetro uniforme y peso variables (entre 80 a 170 g por tubérculo). Una semana antes de la siembra a la semilla se le aplicó una hormona vegetal que estimula el crecimiento de la plántula, así mismo se le aplicó un fungicida para prevenir, inhibir o eliminar los hongos o sus esporas en las semillas de papa.

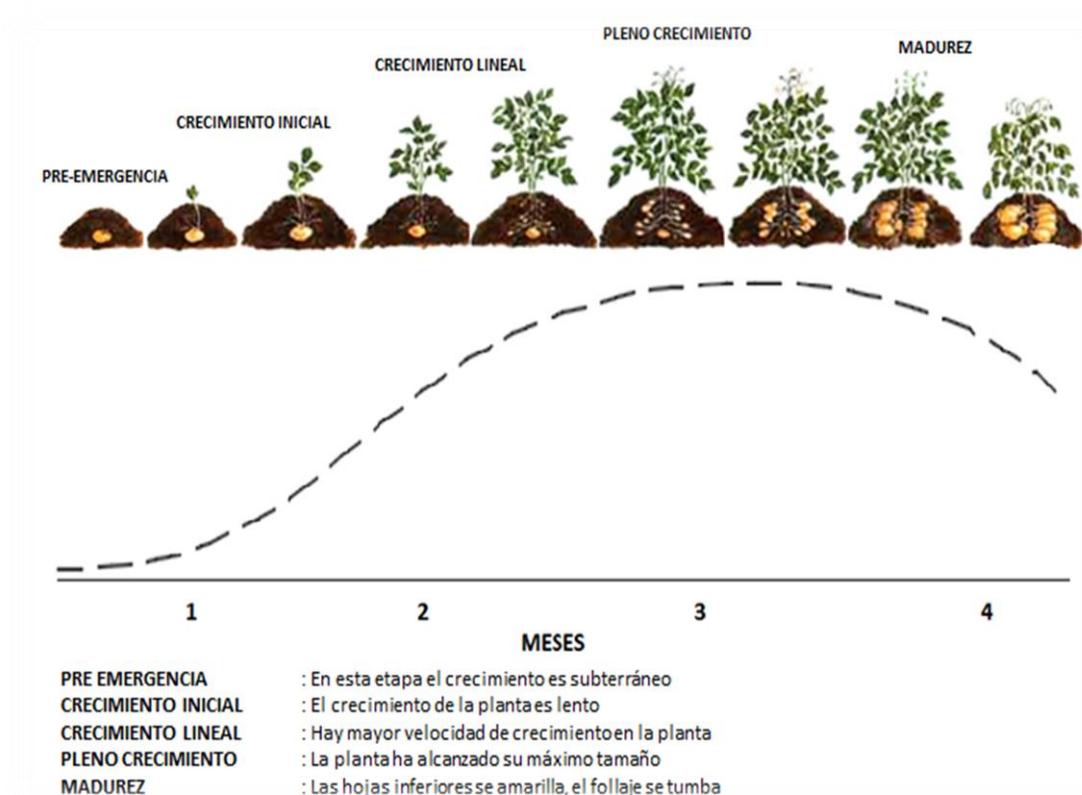
Con respecto a la variedad UNICA, es una nueva variedad caracterizada por ser precoz y tolerante al calor. En las “siembras atrasadas” de la costa (setiembre, octubre) o “muy atrasadas” (enero y febrero) se desarrolla y producen significativamente mejor que las variedades tradicionales. Por su tolerancia al calor y precocidad, en la costa son apropiadas para incorporarse a los sistemas de rotación que no permite la siembra de variedades tradicionales que se requiere periodos fríos para la tuberización. Para la producción comercial en la sierra se recomienda su siembra en la “campaña chica”. En la “campaña grande” de sierra es preferible orientar su cultivo para la producción y mantenimiento de semilla (Egusquiza, 2000).



**Figura 19: Tallo, hoja, tubérculo y flor de la variedad UNICA**

FUENTE: Revista Latinoamericana de la Papa, 2007

En general, la variedad UNICA tiene un crecimiento erecto, con tallos gruesos de color verde oscuro, alcanzando una longitud entre 0,90 a 1,20 metros, siendo considerado de porte mediano. Las hojas son compuestas y se distribuyen en espiral sobre el tallo. Produce tubérculos de tamaño uniforme, de forme oblongos y alargados de color rojo claro (Gutierrez & Espinoza, 2007). Este cultivo por ser del tipo C3 (baja tasa de evapotranspiración), requiere bajos volúmenes de agua para obtener rendimientos superiores en biomasa, incluso mediante la aplicación de un riego deficitario.



**Figura 20: Desarrollo del cultivo de papa (variedad UNICA)**

FUENTE: Egusquiza, 2014

### 3.2.2 Fertilizantes

El fertilizante es una sustancia destinada a abastecer y suministrar los elementos químicos al suelo para que la planta los absorba. Se trata, por tanto, de una reposición o aporte artificial de nutrientes. Es un producto de origen inorgánico, que contiene, por los menos, un elemento químico que la planta necesita para su ciclo de vida. La característica más importante de cualquier fertilizante es que debe tener una solubilidad máxima en agua, para que, de este

modo pueda disolverse en el agua de riego, ya que los nutrientes entran en forma pasiva y activa en la planta, a través del flujo del agua.

El programa de fertilización se basó en el rendimiento estimado y el diagnóstico físico y químico del suelo. La dosis aplicada fue fraccionada durante la investigación teniendo en cuenta el desarrollo fenológico productivo de la papa, para la dosificación del fertilizante se utilizó un sistema de inyección tipo Venturi, que fue instalado en el mismo campo experimental.

La aplicación de potasio fue a partir de la tercera semana después de la siembra, la proporción de este nutriente se fue incrementando progresivamente hasta el día 90 después de la siembra, la finalidad de su aplicación en estas proporciones es la de mejorar las condiciones de la planta para tolerar déficit hídrico, además de intervenir en diferentes procesos de síntesis y transporte de los azúcares desde las hojas y su conversión en almidón en el tubérculo (Egúsqiza 2014).

En cuanto al aporte de fósforo su aplicación fue durante la emergencia con la finalidad de ayudar en la formación temprana de raíces y tallos aéreos, se fue incrementando progresivamente hasta el día 50 después de la siembra, luego se fue disminuyendo hasta hacerse nula la aplicación en el día 90 después de la siembra.

Por otro lado, “el nitrógeno es muy importante para el desarrollo foliar de la planta ayudando a lograr una mayor tasa fotosintética y estimulando al crecimiento del tubérculo. Se reduce el abastecimiento de nitrógeno proveniente del suelo, para lograr condiciones óptimas de tuberización” (Egúsqiza, 2014).

**Tabla 4: Fertilización empleada (kg/ha)**

<b>Fertilizante</b>	<b>N</b>	<b>P2O5</b>	<b>K2O</b>	<b>CaO</b>	<b>MgO</b>	<b>S</b>	<b>Mn</b>	<b>Fe</b>
	Kg/ha							
	115.6	234	196	59.6	32.4	26.3	0.0	0.4

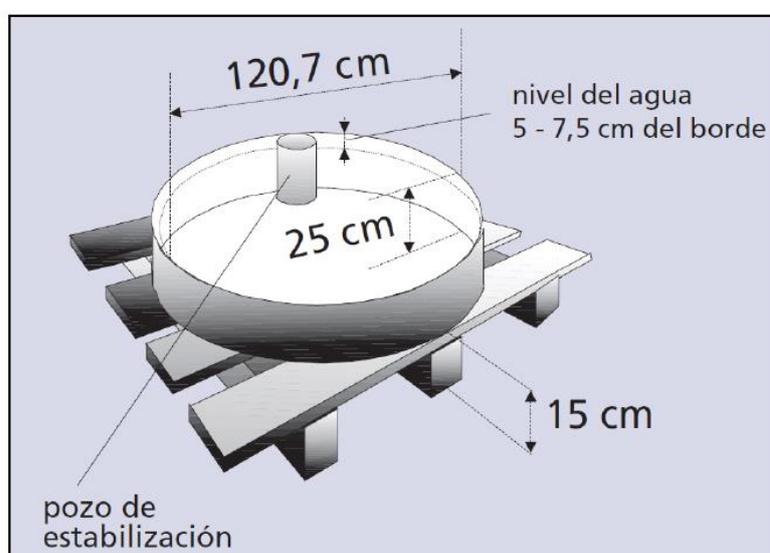
FUENTE: Elaboración propia

### 3.2.3 Equipos para el monitoreo de la evapotranspiración de referencia

Se contó con un tanque evaporímetro de clase A, el cual permitió conocer la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET<sub>o</sub>), a través de la multiplicación de la lectura del tanque y el factor de tanque. Según Doorembos & Pruitt (1977), “el factor de tanque depende de la cobertura del suelo donde se ubica el tanque, sus alrededores, así como el viento y las condiciones generales de humedad”.

En lo que refiere estrictamente a la descripción del tanque de evaporación clase "A", según la FAO, el tanque clase A es circular de diámetro igual a 120,7 cm y profundidad igual a 25 cm. Está construido de hierro galvanizado (0,8 m) y se debe situar sobre una plataforma de madera en forma de reja que se encuentra a 15 cm por encima del nivel del suelo, el tanque debe estar nivelado. Una vez instalado, el tanque se llena con agua hasta 5 cm por debajo del borde y el nivel del agua no debe disminuir hasta más de 7,5 cm por debajo del borde. El agua debe ser regularmente cambiada, al menos semanalmente, para eliminar la turbidez. Si el tanque es galvanizado, debe ser pintado anualmente con pintura de aluminio. Los tanques deben ser protegidos con mallas de seguridad para evitar el acceso de los animales y las lecturas del tanque se deben realizar diariamente a la misma hora (Allen *et al.* 2006).

Por otro lado, la ET<sub>o</sub> obtenida del tanque se comparó con la ET<sub>o</sub> calculada con la estación meteorológica resultando que son estadísticamente confiables.



**Figura 21: Características del tanque evaporímetro clase A**

FUENTE: Allen et al. 2006.

### 3.2.4 Equipos para el monitoreo de la humedad en el suelo

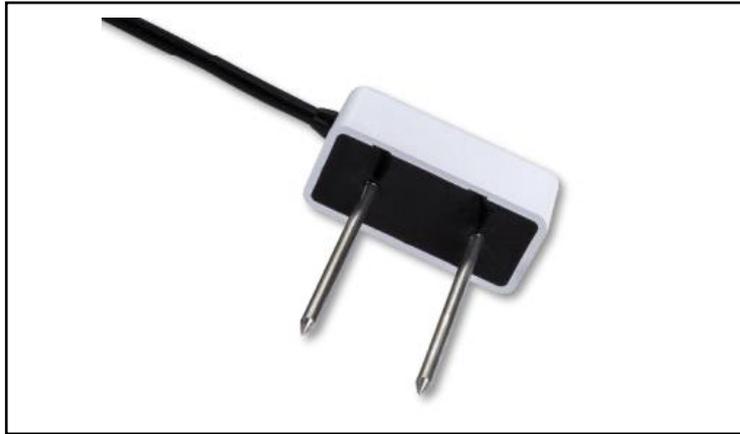
El monitoreo de la humedad en el suelo se llevó a cabo mediante dos métodos: el gravimétrico (método directo) y el volumétrico (método indirecto). La humedad gravimétrica, se determinó a lo largo del experimento y consistió en obtener una muestra de suelo con ayuda de un barreno espiral para luego pesarla en una balanza eléctrica, posteriormente se seca en el horno a una temperatura de 105 °C, finalmente se obtuvo el peso seco de la muestra. La diferencia entre los pesos húmedos y secos permite obtener la humedad de la muestra. Tal parámetro puede ser expresado volumétricamente si el resultado de la humedad gravimétrica se multiplica por la densidad del suelo.



**Figura 22: a) Barreno espiral, b) Horno a 105° C de temperatura**

FUENTE: Elaboración propia

Por otro lado, la humedad volumétrica (método indirecto) fue registrada con ayuda de un registrador de datos Em50G, que, una vez establecido el intervalo de medición, almacenaba los datos obtenidos por el sensor GS1 Decagon. El funcionamiento de los sensores de capacitancia eléctrica (FDR) que miden el contenido volumétrico del agua en el suelo a diferentes profundidades y en forma continua, lo que permite, mediante gráficas de contenido de humedad en el suelo, tomar decisiones de relación agua-aire, frecuencia y tiempo de riego. El sensor emplea un campo electromagnético para medir la permitividad dieléctrica del medio que los rodea. El sensor suministra una onda oscilante de 70 MHz (tal frecuencia minimiza los efectos de salinidad y de textura) hacia las puntas que cargan acorde al dieléctrico del material, el diseño de estas puntas se puede notar en la Figura 23. La carga almacenada es proporcional al sustrato dieléctrico y al contenido volumétrico de agua del sustrato, el sensor mide la carga y da salida a un valor en bruto que se correlaciona fuertemente al contenido volumétrico del agua (Decagon, 2015).

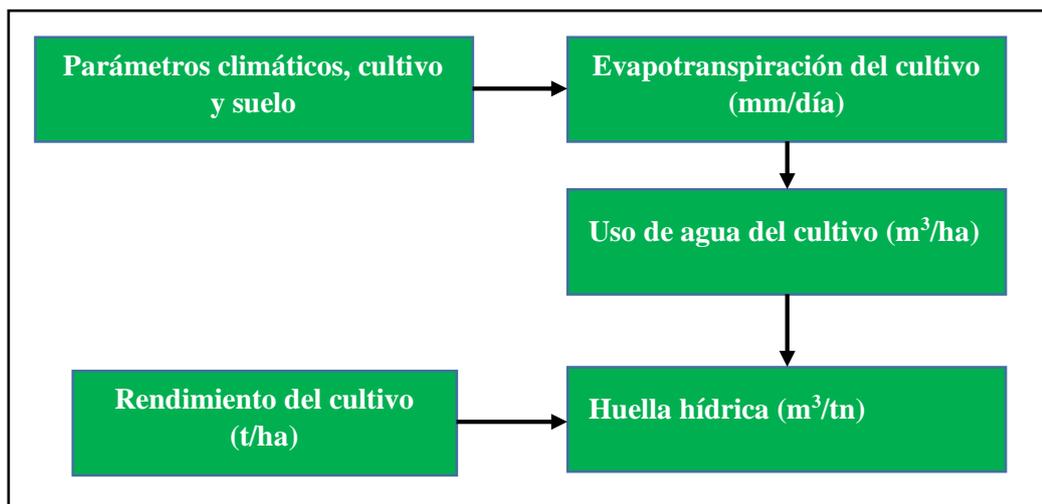


**Figura 23: Sensor de humedad GS1 Decagon**

FUENTE: Decagon Devices (2015).

### 3.3 Metodología para la determinación de la huella hídrica con el modelo AquaCrop

La determinación de la huella hídrica sirve como indicador para comparar el uso de agua en los cultivos agrícolas sometido a diferentes condiciones. El objetivo principal de este estudio fue determinar la huella hídrica haciendo uso del modelo AquaCrop para condiciones óptimas y de déficit hídrico, en el cual se aplicó el riego parcial en zona de raíces.



**Figura 24: Esquema para el cálculo de la huella hídrica**

FUENTE: Elaboración propia

La Figura 24, muestra una comprensión general y esquemática para la determinación de la huella hídrica utilizando el modelo AquaCrop, que simula los valores de evapotranspiración

durante todo el periodo de producción y con el rendimiento obtenido en la simulación se determina la huella hídrica

La metodología que se abordó en la presente investigación se detalla en la Figura 25, en el cual se indica cada una las variables introducidas en el modelo AquaCrop, para la calibración del modelo y validación espacial del mismo, haciendo uso de los indicadores estadísticos correspondientes para su posterior determinación de la huella hídrica.

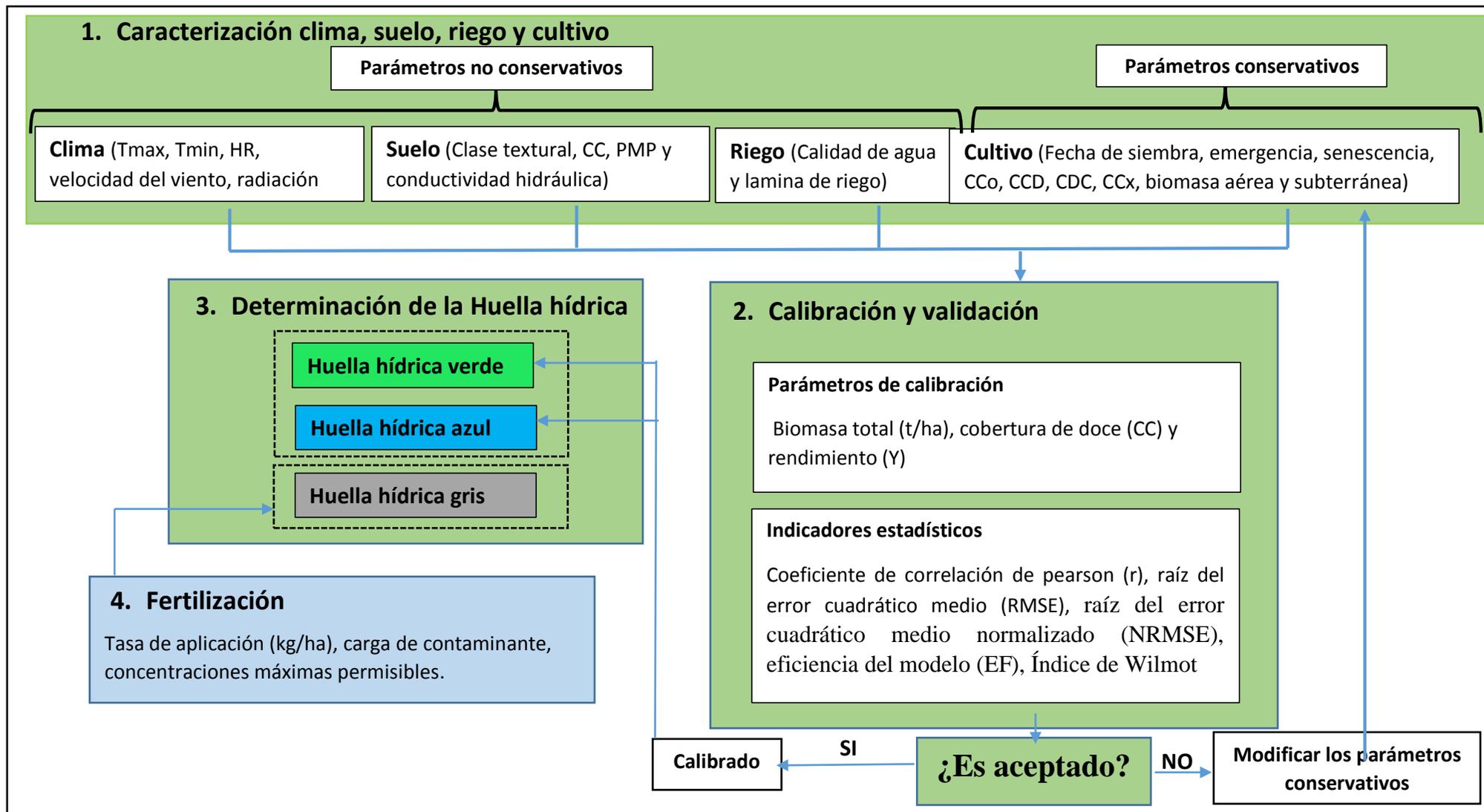


Figura 25: Diagrama de flujo de la metodología empleada en el estudio

FUENTE: Elaboración propia

### 3.3.1 Análisis estadístico

El diseño experimental empleado en la investigación completamente al azar, para dos tratamientos con diez repeticiones cada uno. Este diseño se llevó a cabo para estudiar los efectos producidos por el tipo de riego en donde la variable independiente fue la lámina de agua aplicada y las variables dependientes fueron la producción de biomasa, el rendimiento y cobertura de dosel.

En el ensayo se llevaron a cabo dos tratamientos: el tratamiento testigo (T) en el cual 10 parcelas fueron aplicadas con una lámina de riego al 100 por ciento de las necesidades hídricas del cultivo en cada una de las etapas vegetativas y el tratamiento deficitario (RP), en donde a 10 parcelas se le aplicó una lámina de riego igual al 50 por ciento de las necesidades hídricas del cultivo en las etapas de emergencia y maduración y el 100 por ciento de las necesidades hídricas del cultivo en las etapas de tuberización y desarrollo. El primero sirvió a manera de calibración y el segundo para la validación del modelo AquaCrop.

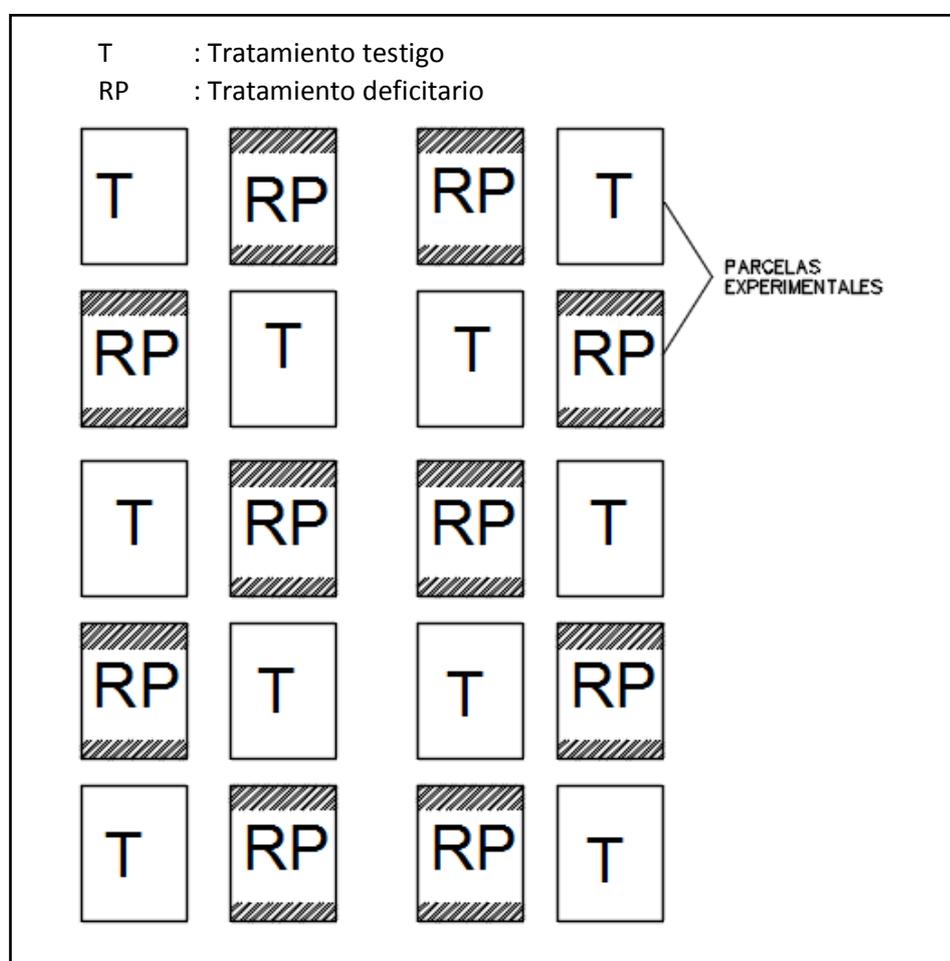


Figura 26: Distribución de los tratamientos realizados en la investigación

FUENTE: Elaboración propia

El modelo lineal aditivo viene dado por la siguiente ecuación:

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

Donde  $Y_{ij}$  es la observación en la unidad experimental  $j$  (repetición) a la que se le ha aplicado el tratamiento  $i$ ,  $\mu$  es la media general del experimento,  $\alpha$  es el efecto del tratamiento  $i$ , por último  $\varepsilon_{ij}$  es el efecto del error de la observación.

El análisis de varianza se realizó con el software Statistx 10, teniendo en cuenta la siguiente tabla.

**Tabla 5 : Índices del análisis de varianza**

<b>Fuente de Variación</b>	<b>gl</b>	<b>SC</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>
<b>Tratamientos</b>	t-1	SCTR	CMTR	CMTR/CME
<b>Error</b>	t(r-1)	SCE	CME	
<b>Total</b>	tr-1	SCT		

FUENTE: Fernández, 2010

### 3.3.2 Caracterización del clima, suelo, riego y cultivo

#### a) Clima

Los datos climáticos del área de estudio fueron recopilados de la estación meteorológica del Departamento de Recursos Hídricos de la Facultad de Ingeniería Agrícola, ubicada dentro de las instalaciones de la Universidad Nacional Agraria La Molina (12° 04'49" latitud sur, 76° 57'02" longitud oeste, a una altitud de 235 m.s.n.m.).

Los datos climáticos requeridos para la simulación del cultivo de papa variedad UNICA en el modelo AquaCrop fueron la temperatura máxima y mínima del aire (°C), humedad relativa (%), radiación solar (MJ/m<sup>2</sup>/día), precipitación (mm) y la velocidad del viento (m/s), a los 2m por encima de la superficie del suelo. A partir de estos datos y la localización del área de estudio, el modelo calcula la evapotranspiración de referencia (mm/día), a través de la ecuación de Penman –Monteith.

**Tabla 6 : Datos meteorológicos mensuales en el periodo de investigación**

<b>MES</b>	<b>T<sub>max</sub></b> <b>(°C)</b>	<b>T<sub>min</sub></b> <b>(°C)</b>	<b>HR</b> <b>(%)</b>	<b>Vv</b> <b>(m/s)</b>	<b>Pp</b> <b>(mm)</b>	<b>U</b> <b>(MJ/m2-dia)</b>	<b>ETo</b> <b>(mm/dia)</b>
Junio	22.20	14.90	89.63	1.12	0.75	12.68	1.11
Julio	21.60	13.50	88.12	1.15	0.00	15.94	1.27
Agosto	20.10	13.30	90.85	1.18	0.50	15.82	1.31
Septiembre	22.10	13.30	91.95	1.10	0.75	12.06	1.55

FUENTE: Estación meteorológica del departamento de recursos hídricos. UNALM

## **b) Suelo**

Para la determinación de las características físico-químicas del suelo del área en estudio, se tomó una muestra representativa del campo de acuerdo al procedimiento recomendado por el Laboratorio de Agua, Suelo, Medio Ambiente y Fertirriego de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

La Tabla 7, muestran los resultados obtenidos en el análisis de suelo realizado antes de la siembra, una conductividad eléctrica de 1.05 dS/m, lo cual indica que se trata de un suelo muy ligeramente salino. Un PH de 7.56 se determinó que se trata de un suelo ligeramente alcalino. El porcentaje de materia orgánica igual a 1.49 por ciento considerado bajo y por ende una pobre concentración de nitrógeno total. Las concentraciones de potasio y fósforo disponible se pueden clasificar como medio y alto respectivamente. El contenido de material calcáreo ( $\text{CaCO}_3$ ) se considera en el rango bajo.

Para tener la caracterización del suelo en el modelo AquaCrop, se necesitan datos característicos del suelo como la textura, la capacidad de campo (CC), el punto de marchitez permanente (PMP), densidad aparente, saturación y conductividad hidráulica. Para obtener estos parámetros se utilizó el software “Soil Water Characteristics” recomendado por la FAO para determinar las variables ya explicadas.

**Tabla 7: Análisis de Suelo**

<b>Determinación</b>	<b>Agua</b>	<b>Unidades</b>
CE	1.05	(dS/m)
PH	7.56	
<b>ANALISIS</b>		
<b>MECANICO</b>		
Arena	55.84	%
Limo	33.00	%
Arcilla	11.16	%
Textura	Franco Arenosa	
Materia Orgánica	1.49	%
P	50.19	Ppm
K	242	Ppm
CaCO <sub>3</sub>	1.32	%
<b>Cationes Cambiables</b>		
CIC	13.91	Cmol(+)/kg
Ca <sup>++</sup>	12.18	Cmol(+)/kg
Mg <sup>++</sup>	1.35	Cmol(+)/kg
Na <sup>+</sup>	0.08	Cmol(+)/kg
K <sup>+</sup>	0.3	Cmol(+)/kg
Al <sup>+3</sup> +H <sup>+1</sup>	-	Cmol(+)/kg

FUENTE: Laboratorio de Agua, suelo, Medio Ambiente y Fertirriego. UNALM.

### c) **Riego**

Para determinar las láminas de riego a reponer se contó con un tanque evaporímetro de clase A, el cual permitió conocer la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET<sub>o</sub>), a través de la lectura obtenida multiplicándola por el factor de tanque. Según Doorembos & Pruitt (1977), depende de la cobertura del suelo donde se ubica el tanque, el viento y las condiciones generales de humedad.

$$ET_o = K_p * E$$

Donde:

ET<sub>o</sub>: Evapotranspiración del cultivo de referencia (mm/día)

K<sub>p</sub>: Coeficiente empírico de tanque

E: Evaporación libre de tanque clase A (mm/día)

Calculando la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>), se procedió a multiplicarlo por el coeficiente de cultivo (K<sub>c</sub>), factor que indica el grado de desarrollo del cultivo y que varía según la etapa fenológica en la que se encuentra. Siendo el producto la evaporación de cultivo (ET<sub>c</sub>)

$$ET_c = K_c * ET_o$$

Donde:

ET<sub>c</sub>: Evapotranspiración del cultivo (mm/día)

K<sub>c</sub>: Coeficiente del cultivo

ET<sub>o</sub>: Evapotranspiración del cultivo de referencia (mm/día)

El riego fue aplicado interdiario desde la siembra, hasta unos días antes de la cosecha y las láminas de riego que se emplearon fueron:

**Tratamiento testigo (T):** Se repuso una lámina de riego igual al 100 por ciento de los requerimientos hídricos del cultivo en cada una de las etapas vegetativas.

**Tratamiento deficitario (RP):** Se repuso una lámina de riego igual al 50 por ciento de los requerimientos hídricos del cultivo en las etapas de emergencia y maduración y el 100 por ciento de los requerimientos hídricos del cultivo en las etapas de tuberización y desarrollo

En la Tabla 8, se muestran los resultados del análisis del agua de riego, analizadas en el Laboratorio de Agua, Suelo, Medio Ambiente y Fertirriego de la Universidad Nacional Agraria La Molina, el cual arrojó que el agua de riego tiene una conductividad eléctrica de 0.66 Ds/m clasificándola como C2, es decir que presenta una salinidad moderada, lo cual indica que se trata de una buena calidad para los cultivos que toleran moderadamente la sal.

Por otro lado, el SAR (Relación de Absorción de Sodio) fue de 0.52 lo que indica que pertenece a la clasificación S1, es decir sin peligro de sodio, el pH o grado de acidez del agua es de 7.52, clasificándola como ligeramente neutra, en conclusión el agua del canal de riego de UNALM, corresponde al tipo C2-S1, lo que quiere decir que el agua es apta para cualquier tipo de suelo y cultivo encontrándose dentro de los valores máximos recomendables al igual que la dureza total del agua para fines de riego.

**Tabla 8: Análisis químico de agua**

<b>Determinación</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
CE	0.66	(dS/m)
PH	7.52	
Calcio	4.90	(meq/l)
Magnesio	0.83	(meq/l)
Sodio	0.89	(meq/l)
Potasio	0.05	(meq/l)
<b>SUMA DE CATIONES</b>	<b>6.67</b>	
Cloruro	1.13	(meq/l)
Sulfato	2.67	(meq/l)
Bicarbonato	2.83	(meq/l)
Nitratos	0.00	(meq/l)
Carbonatos	0.00	(meq/l)
<b>SUMA DE ANIONES</b>	<b>6.62</b>	
SAR	0.52	
<b>CLASIFICACION</b>	<b>C2-S1</b>	
Boro	0.57	ppm

FUENTE: Laboratorio de Agua, Suelo, Medio Ambiente y Fertirriego. UNALM.

## d) Cultivo

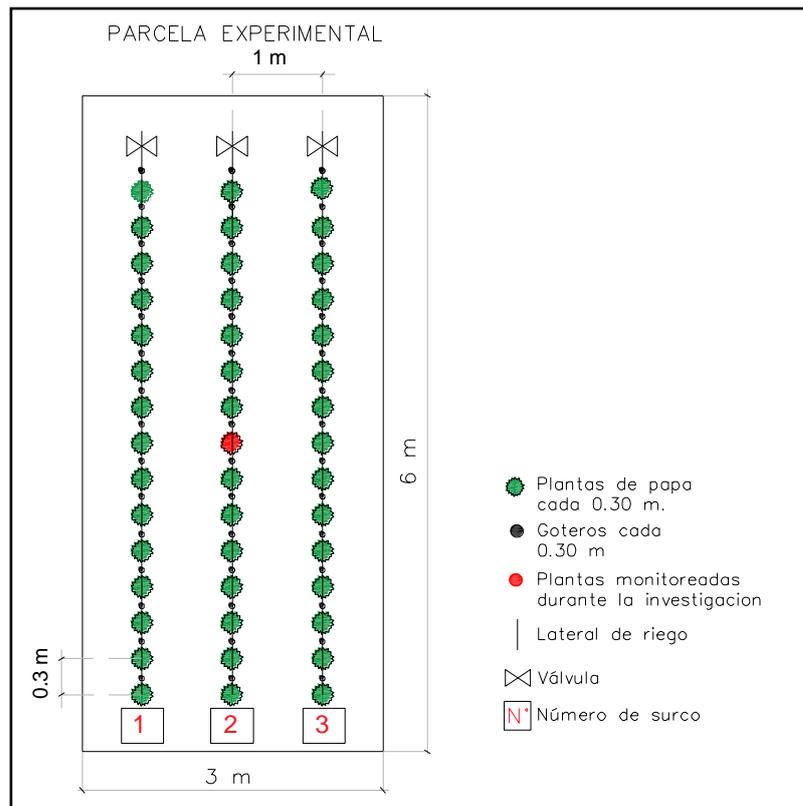
### d.1. Etapas fenológicas del cultivo

La siembra se realizó el 14 de junio del 2017, a partir de ello se diferenciaron las etapas vegetativas del cultivo de papa variedad UNICA tales como, emergencia, inicio de la tuberización, inicio del desarrollo, floración, máxima cobertura de dosel, inicio de la senescencia y maduración. La duración del cultivo fue de 109 días cosechándose el 30 de septiembre de 2017.

### d.2. Evaluación de la cobertura del Dosel

AquaCrop necesita información del desarrollo de la cobertura dosel (CC), para esto se realizaron 10 mediciones con 10 repeticiones para cada tratamiento, realizando el siguiente tratamiento para determinar la cobertura de dosel.

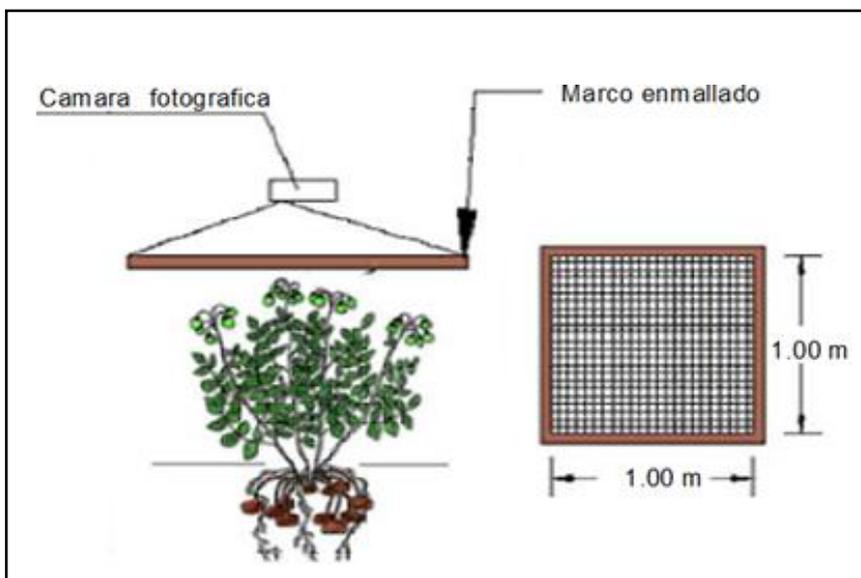
- Se identificó una planta en el centro de cada una de las 20 parcelas experimentales, y la cobertura de dosel fue monitoreada a través de fotos durante todo el ciclo vegetativo de la papa.



**Figura 27: Parcela experimental y plantas monitoreadas**

FUENTE: Elaboración propia

- Para la medición de la cobertura de dosel, se procedió a elaborar un marco de madera enmallado de 100 cm x 100 cm, el enmallado fue diseñado con cuadrículas de 5 cm x 5cm. Se colocó el marco horizontalmente sobre cada planta seleccionada, una vez colocado el marco se procedió a tomar una fotografía para guardarla en el registro.



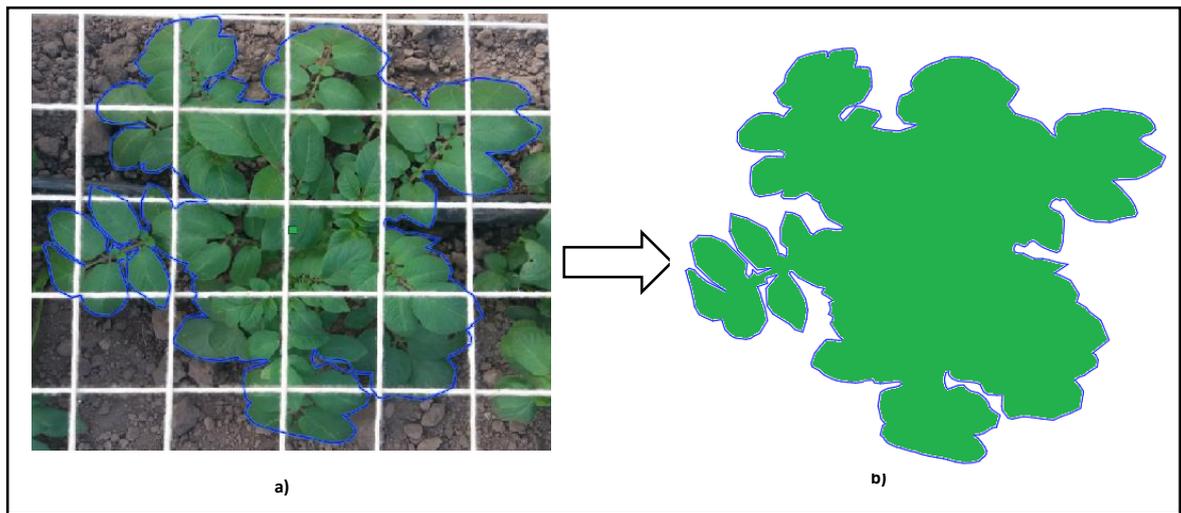
**Figura 28: Procedimiento para tomar la fotografía**

FUENTE: Ordoñez, 2016

El área verde cubierta por la planta fue determinada con el software AutoCAD donde se procedió a escalar las fotos tomadas durante el monitoreo, tomando como referencia las cuadrículas del marco enmallado. Una vez escalado se continuó a delimitar el perímetro de la cobertura de dosel de cada una de las fotos registradas.

- La determinación de la cobertura del dosel estuvo basada por la relación entre el área cubierta por las hojas y el área total de referencia (donde el área total de referencia fue el distanciamiento entre plantas (30 cm) y surcos (100 cm)).

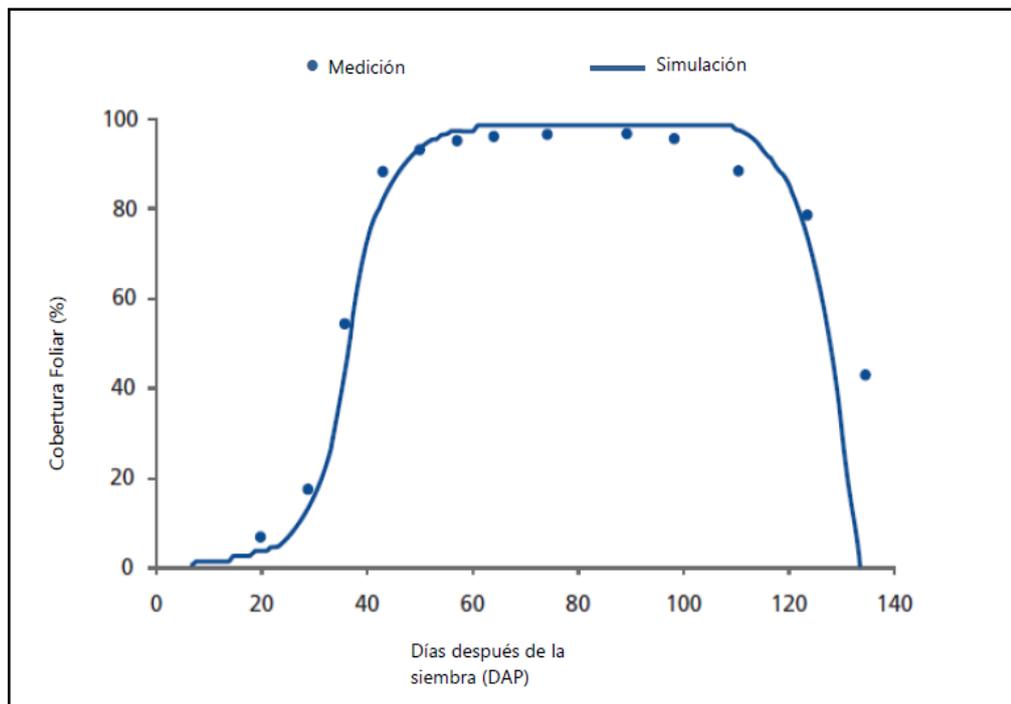
$$CC(\%) = \frac{\text{Área cubierta por las hojas}}{\text{Área de referencia}}$$



**Figura 29:** a) Escalado y delimitación del perímetro de la planta en AutoCAD, b) Área de la cobertura de dosel

FUENTE: Elaboración Propia

- Con los datos de cobertura de dosel de todo el periodo vegetativo se graficó la curva de desarrollo del dosel (CC), determinándose los valores de CCo, CCD, CDx y CDD.



**Figura 30: Cobertura del dosel simulado y observado**

Fuente: FAO

- Finalmente, la curva del dosel obtenida con los muestreos de campo será comparada con la curva del dosel simulada por el modelo agrometeorológico AquaCrop, en el proceso de calibración y validación.

### d.3. Evaluación de la biomasa total y rendimiento

Para obtener la información de biomasa seca por encima del nivel del suelo, se realizaron cinco muestreos con cinco repeticiones cada una, el primer muestreo se realizó a los 28 días después de la siembra (DDS), el segundo a los 42 (DDS), el tercero a los 60 (DDS), el cuarto a los 80 (DDS) y el quinto se realizó el día de la cosecha es decir a los 109 (DDS). El procedimiento consistió en la extracción de la planta separando la parte aérea y subterránea, ambas partes fueron picadas y llevadas al horno a una temperatura de 105 °C por 48 horas, obteniendo el peso de la materia seca, dato que nos pide el AquaCrop para calibrar el modelo.

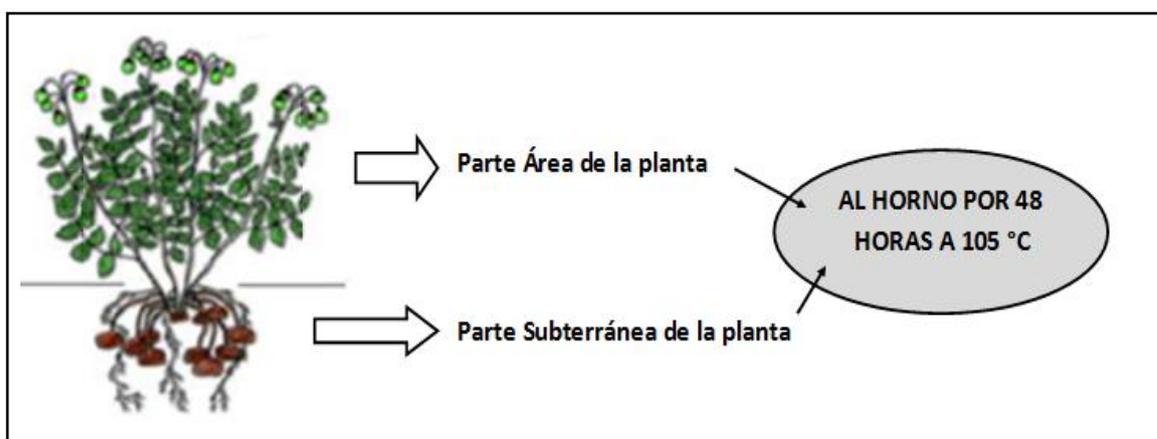


Figura 31: Procedimiento para la obtención de la materia seca

Fuente: Ordoñez, 2016

Las muestras para el monitoreo de la materia seca de tubérculos fueron los mismos días a aprovechando las plantas extraídas, cabe indicar que en el primer muestreo a los 28 (DDS), no se encontró tubérculos dado que aun ni iniciaba la tuberización.

El rendimiento proyectado resulto de la suma de los tubérculos producidos en cada planta, para ambos tratamientos. Por otro lado, el día de la cosecha se cogió una muestra representativa de tubérculos para enviar al laboratorio de análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes de la Facultad de Agronomía, a realizar el análisis foliar determinando para conocer los compuestos y el porcentaje de materia seca que contiene el tubérculo.

También se registraron las longitudes de la raíz de cada una de las plantas para lo cual se limpió y se estiró la raíz más larga para ser medida con una regla.

### 3.3.3 Calibración y validación del modelo AquaCrop

La calibración consistió en ajustar los parámetros del modelo AquaCrop, según las observaciones obtenidas en campo, según el tratamiento testigo, al cual se le aplicó una lámina de riego igual el 100 por ciento de las necesidades hídricas del cultivo. En primer lugar, se abordó la conformación de los archivos de entrada al modelo de cada uno de los módulos del modelo AquaCrop en donde se introdujeron las variables de clima (temperatura, velocidad del viento, radiación solar, precipitación y evapotranspiración), cultivo (CCo, CGC, CDC, CCx, HIo y WP), suelo (capacidad de campo, punto de marchitez, saturación y conductividad hidráulica) y riego (láminas aplicadas). La Tabla 9, muestra los parámetros calibrados en el módulo de cultivo y las variables contrastadas durante la calibración fueron la simulación de la cobertura de dosel (CC), biomasa (B) y rendimiento (Y).

**Tabla 9: Parámetros a calibrar en el modelo AquaCrop, para el cultivo de papa**

Cobertura del dosel del promedio de las plantas al 90 por ciento de emergencia (CCo)
Coeficiente de crecimiento del dosel (CGC), Coeficiente de disminución del dosel (CDC),
Cobertura máxima del dosel (CCx), Índice de cosecha de referencia (HIo)
Productividad del agua normalizada por ETo y CO2 (WP*)
Umbral superior de agotamiento de humedad del suelo para expansión del dosel (p upper)
Umbral inferior de agotamiento de humedad del suelo para expansión del dosel (P lower)
Forma de la curva de estrés de agotamiento de humedad del suelo para expansión del dosel (S)
Umbral superior de agotamiento de humedad del suelo para cierre estomático (P upper)
Forma de la curva de estrés de agotamiento de humedad del suelo para cierre estomático (S)
Umbral superior de agotamiento de humedad del suelo para senescencia temprana (p upper)
Forma de la curva de estrés de agotamiento de humedad del suelo para senescencia temprana (S)
Coeficiente de transpiración basal de la temporada media del cultivo (Kcb med)

FUENTE: Ordoñez, 2016

La validación del modelo consistió en simular el cultivo de papa en condiciones de déficit hídrico, para lo cual se cargó los datos de las láminas de riego aplicadas para el tratamiento

deficitario en el modelo calibrado, obteniendo como variables de respuesta el desarrollo de la cobertura de dosel del cultivo (CC), desarrollo de la materia seca total (MST) y el desarrollo de materia seca del tubérculo (MSt), para la posterior comparación entre los datos simulados y observados.

El análisis de sensibilidad del modelo tanto en la calibración y validación se midió en función a los indicadores estadísticos recomendados en el manual de AquaCrop, donde cada uno de ellos tiene fortalezas y debilidades, por lo cual se recomienda su uso conjunto con el fin de evaluar el desempeño del modelo. A continuación, se describen cada uno de los indicadores estadísticos utilizados.

**a) Coeficiente de correlación de Pearson (r)**

El coeficiente de correlación de Pearson (r), es un índice de dependencia lineal que mide el grado de relación existente entre las 2 variables (datos observados y datos simulados). Su valor varía en un rango de -1 a +1, en donde el valor +1 indica una correlación perfecta positiva (al crecer o decrecer X, crece o decrece Y), el valor -1 indica una correlación perfecta negativa (Al crecer o decrecer X, decrece o crece Y) y un valor igual a 0 indica que no existe relación entre las variables.

$$r = \frac{\sum XY}{\sqrt{(\sum X^2)(\sum Y^2)}}$$

Dónde r: coeficiente de correlación de Pearson; X: es la diferencia de la variable x observada y su media; Y: es la diferencia de la variable y observada y su media.

**b) Coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>)**

El coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>), es definido como el valor al cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson y nos refleja la bondad de ajuste de un modelo a la variable que se pretende explicar, también puede ser interpretado como la relación al cuadrado entre la covarianza y la desviación estándar multiplicada de las observaciones y las predicciones. El rango de valores que puede tomar R<sup>2</sup> se encuentra entre 0 y 1, cuanto más se acerque a la unidad indica una buena representación del modelo indicando una buena correlación (Moriasi et al. 2007).

La mayor desventaja de  $R^2$  es que únicamente la dispersión es calificada, lo que significa que un modelo que sistemáticamente sobreestime o subestime las observaciones puede tener aún un buen valor de  $R^2$  (Krause et al. 2005).

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - MO) (S_i - MS)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - MO)^2 \sum_{i=1}^n (S_i - MS)^2}} \right]^2$$

Dónde:  $R^2$ : coeficiente de determinación; n: número de observaciones; O: valores observados; S: valores simulados; MO: es el valor medio de los n valores observados; MS: valor medio de los n valores simulados

**c) Raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE)**

La RMSE, es uno de los indicadores estadísticos más ampliamente utilizados. Mide la magnitud promedio de las diferencias entre las estimaciones y las observaciones en las mismas unidades, aplicándose para evaluar el rendimiento del modelo. Su rango va de 0 al infinito positivo, si es cercano a 0 indica buen ajuste, pero si es mayor indicará un pobre ajuste del modelo. Sin embargo, no diferencia entre sobrestimaciones y subestimaciones (Jacovides & Kontoyiannis 1995).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n}}$$

Dónde: RMSE: raíz del error cuadrático medio; Si: valores simulados; valores observados; n: número de observaciones.

Según, Legates & McCabe, 1999 una desventaja que tiene este indicador es que “los errores residuales son calculados como valores cuadrados, lo cual hace que resultados de valores mayores, tengan un mayor peso comparado con valores bajos. Además, es bastante sensible a los valores extremos o atípicos”.

**d) Raíz cuadrada del error cuadrático medio normalizado (NRMSE)**

Para calcular la magnitud del desvío entre los valores simulados con los observados, se utilizó la raíz del error cuadrático medio normalizado con el valor medio de la variable observada, con el fin de tener una medida independiente de la variable o la magnitud de ésta.

$$NRMSE = \frac{RMSE}{O_{med}} * 100$$

Dónde: NRMSE: error medio cuadrático normalizado [%]; Omed: media de los datos observados; RMSE: error medio cuadrático [unidades de la variable analizada].

“Un NRMSE inferior al 10 por ciento puede ser considerado como excelente, bueno si se encuentra entre 10 y 20 por ciento, aceptable para un porcentaje entre 20 y 30 por ciento y mala si es mayor de un 30 por ciento” (Jacovides & Kontoyiannis 1995).

**e) Eficiencia de Nash – Sutcliffe (E)**

Determina la magnitud relativa de la varianza residual comparada a la varianza de las observaciones. Indica que tan bueno es el ajuste con los datos observados contra los simulados en la línea 1:1. Tiene un rango desde menos infinito a uno. Un 1 significa un ajuste perfecto, un 0 significa que las predicciones del modelo son tan exactas como el promedio de los datos observados y un negativo cuando la media de las observaciones es mejor que las predicciones del modelo (Nash & Sutcliffe 1970).

$$E = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - MO)^2} \right]$$

Dónde: E: Eficiencia de Nash – Sutcliffe; Si, Valores simulados o predecidos; Oi, Valores observados; y O, Promedio de los valores observados.

La eficiencia de Nash-Sutcliffe, es muy usado, pero, al igual que ocurre con el R<sup>2</sup>, este indicador no es muy sensible a las sobrestimaciones o subestimaciones del modelo. El criterio utilizado para este estadístico es que, en la calibración y la validación de los modelos, se obtengan valores de E superiores a 0 para las variables de estudio.

**Tabla 10: Eficiencia de la modelación según el índice de Nash-Sutcliffe (E)**

Eficiencia de Nash Sutcliffe (E)	Ajuste
Menor a 0.2	insuficiente
0.2-0.4	Satisfactorio
0.4-0.6	Bueno
0.6-0.8	Muy bueno
Mayo a 0.8	Excelente

FUENTE: Molnar, 2016

**d) Índice de ajuste de Willmott (d)**

Este estadístico representa la relación entre el error cuadrático medio y el error potencial. El rango de este estadístico se encuentra entre 0 y 1, donde 0 indica que no se tiene ajuste alguno y 1 indica un ajuste perfecto entre los datos observados y los predichos por el modelo (Willmott 1982).

$$E = 1 - \frac{\sum(S_i - O_i)^2}{\sum(|S_i - MO| + |O_i - MO|)^2}$$

Dónde: d: índice de willmott; Si: valores simulados; Oi: valores observados; Si: valores simulados y MO: valor medio de los n valores observados.

“La desventaja que ofrece este estadístico es que se pueden obtener valores relativamente altos (sobre 0,65) incluso cuando la robustez del modelo es pobre. Así mismo, d no es muy sensible a las sobrestimaciones o subestimaciones sistemáticas” (Krause et al. 2005). En este sentido, el criterio establecido es de obtener valores superiores a 0,65 en la calibración y validación de los modelos.

### 3.3.4 Cuantificación de la huella hídrica azul, verde y gris

#### a) Huella hídrica azul y verde

La huella hídrica de los cultivos se define, como el nivel de consumo de agua en el proceso de producción de la biomasa, y varía en función de muchos aspectos tales como la variedad, las técnicas de riego, el tipo de suelo, la disponibilidad de agua y el clima (Pfister & Bayer 2014).

El cálculo de la huella hídrica (verde y azul) del cultivo, se basó en el requerimiento hídrico del mismo, el cual se estimó en base a la evapotranspiración (verde y azul) acumulada durante el crecimiento del cultivo, el cual se obtiene a partir del modelo AquaCrop, utilizando el enfoque del balance hídrico en el suelo para la condición óptima y deficitaria.

Al completar los datos de entrada del modelo AquaCrop, se puede estimar el rendimiento y la evapotranspiración ajustada ( $k_a$ ), esta última pudiendo ser menor que la evapotranspiración de cultivo ( $k_c$ ) debido a que este puede ser influenciado por diferentes factores de estrés.

$$ET_a = K_s * ET_c$$

Dónde:  $ET_a$  = Evapotranspiración ajustada del cultivo;  $K_s$ =coeficiente de estrés;  $ET_c$ = evapotranspiración de cultivo.

Cabe mencionar que en una agricultura en seco la evapotranspiración de agua azul es cero y la evapotranspiración verde es igual a la evapotranspiración total simulada por el modelo. En el caso que se realice prácticas de riego, la evapotranspiración azul es igual al riego total como se especifica en la salida del modelo y la evapotranspiración verde es igual a la evapotranspiración total menos la evapotranspiración azul.

Dado que los valores de evapotranspiración verde y azul están en milímetros (mm) deben convertirse en  $m^3/ha$  multiplicado por el factor 10 y al dividirlo entre el rendimiento la huella hídrica puede ser determinado.

$$HH_{verde} \left( \frac{m^3}{tn} \right) = \frac{ET_{verde}}{Y}$$

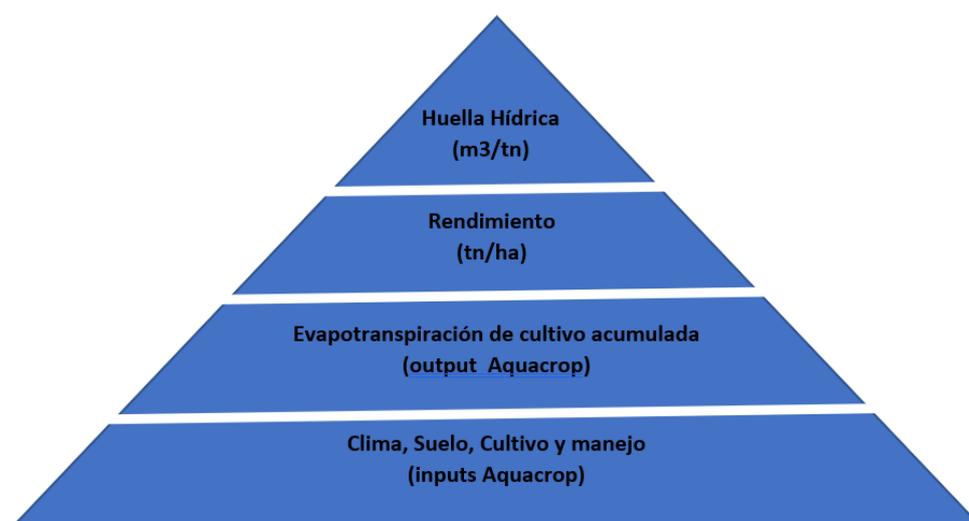
$$HH_{azul} \left( \frac{m^3}{tn} \right) = \frac{ET_{azul}}{Y}$$

Dado que estos cálculos se refieren a la evapotranspiración del campo, el agua que ha sido incorporado en el cultivo aún no se ha contabilizado, esta agua es parte de la huella hídrica verde y azul, pero no influye en el rendimiento. El porcentaje de materia seca en una muestra de tubérculos para el tratamiento testigo resulto 21 por ciento y para el tratamiento deficitario 22 por ciento de materia seca, por lo que la fracción de agua en el tubérculo de papa según el análisis realizado se encuentra entre el 79 y 78 por ciento para el tratamiento testigo y deficitario respectivamente.

En otras palabras, el modelo AquaCrop puede estimar la huella hídrica a partir de la productividad hídrica, el cual se define como la cantidad de agua por unidad de biomasa producida. Es decir que estrictamente es el inverso de la productividad hídrica.

$$WF = \frac{1}{WP}$$

Dónde: WF: Huella hídrica [mm. Kg-1]. WP: productividad hídrica [Kg] de biomasa por [mm-1] de transpiración de agua. La huella hídrica, sin embargo, suele presentarse en unidades de litros de agua por unidad de biomasa o producto, [L. Kg-1].



**Figura 32: Síntesis conceptual de la modelación**

FUENTE: Elaboración propia

## b) Huella hídrica gris

El concepto de huella hídrica gris ha crecido a partir del reconocimiento de que la medida de la contaminación del agua se puede expresar en términos del volumen de agua que se requiere para diluir los contaminantes de tal manera que se conviertan en inofensivos. Definiéndose como el volumen de agua dulce que se requiere para asimilar la carga de contaminantes aplicados al suelo, comparado con las concentraciones naturales y las normas de calidad de agua.

La causa más generalizada e importante del deterioro de la calidad del agua subterránea como consecuencia de la acción humana es la de las prácticas agrícolas, el cual realiza una contaminación difusa. Los contaminantes potenciales más significativos en la actividad agrícola son los fertilizantes y los pesticidas. Los fertilizantes, especialmente los compuestos nitrogenados, son los nutrientes más importantes desde el punto de vista de la contaminación de las aguas subterráneas debido a la movilidad de los nitratos. Generalmente se aplican en forma de estiércol o urea  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$  o, en forma inorgánica, como amoníaco  $(\text{NH}_4\text{OH})$ , sulfato amónico  $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$ , nitrato amónico  $(\text{NH}_4\text{NO}_3)$ , carbonato amónico  $[(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3]$ , etc.

Cuando se aplica un producto químico en el terreno, como es el caso del uso de fertilizantes o plaguicidas, la carga contaminante (L) es una fracción de la cantidad aplicada en el suelo la que se denomina fracción de lixiviación ( $\alpha$ ).

$$\text{HH}_{\text{GRIS}} = \frac{L}{Y * (C_{\text{max}} - C_{\text{nat}})} = \frac{\alpha * \text{Appl}}{Y * (C_{\text{max}} - C_{\text{nat}})} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{tn}} \right)$$

$\text{HH}_{\text{GRIS}}$  : Huella hídrica gris ( $\text{m}^3/\text{toneladas}$ )

L : Carga de contaminantes (masa/área)

$\alpha$  : Fracción de lixiviación (%)

Appl : Aplicación de productos (kg/ha)

Y : Rendimiento (toneladas/ha)

$C_{\text{MAX}}$  : Concentración máxima permitida del contaminante ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$C_{\text{NAT}}$  : Concentración natural permitida del contaminante ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), refiriéndose a la concentración en el cuerpo de agua que podría ocurrir sin intervención humana.

Al no existir datos disponibles para la determinación de la fracción de lixiviación dado que se tiene que trabajar con datos experimentales de campo, se asume un valor igual al 10 por ciento de la tasa de fertilización como lo recomienda (Franke et al. 2013). Así mismo la concentración máxima permitida de un contaminante ( $C_{MAX}$ ), en un cuerpo de agua, es tomada según los Estándares de Calidad de Agua (ECA), que establece los niveles de concentración de elementos o sustancias presentes en el ambiente que no presentan riesgos para la salud y concentración natural. Y el rendimiento tomado en cuenta es el obtenido de la simulación con el modelo AquaCrop para ambos tratamientos (testigo y deficitario).

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 4.1 Caracterización del clima, cultivo, riego y suelo

#### 4.1.1 Clima

En la Figura 33, se observan las características climáticas en el periodo de investigación (14 de junio del 2017 al 30 de septiembre de 2017). En donde las variables registradas por la estación meteorológica fueron la precipitación (mm), temperatura máxima (°C), temperatura mínima (°C), humedad relativa (%), radiación solar (KJoules/m<sup>2</sup>) y velocidad del viento (m/s). La evapotranspiración se estimó con la ecuación de Penman – Monteith.

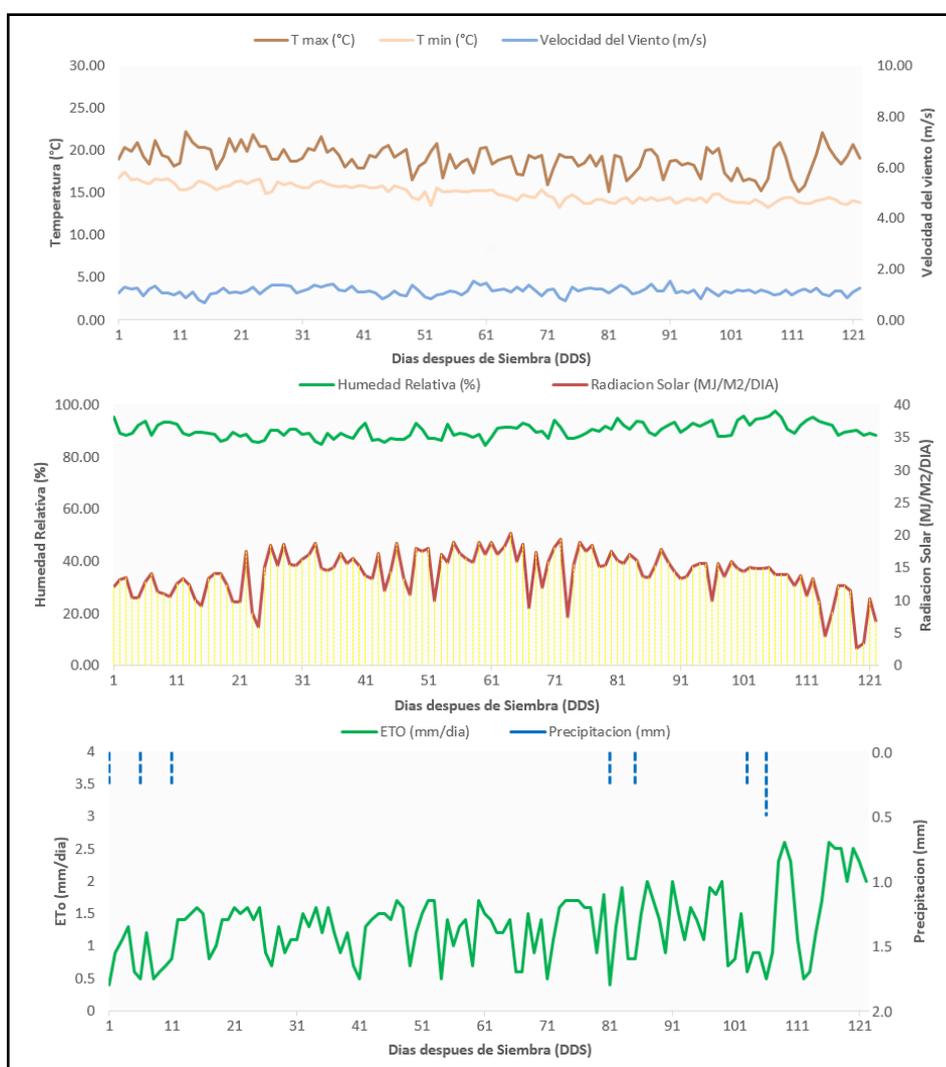
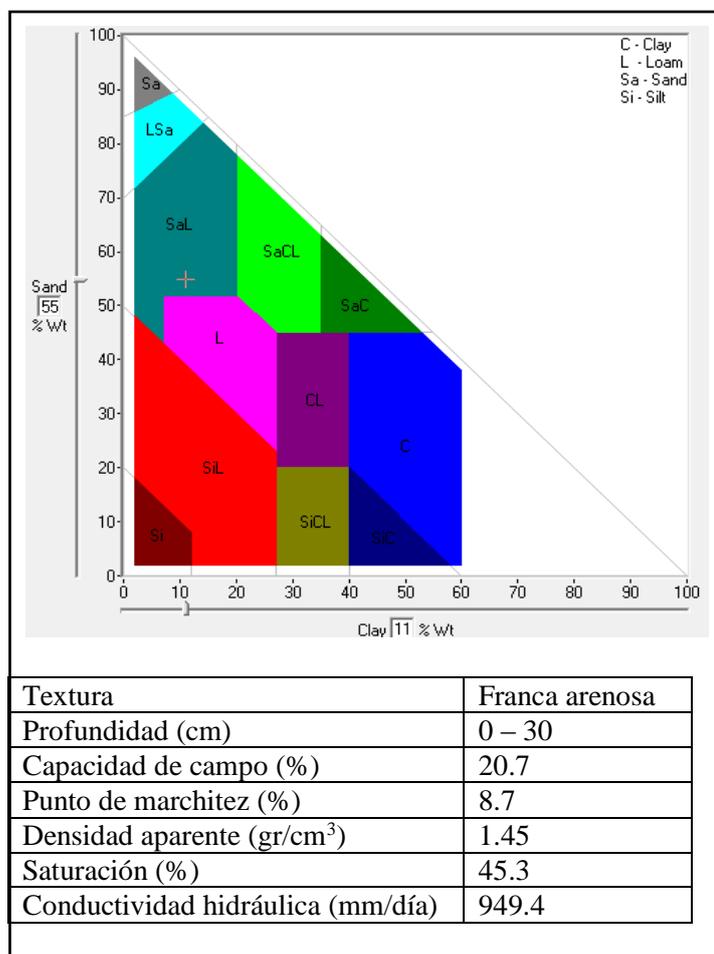


Figura 33: Variabilidad diaria de las variables climáticas durante el periodo de investigación

FUENTE: Elaboración propia

### 4.1.2 Suelo

El suelo presento una textura franca arenosa (arena=55.84 por ciento, limo=33.00 por ciento, arcilla=11.16 por ciento), una capacidad de campo de 20.7 por ciento, punto de marchitez permanente de 8.7 por ciento y densidad aparente de 1.45 gr/cm<sup>3</sup>. Estas características fueron determinadas a partir del análisis de suelo realizado durante la investigación y haciendo uso del software Soil Water Characteristics.



**Figura 34: Características del suelo requeridas por el AquaCrop**

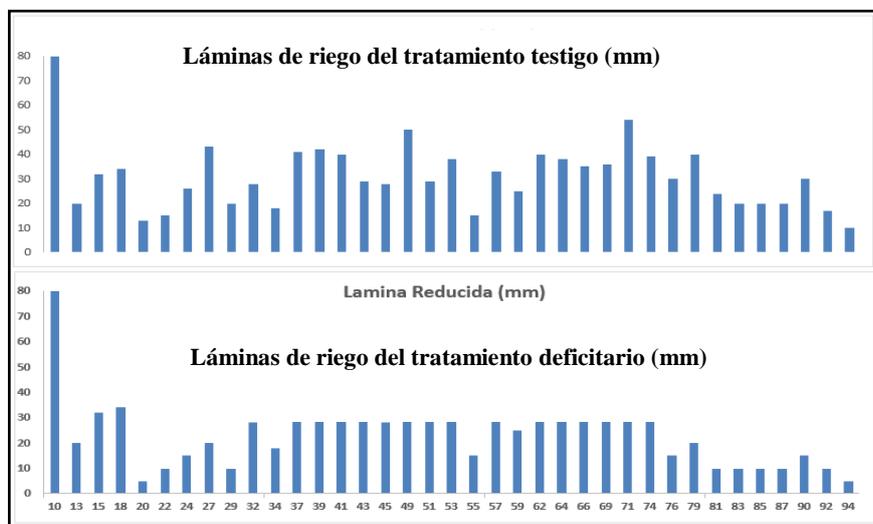
FUENTE: Elaboración propia

### 4.1.3 Riego

Los riegos aplicados fueron de manera simultánea para cada uno de los tratamientos. La Figura 35, presenta los 23 riegos uniformes para cada tratamiento durante la fase no experimental y 14 riegos diferenciados aplicados en la emergencia y maduración del cultivo. En total se aplicaron 37 riegos por tratamiento durante la campaña (ver Anexo 7).

Tratamiento testigo (T): Se aplicó una lámina de riego igual a 117 mm y se aseguró el 100 por ciento de los requerimientos hídricos del cultivo.

Tratamiento deficitario (RP): Se aplicó una lámina de riego igual a 101 mm debido a que fue un riego deficitario aplicando el riego parcial en zona de raíces, aplicando el 50 por ciento de los requerimientos hídricos del cultivo en las etapas de emergencia y madurez.



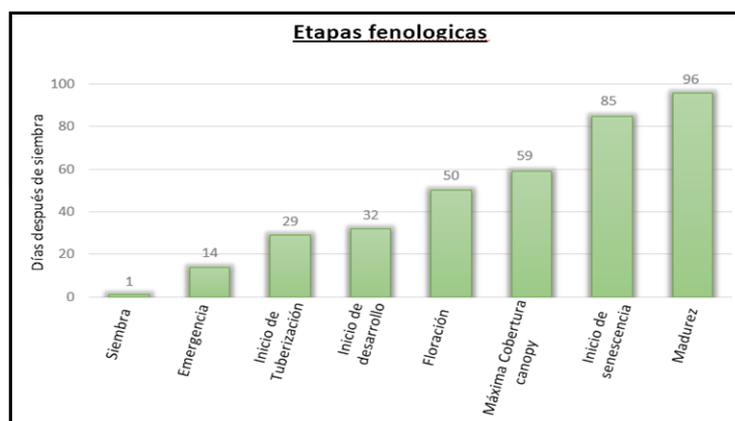
**Figura 35: Eventos de riego durante el periodo vegetativo del cultivo**

Fuente: Elaboración propia

#### 4.1.4 Cultivo

##### a) Fases del cultivo

En la Figura 36, se muestra las etapas del cultivo a lo largo del periodo vegetativo (emergencia, tuberización, desarrollo y madurez), cuya duración fue de 109 días, así mismo se indica las fechas en las cuales se llevaron a cabo.



**Figura 36: Etapas del cultivo a lo largo del periodo**

Fuente: Elaboración propia

**b) Evaluación de la cobertura de dosel**

En la Tabla 11, se presentan los porcentajes promedio de cobertura del dosel obtenidos de 10 fechas de muestreo con 10 repeticiones por fecha, observándose que el tratamiento testigo alcanzó mayores valores de cobertura del dosel, esto debido a que el suministro de agua fue adecuado y no generó estrés hídrico en la planta.

**Tabla 11: Cobertura de dosel promedio según la lámina de riego aplicada**

Día de Medición	Cobertura de Dosel (%)		
	DDS	Tratamiento Testigo	Tratamiento deficitario
13		0.7	0.6
18		3.9	3.6
29		21.8	18.3
34		31.7	26.8
43		60.6	56.1
46		69.4	66.0
52		81.6	79.2
59		91.0	83.3
74		83.6	81.4
95		72.1	76.4

DDS: Días después de siembra

FUENTE: Elaboración propia

**c) Evaluación de la biomasa total y del rendimiento producido**

Para la evaluación de la materia seca total se realizaron 5 muestreos con 5 repeticiones y para la evaluación del rendimiento se realizó 4 muestreos con 5 repeticiones. La Tabla 12, recoge los datos promedio de materia seca total (MST) y materia seca de tubérculos (MSt), determinando los índices de cosecha (HI), para cada tratamiento durante la experimentación.

**Tabla 12: Datos de materia seca total (MST), materia seca de tubérculos (MSt) e índice de cosecha (HI)**

Tratamiento	DDS	MST (Ton/ha)	MSt (Ton/ha)	HI
Tratamiento testigo	28	0.4	-	-
	42	1.8	0.1	0.03
	60	4.3	0.9	0.20
	80	12.4	5.2	0.42
	108	15.3	11.7	0.76
Tratamiento deficitario	28	0.4	-	-
	42	1.6	0.1	0.03
	60	3.9	0.8	0.21
	80	11.9	5.0	0.42
	108	14.4	11.5	0.80

DDS: Días después de siembra

FUENTE: Elaboración propia

#### 4.2 Modelamiento del cultivo de papa variedad UNICA con el modelo AquaCrop

Para modelar el cultivo de papa variedad UNICA en el modelo AquaCrop, se cargaron los datos recolectados durante la etapa de investigación en cada uno de los módulos del programa (clima, cultivo, suelo y manejo). Cabe mencionar que para el módulo de cultivo se tomó como referencia los parámetros establecidos por la FAO para el cultivo de papa y a partir de estos se calibraron de tal forma que se asemeje a los datos obtenidos en campo. Entre los parámetros tomados en cuenta están el coeficiente de crecimiento (CGC), el coeficiente de disminución de dosel (CDC), la productividad del agua (WP), el índice de cosecha de referencia (HI). Las variables indicadas tienen un efecto directo sobre la evolución del grado de cobertura (CC), Materia Seca Total (MST) y Materia Seca de tubérculos (MSt), como se presenta en la siguiente Tabla.

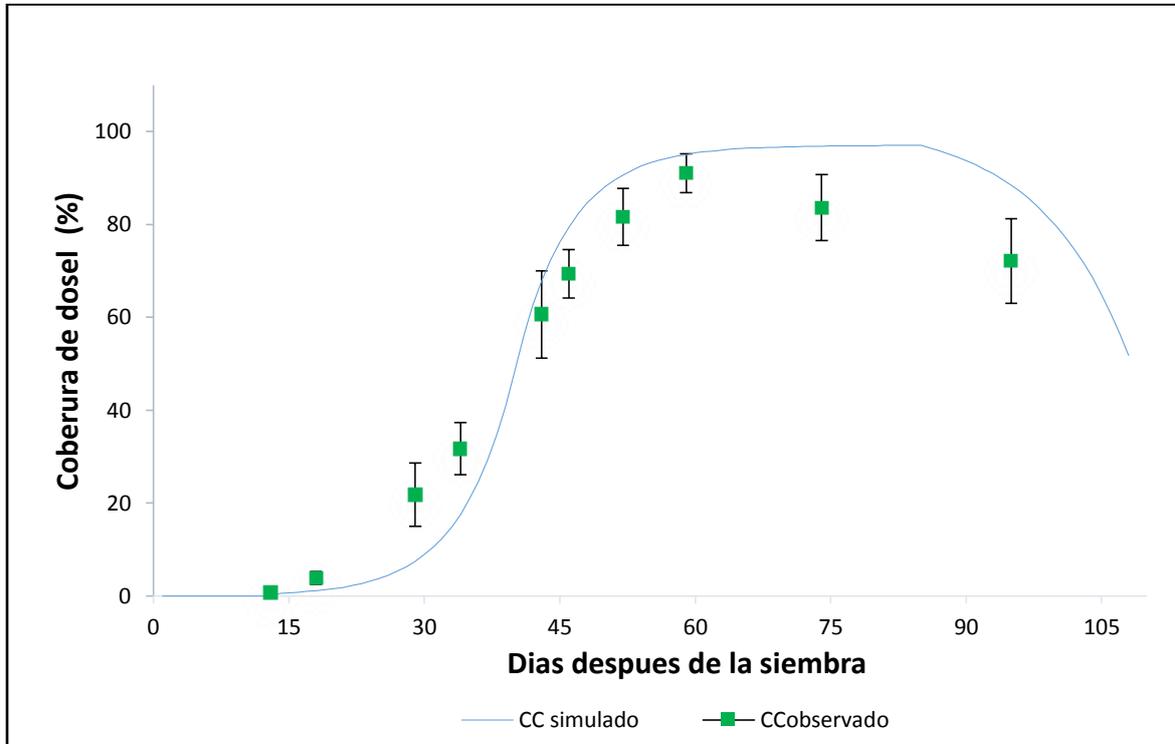
**Tabla 13: Parámetros calibrados del modelo AquaCrop para el cultivo de papa variedad UNICA en la estación de invierno.**

Descripción	Valor		Unidad
	FAO	Calibración	
Cobertura del dosel del promedio de las plantas al 90% de emergencia (CCo)	0.6	0.5	% dia-1
Coeficiente de crecimiento del dosel (CGC)	18.6	16.9	%
Coeficiente de disminución del dosel (CDC)	1.9	9.9	%
Cobertura máxima del dosel (CCx)	98	91	%
Índice de cosecha de referencia (HIo)	75	90	%
Productividad del agua normalizada por ETo y CO2 (WP*)	18	20	g/m2
Umbral superior de agotamiento de humedad del suelo para expansión del dosel (p upper)	0.2	0.2	-
Umbral inferior de agotamiento de humedad del suelo para expansión del dosel (p lower)	0.6	0.6	-
Forma de la curva de estrés de agotamiento de humedad del suelo para expansión del dosel (S)	3	3	-
Umbral superior de agotamiento de humedad del suelo para cierre estomático (p upper)	0.55	0.45	-
Forma de la curva de estrés de agotamiento de humedad del suelo para cierre estomático (S)	3	3	-
Umbral superior de agotamiento de humedad del suelo para senescencia temprana (p upper)	0.7	0.85	-
Forma de la curva de estrés de agotamiento de humedad del suelo para senescencia temprana (S)	3	3	-
Coeficiente de transpiración basal de la temporada media del cultivo (Kcb med)	1.1	1.13	-

FUENTE: Elaboración propia

#### 4.2.1 Calibración y validación de la Cobertura de dosel del cultivo de papa

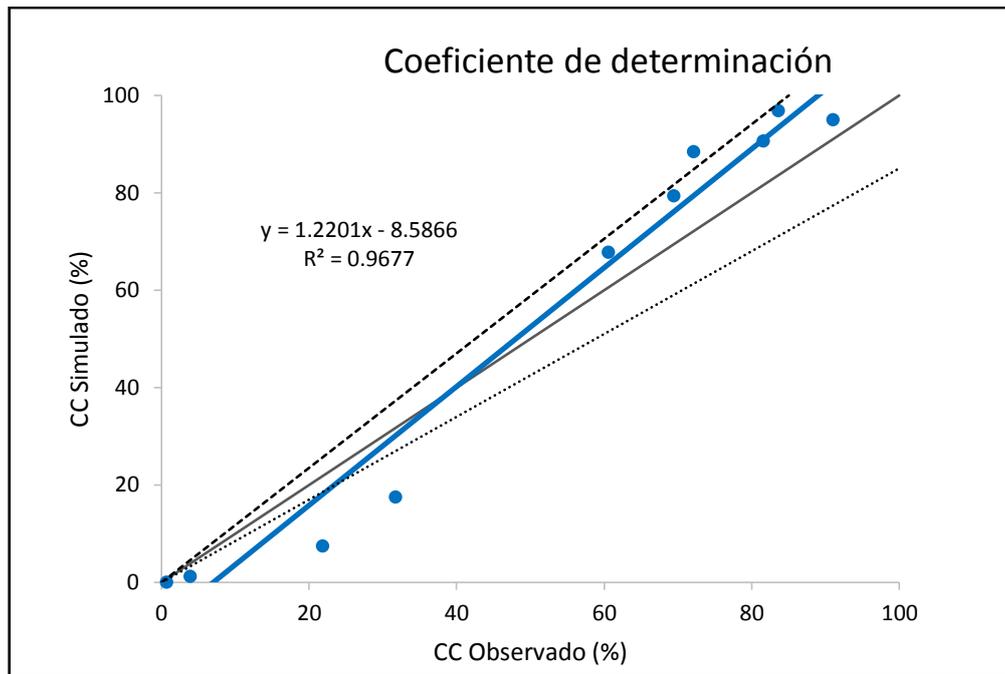
La calibración adecuada de la cobertura de dosel (CC), nos asegura una buena aproximación en la estimación de la biomasa y el rendimiento del cultivo. Para la calibración del modelo se tomó en cuenta los datos recogidos en campo del tratamiento testigo (T), dado que se le aplicó una lámina de riego igual al 100% del requerimiento hídrico. La figura 37, presenta la evolución de la cobertura de dosel (CC) simulado y observado del cultivo de papa, aplicando una lámina de riego igual al 100 por ciento de la ETo.



**Figura 37: Evolución del grado de cobertura de dosel del cultivo de papa, aplicándole una lámina de riego igual al 100 por ciento de la ETo.**

FUENTE: Elaboración propia

La cobertura de dosel observado tiene un buen ajuste con la cobertura de dosel simulada, cuyos coeficientes CGC y CDC fueron de 16.9 y 9.9 por ciento  $d^{-1}$  respectivamente. La Figura 38, muestra que existe un alto coeficiente de determinación ( $R^2 = 0.96$ ) entre los datos promedios observados y simulados, mostrándose que el modelo no es capaz de modelar las observaciones adecuadamente para coberturas menores de 40 por ciento debido que los puntos observados se encuentran fuera del intervalo del  $\pm 15$  por ciento respecto al 1:1.



**Figura 38: Grado de cobertura promedio simulado vs simulado del tratamiento testigo**

FUENTE: Elaboración propia

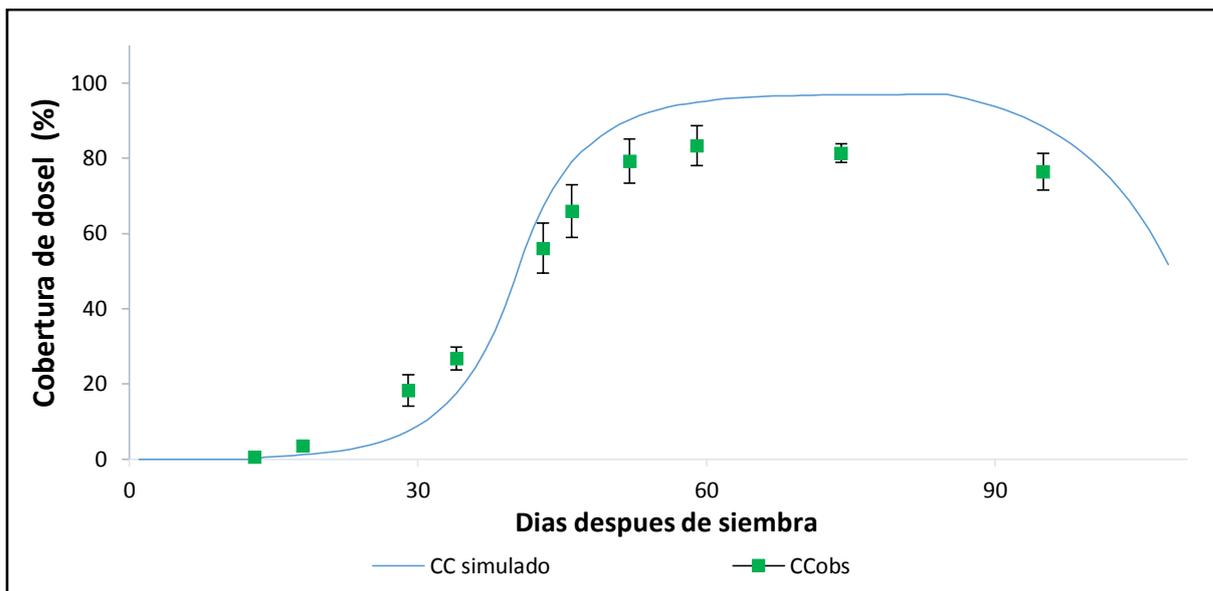
Los estadísticos aplicados sobre la cobertura de dosel (CC) obtenidos consideran la simulación como excelente y con alta bondad de ajuste, se muestran a continuación:

**Tabla 14: Indicadores estadísticos de la evolución de la cobertura de dosel en el cultivo de papa con AquaCrop, aplicando una lámina normal**

Indicador estadístico	Valor
Numero de repeticiones (n)	10.00
coeficiente de correlación de Pearson (r)	0.98
raíz del error cuadrático medio (RMSE)	10.50
raíz del error cuadrático medio normalizado (NRMSE)	20.30
eficiencia del modelo (EF)	0.89
Índice de Wilmot	0.98

FUENTE: Elaboración propia

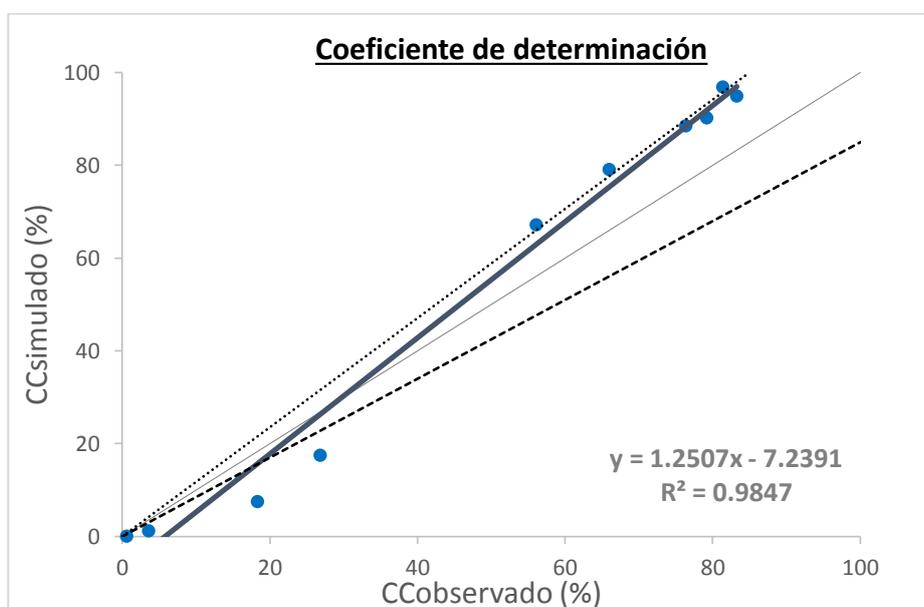
Para la validación del modelo se tomó en cuenta los datos del tratamiento deficitario (RP), al cual se le sometió a déficit hídrico en las etapas de emergencia y madurez. La Figura 39, presenta la evolución de la cobertura de dosel observado y cobertura de dosel simulado para un riego deficitario, observándose que el modelo para coberturas de dosel menores al 40 por ciento subestima los datos observados y para valores de CC mayores al 40 por ciento el modelo sobrestima los datos observados.



**Figura 39: Evolución del grado de cobertura de dosel del cultivo de papa, aplicándole una lámina de riego deficitaria.**

FUENTE: Elaboración propia

El coeficiente de determinación ( $R^2 = 0.98$ ) entre los datos promedios observados y simulados con un riego deficitario, muestra que el modelo no es capaz de modelar las observaciones adecuadamente para coberturas menores de 70 por ciento debido que los puntos observados se encuentran fuera del intervalo del 15 por ciento. Por otro lado, análisis de sensibilidad del modelo muestra índices estadísticos que consideran la simulación como excelente y con alta bondad de ajuste.



**Figura 40: Grado de cobertura promedio simulado vs observado del tratamiento testigo**

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 15: Indicadores estadísticos de la evolución de la cobertura de dosel en el cultivo de papa con AquaCrop, aplicando una lámina reducida**

<b>Indicador estadístico</b>	<b>Valor</b>
Numero de repeticiones (n)	10.00
coeficiente de correlación de Pearson (r)	0.99
raíz del error cuadrático medio (RMSE)	10.8
raíz del error cuadrático medio normalizado (NRMSE)	22.0
eficiencia del modelo (EF)	0.88
Índice de Wilmot	0.98

FUENTE: Elaboración propia

Se puede observar que en general, la cobertura de dosel medido en campo no mostro diferencia significativas entre ambos tratamientos (T y RP), debido a la alta variabilidad de los datos que se tienen en las repeticiones. Como se recoge en la Tabla 15, no existen diferencias significativas salvo a los 34 y 59 días después de siembra.

**Tabla 16: Análisis estadístico de la evolución del grado de cobertura (%) observando en el cultivo de papa**

<b>DDS</b>	<b>13</b>	<b>18</b>	<b>29</b>	<b>34</b>	<b>43</b>	<b>46</b>	<b>52</b>	<b>59</b>	<b>74</b>	<b>95</b>
<b>Testigo</b>	0.71	3.87	21.75	31.70	60.59	69.40	81.55	91.04	83.64	72.10
<b>Deficitario</b>	0.64	3.64	18.31	26.85	56.05	66.03	79.23	83.29	81.44	76.40
<b>P valor</b>	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	*	ns	ns

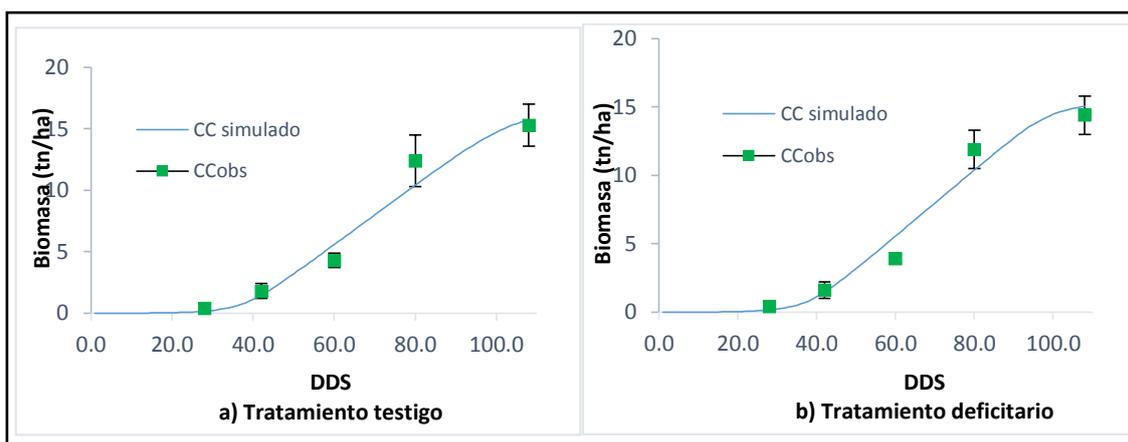
DDS: Días después de siembra; ns: no significativo; \*:  $0,01 < p < 0,05$ ; \*\*:  $p < 0,01$

FUENTE: Elaboración propia

#### **4.2.2 Calibración y validación de la materia seca total**

Para la determinación de la materia seca total (MST) a lo largo del ciclo del cultivo, el modelo utiliza entre otras variables la productividad de agua (WP) al cual se le asignó un valor de  $20 \text{ g/m}^2$  el cual se encuentra dentro del rango considerado para cultivos C3 (baja transpiración).

La Figura 41, muestra la evolución de la materia seca total en el periodo de investigación, comparándose con los datos medidos en campo (observados) con los datos simulados de la materia seca total (MST) por el modelo AquaCrop.



**Figura 41: Evolución de la materia seca total (MST) promedio del cultivo de papa.**

DDS: Días después de siembra

FUENTE: Elaboración propia

En la simulación de la materia seca total (MST), se obtuvo un buen ajuste entre los datos observados y simulados resultando un coeficiente de determinación ( $R^2 > 0.96$ ), con pendientes cercanas a uno. En general, el error cuadrático medio de los tratamientos fue bajo (<10.5 por ciento), con buena capacidad del modelo para simular la MST (10-20 por ciento el NRMSE), la eficiencia del modelo fue de 0.89 y 0.97 para el tratamiento testigo y deficitario respectivamente.

**Tabla 17: Indicadores estadísticos de la evolución de la materia seca total (MST)**

Indicador estadístico	Valor	
	Tratamiento testigo	Tratamiento deficitario
Numero de repeticiones (n)	5	10.00
coeficiente de correlación de Pearson (r)	0.98	0.98
raíz del error cuadrático medio (RMSE)	1.1	1.1
raíz del error cuadrático medio normalizado (NRMSE)	15.9	17.7
eficiencia del modelo (EF)	0.97	0.96
Índice de Wilmot	0.99	0.99

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 18: Análisis estadístico materia seca total (t/ha) observado en el cultivo de papa**

DDS	13	18	29	34	43
<b>Testigo</b>	0.71	3.87	21.75	31.70	60.59
<b>Deficitario</b>	0.64	3.64	18.31	26.85	56.05
<b>P valor</b>	ns	ns	ns	ns	ns

DDS: Días después de siembra; ns: no significativo

FUENTE: Elaboración propia

### 4.2.3 Calibración y validación de la biomasa seca de tubérculo (rendimiento)

La materia seca de tubérculos (MSt), es determinada diariamente por el modelo, multiplicando la materia seca total (MST) por el índice de cosecha de referencia (HIo) al cual se asignó un valor de 0.9 en el proceso de calibración.

La Tabla 19, muestra los rendimientos obtenidos en campo el día de la cosecha (30 de septiembre del 2017) según el tratamiento realizado. En dicha Tabla, se puede observar que existe diferencia significativa entre los rendimientos de las parcelas regadas con lámina normal y lamina reducida. Para la comparación con los rendimientos simulados en el modelo AquaCrop, los rendimientos evaluados en campo debieron ser llevados a una humedad de 0 por ciento o al peso seco, debido a que el modelo simula los rendimientos en esta condición de humedad.

**Tabla 19: Rendimiento (t/ha) obtenido en la cosecha**

Tratamiento	Rendimiento (Tn/ha)	Rendimiento promedio (Tn/ha)	Porcentaje de materia seca (%)	Materia seca de tuberculo (tn/ha)	Materia seca de tuberculo Simulado (tn/ha)	Diferencia Absoluta
Lamina normal	62.6	65.03	21.11%	13.73	13.85	0.12
	70.2					
	66.2					
	64.7					
	60.5					
	67.9					
	69.7					
	61.7					
	60.5					
	66.1					
Lamina reducida	60.9	60.74	22.08%	13.41	13.13	0.28
	57.2					
	62.4					
	64.3					
	59.8					
	57.1					
	58.2					
	62.1					
	60.5					
	64.8					

FUENTE: Elaboración propia

Según Steduto, et al. (2012), los déficits hídricos en el cultivo de papa de la mitad y hacia el final del período de crecimiento suelen reducir el rendimiento menos que en la primera parte. Las parcelas sometidas a tratamiento deficitario generaron estrés hídrico por cierre estomático en la segunda mitad de desarrollo vegetativo, lo cual no afectó significativamente en el desarrollo de la cobertura de dosel y materia seca total, pero sí se mostró una diferencia significativa en el rendimiento.

### 4.3 Determinación de la huella hídrica azul, verde y gris

#### 4.3.1 Huella hídrica azul y verde

La Tabla 20, se muestra el resumen de los principales resultados del modelo AquaCrop para la determinación de la huella hídrica, siguiendo lo planteado en el ítem 3.3.4, la huella hídrica verde y azul arrojado por el modelo se expresan en milímetros y para la transformación en metros cúbicos por hectárea se siguió a multiplicarlo por 10. Y teniendo en cuenta que la precipitación efectiva en la costa es insignificante se considera la huella hídrica verde es cero.

**Tabla 20: Huella hídrica verde y azul del cultivo de papa (m<sup>3</sup>/ha), para el tratamiento testigo (T) y deficitario (RP).**

	Pp (mm)	Irri (mm)	ET verde (mm)	ET azul (mm)	Eta (mm)	ET verde (m <sup>3</sup> /ha)	ET azul (m <sup>3</sup> /ha)	ET total (m <sup>3</sup> /ha)	Y (t/ha)	HH verde (m <sup>3</sup> /tn)	HH azul (m <sup>3</sup> /tn)	HH total (m <sup>3</sup> /tn)	WP (kg/m <sup>3</sup> )
<b>T</b>	0	117	0	117	117.3	0	1170	1173	13.85	0.00	84.51	84.72	11.81
<b>RP</b>	0	101	0	101	115.5	0	1010	1155	13.70	0.00	73.75	84.34	11.86

FUENTE: Elaboración propia

Como se mencionó anteriormente, el tubérculo de papa tiene un contenido de agua de 78 y 79 por ciento, que es parte del agua verde y azul que se ha incorporado al cultivo. En base a esto la huella hídrica de papa es 0.78 m<sup>3</sup>/tn para el tratamiento testigo y 0.79 m<sup>3</sup>/tn para el tratamiento deficitario, siendo estos valores menos del 1 por ciento de la huella hídrica relacionada con el agua transpirada.

#### 4.3.2 Huella hídrica gris

Aunque la huella hídrica gris se puede entender como un "requerimiento" de dilución de agua, se ha preferido no utilizar este término, ya que causa confusión y se entiende como una necesidad de diluir contaminantes en lugar de reducir sus emisiones. Esto no es, por supuesto, el significado del concepto. La huella hídrica gris es un indicador de la contaminación y cuanto menos contaminación, mejor.

Los principales nutrientes que contienen los fertilizantes son el nitrógeno, el fósforo y el potasio utilizándose en el cultivo de papa una fórmula que los une nombrada NPK. A continuación, se muestran los fertilizantes aplicados durante el cultivo de la papa durante la

experimentación, comprendidas entre 300 y 512 kg/ha, dato obtenido a partir de la programación de fertilización planteada en la experimentación.

**Tabla 21: Tasa de aplicación de los productos químicos en el cultivo**

<b>Producto químico</b>	<b>Tasa de aplicación del fertilizante (kg/ha)</b>
Nitrato	445
Potasio	512
Sulfatos	300

FUENTE: Elaboración propia

Para el cálculo de la huella hídrica gris se consideró al nitrógeno como el contaminante más crítico, tomando los valores de fertilizantes aplicados y asumiendo una fracción de lixiviación de 10 por ciento del total de nitrógeno aplicado en el campo, según lo recomendado en el manual de huella hídrica (Hoekstra et al. 2011). La concentración máxima del nitrógeno según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la calidad de agua potable establecida es de 50 mg/l, y dado que se desconoce la calidad de agua del cuerpo receptor se supone que un valor de cero.

$$HH_{GRIS} = \frac{L}{Y * (C_{max} - C_{nat})} = \frac{\alpha * Appl}{Y * (C_{max} - C_{nat})} \left( \frac{m^3}{tn} \right)$$

- HH<sub>GRIS</sub> : Huella hídrica gris (m<sup>3</sup>/toneladas)  
L : Carga de contaminantes (masa/área)  
α : Fracción de lixiviación (%)  
Appl : Aplicación de productos (kg/ha)  
Y : Rendimiento (toneladas/ha)  
C<sub>MAX</sub> : Concentración máxima permitida del contaminante (kg/m<sup>3</sup>)  
C<sub>NAT</sub> : Concentración natural permitida del contaminante (kg/m<sup>3</sup>)

**Tabla 22: Huella hídrica gris del cultivo de papa ( $m^3/ha$ ), para el tratamiento testigo (T) y deficitario (RP).**

	<b>Tasa de fertilizacion</b>	<b>Fraccion de lixiviacion de nitrogeno</b>	<b>Concentracion maxima</b>	<b>Y</b>	<b>HH gris</b>
	<b>kg/ha</b>	<b>%</b>	<b>mg/l</b>	<b>(t/ha)</b>	<b>(m3/tn)</b>
<b>T</b>	445	0.1	50	13.85	64.28
<b>RP</b>	445	0.1	50	13.70	64.99

FUENTE: Elaboración propia

## V. CONCLUSIONES

- Con respecto a la caracterización el cultivo presento un desarrollo precoz obteniendo rendimientos de 65.03 y 60.74 Tn/ha, para los tratamientos testigos y deficitario aplicándoles volúmenes de agua igual a 1170 y 1010 m<sup>3</sup>/ha respectivamente, en un suelo franco arenoso y bajo las condiciones climáticas de un clima semiárido en la estación de invierno. Se determinó que las plantas sometidas al tratamiento testigo alcanzaron valores ligeramente mayores con respecto a la cobertura de dosel y a la materia seca total, pero no existe diferencia significativa con el tratamiento deficitario. Caso que no sucede con la materia seca de tubérculos o rendimiento, el cual mostro diferencia significativa entre el tratamiento testigo y deficitario, siendo el primero quien presento un mayor rendimiento.
- Con respecto a la calibración, se realizó tomando en cuenta los datos recolectados del tratamiento testigo (T), donde se observó que los parámetros más sensibles en modulo cultivo son el índice de cosecha (HI) y la productividad hídrica (WP), asignado les un valor de 90 y 20 respectivamente. Durante la validación espacialmente se corrió el modelo con los datos obtenidos del tratamiento deficitario (RP), variando principalmente con las láminas de riego aplicadas. Las variables evaluadas fueron la cobertura del dosel (CC), materias seca tota (MST) y materia seca de tubérculo (MSt), el análisis de sensibilidad entre los datos modelados y datos obtenidos en campo, obtuvieron una alta correlación, que según Molnar (2011), califica a la simulación como muy buena a excelente.
- La huella hídrica total para el tratamiento testigo resulto un valor de 149 m<sup>3</sup>/tn, donde se encontró para el componente azul, verde y gris un porcentaje de 57 por ciento, 0 por ciento y 43 por ciento respectivamente. Para el caso del tratamiento deficitario la huella hídrica total resulto un volumen de 149.33 m<sup>3</sup>/tn, donde los porcentajes de las componentes azul, verde y gris son 56.5 por ciento, 0 por ciento y 43.4 por ciento respectivamente.

## **VI. RECOMENDACIONES**

- Desarrollar nuevas investigaciones con respecto al riego parcial en zona de raíces probando nuevas frecuencias de riego con la finalidad de hacer más crítica el estrés hídrico de la planta y reducir la huella hídrica del cultivo.
- Es importante realizar un seguimiento a las cantidades de agua que se utilizan durante la producción del cultivo, además de esto es importante que se monitoreo la calidad de agua usada para riego.
- Se sugiere realizar estudios de suelo para determinar la dosis de fertilizantes adecuada, con el fin de suministrar al cultivo lo que este requiere según sus necesidades, ahorrar dinero y disminuir el volumen de agua que se necesita para asimilar la concentración del contaminante disminuyendo de esta manera la huella hídrica gris.
- Realizar investigación de sobre la calidad del agua drenada con ayuda de lisímetros de succión, para determinar el grado de contaminación que se genera.

## VII. REFERENCIA BIBLIOGRAFICA

Allen, R.; Pereira, L.; Raes, D. & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Riego y Drenaje 56: 298. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/pdf/009/x0490s/x0490s.pdf>

Atoccsa, R. (2015). Aplicación de riego deficitario de secado parcial de La zona de raíces en el cultivo de durazno, mediante el riego por goteo (Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina). Recuperado de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/924/F06-A96-T.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

Bolaños, M. (2011). Determinación de la huella hídrica y comercio de agua virtual de los principales productos agrícolas de Honduras (Tesis de pregrado, Universidad Zamorano). Recuperado de <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/75/1/AGN-2011-T009.pdf>

Castillo, M. (2016). Huella hídrica del campus de la Pontificia Universidad Católica del Perú en el 2014 (Tesis de Licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú). Recuperado de <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/7633>

Centro Nacional de Información de la Calidad (Ed.). (2012). La huella hidrica. Madrid, España: Asociacion Española para la Calidad. Recuperado de: [https://www.aec.es/c/document\\_library/get\\_file?uuid=935d5e6d-b631-44ad-a6e3-c8861d0813d2&groupId=10128](https://www.aec.es/c/document_library/get_file?uuid=935d5e6d-b631-44ad-a6e3-c8861d0813d2&groupId=10128)

Chapagain, A.; Hoekstra A. & Savenije, H. (2006). Water saving through international trade of agricultural products. Revista de Hydrology and Earth System Sciences (HESS), 10(1): 14. Recuperado de <https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/10/455/2006/hess-10-455-2006.pdf>

Decagon Devices Inc. (Ed). (2015). GS1 soil moisture sensor: operator's manual. Washington D.C., Estados Unidos de America. Recuperado de [http://publications.decagon.com/Manuals/14640\\_GS1\\_Web.pdf](http://publications.decagon.com/Manuals/14640_GS1_Web.pdf)

Doorenbos, J. & Pruitt, W. (1977). Crop water requirements. *Irrigation and drainage*, 24: 154. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-f2430e.pdf>

EGUSQUIZA, B. (2014). *La Papa en el Perú*. UNALM. Cimagraf S.A.C. (2° ed.) Lima, Perú.

Egúsquiza, B. R. (2000). *La papa: producción, transformación y comercialización*. Lima-Perú. (p. 191). Recuperado de [https://books.google.com.pe/books?id=6ciGbBX0uFwC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.pe/books?id=6ciGbBX0uFwC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)

Franke, N.; Boyacioglu, H. & Hoekstra, A. (2013). Grey water footprint accounting: tier 1 supporting guidelines. UNESCO-IHE Institute for Water Education. Recuperado de <http://bit.ly/2eCg8rc>

Gutierrez, J.; Espinoza, M. & Bonierbale, M. (2007). UNICA: Variedad peruana para mercado fresco y papa frita con tolerancia y Resistencia para condiciones climáticas adversas. *Latinoamericana de la Papa*, 14(1): 41-51. Recuperado de <http://ojs.papaslatinas.org/index.php/rev-alap/article/download/143/146>

Hoekstra, A., Chapagain A., Aldaya M. & Mekonnen, M. (2011). The wáter Footprint assesment manual: setting the global standard. *earthscan*, 1(1): 228. Recuperado de <http://bit.ly/2dihJx7>

Jacovides, C. & Kontoyiannis, H. (1995). Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration computing models. *Agricultural Water Management*, 27: 365- 371. Recuperado de [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(95\)01152-9](https://doi.org/10.1016/0378-3774(95)01152-9)

Krause, P.; Boyle, D.; Bäse, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5: 89-97. Recuperado de <https://www.adv-geosci.net/5/89/2005/adgeo-5-89-2005.pdf>

Legates, D. & McCabe, G. (1999). Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydro climatic model validation. *Water Resources Research*, 35: 233–241. Recuperado de <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/1998WR900018>

McCarthy, M. (s. f.). Regulated deficit irrigation and partial rootzone drying as irrigation management techniques for grapevines. *Water Reports*, 22: 79. Recuperado de [http://www.fao.org/tempref/agl/AGLW/ESPIM/CD-ROM/documents/5K\\_e.pdf](http://www.fao.org/tempref/agl/AGLW/ESPIM/CD-ROM/documents/5K_e.pdf)

Molina, M.; Velez, J. & Rodriguez, P. (2015). Efecto del riego deficitario controlado en las tasas de crecimiento del fruto de pera (*Pyrus communis L.*). *Ciencias Horticolas*, 9(2): 234-246. Recuperado de [https://revistas.uptc.edu.co/revistas/index.php/ciencias\\_horticolas/article/view/4179](https://revistas.uptc.edu.co/revistas/index.php/ciencias_horticolas/article/view/4179)

Moriasi, D.; Arnold, J.; Liew, M.; Bingner, R.; Harmel, R. & Veith, T. 2007. Model Evaluation Guidelines For Systematic Quantification Of Accuracy In Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3): 885–900. Recuperado de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.532.2506&rep=rep1&type=pdf>

Nash, J. & Sutcliffe, J. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I- A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10: 282-290. Recuperado de [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)

Ordoñez, C. (2016). Efecto de cambio climático en la evapotranspiración y rendimiento del cultivo de papa, variedad UNICA bajo condiciones de La Molina (Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina). Recuperado de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/2241/P40-O7-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Pegram, G.; Conyngam, S.; Orr, S.; Germana, C.; Álvarez, C.; Riveros, J.; Llerena, C.; Rendón, E.; Ramos, C. & Gómez, X. (marzo, 2015). Huella Hídrica del Perú Sector Agropecuario, 3(1): 10–21. Recuperado de [http://repositorio.ana.gob.pe/bitstream/handle/ANA/521/ANA0000307\\_3.pdf?sequence=2&isAllowed=y](http://repositorio.ana.gob.pe/bitstream/handle/ANA/521/ANA0000307_3.pdf?sequence=2&isAllowed=y)

Pfister, S. & Bayer, P. (2014). Monthly water stress: spatially and temporally explicit consumptive water footprint of global crop production. *Journal of Cleaner Production*, 73: 52 – 62. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.031>

Restrepo, I. (2004). Tendencias mundiales en la gestión de recursos hídricos. *Revista de Ingeniería y Competitividad*. 6(1): 2 – 4. Recuperado de [http://revistaingenieria.univalle.edu.co/index.php/ingenieria\\_y\\_competitividad/article/view/2289/3039](http://revistaingenieria.univalle.edu.co/index.php/ingenieria_y_competitividad/article/view/2289/3039)

Rojas, G.; Posadas, A.; Quiroz, R.; Holle, M. & Málaga, M. (2007). Secado parcial de raíces: una promisoriosa técnica de riego en papa (*Solanum Tuberosum L.*). *Centro Internacional de la Papa. Zonas Áridas*, 11(1) 206-218. Recuperado de <http://www.lamolina.edu.pe/zonasaridas/za11/pdfs/ZA11%2000%20art15.pdf>

Sánchez, M. & Meza, R. (2014). Evaluación del rendimiento del cultivo de papa bajo la aplicación del riego deficitario (PRD) utilizando cintas de riego. *Anales Científicos*, 76(1): 22-28. Recuperado de <http://revistas.lamolina.edu.pe/index.php/acu/article/view/760/728>

Sánchez, M. & Torrecillas A. (1995). *Riego deficitario controlado, fundamentos y aplicaciones*. España-Murcia.

Shen, J. & Qian, X. (2012). Addressing the water footprint concept: a demonstrable strategy for papermaking industry. *BioResources*, 7(3): 1-4. Recuperado de [http://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes\\_07\\_3\\_2707\\_Shen\\_Qian\\_Water\\_Footprint\\_Papermaking\\_Industry/1531](http://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_07_3_2707_Shen_Qian_Water_Footprint_Papermaking_Industry/1531)

Steduto, P.; Hsiao, T.; Raes, D.& Fereres, E. (2009). AquaCrop – The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Revista de Agronomy Journal*, 101(3): 426-437. Recuperado de <https://pdfs.semanticscholar.org/3f8d/d836b91fa32e45090b519e3b94f51b748841.pdf>

Steduto, P.; Hsiao, T.; Raes, D.& Fereres, E. (2012). Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. FAO, Roma. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-i2800s.pdf>

Willmott, C. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin American Meteorological Society*. Newark, 63: 1309-1313. Recuperado de <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/15200477%281982%29063%3C1309%3ASCOTE0%3E2.0.CO%3B2>

## VIII. ANEXOS

### Anexo 1: Resultados del Análisis de agua de riego aplicada durante el experimento, obtenido del Laboratorio de Agua, Suelo, Medio Ambiente y Fertilización

	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA</b> <b>DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS DRH</b> <b>LABORATORIO DE AGUA, SUELO, MEDIO AMBIENTE Y FERTIRRIEGO</b>	
Av. La Molina s/n. Telefax: 6147800 Anexo 226 Lima. E-mail: las-fia@lamolina.edu.pe		<b>Nº 00787</b>
<b>ANÁLISIS DE AGUA - RUTINA</b>		
<b>SOLICITANTE</b>	: MIGUEL SANCHEZ	
<b>UBICACIÓN</b>	: Unalm	
<b>RESPONSABLE ANÁLISIS</b>	: Ing. Nore Arévalo Flores	
<b>FECHA DE ANÁLISIS</b>	: La Molina, 15 de Junio del 2017	
<b>Nº LABORATORIO</b>	7877	
<b>Nº DE CAMPO</b>	Agua	
<b>CE</b> dS/m	0.66	
<b>pH</b>	7.52	
<b>Calcio</b> meq/l	4.90	
<b>Magnesio</b> meq/l	0.83	
<b>Sodio</b> meq/l	0.89	
<b>Potasio</b> meq/l	0.05	
<b>SUMA DE CATIONES</b>	6.67	
<b>Cloruro</b> meq/l	1.13	
<b>Sulfato</b> meq/l	2.67	
<b>Bicarbonato</b> meq/l	2.83	
<b>Nitratos</b> meq/l	0.00	
<b>Carbonatos</b> meq/l	0.00	
<b>SUMA DE ANIONES</b>	6.62	
<b>SAR</b>	0.52	
<b>CLASIFICACION</b>	C2-S1	
<b>Boro</b> ppm	0.57	

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE AGUA Y SUELO  
.....  
Ing. Msc. Teresa Velásquez Bejarano  
JEFE DE LABORATORIO

Anexo 2: Resultados del Análisis de suelo, obtenido del Laboratorio de Agua, Suelo, Medio Ambiente y Fertilirriego



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**  
**DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS DRH**  
**LABORATORIO DE AGUA, SUELO, MEDIO AMBIENTE Y FERTIRRIEGO**  
 Av. La Molina s/n. Telefax: 6147800 Anexo 226 Lima. E-mail: las-fia@lamolina.edu.pe



Nº 012389

**ANALISIS DE SUELO - CARACTERIZACION**

SOLICITANTE : ING. MIGUEL SANCHEZ DELGADO  
 PROCEDENCIA : Unalm  
 RESP. ANALISIS : Ing. Elizabeth Monterrey Porras  
 FECHA DE ANALISIS : La Molina, 11 de Mayo del 2017

Número de muestra		CE dS / m Relación 1:1	Análisis Mecánico				pH Relación 1:1	M.O. %	P ppm	K ppm	CaCO <sub>3</sub> %	Cationes Cambiables					
Lab.	Campo		Arena %	Limo %	Arcilla %	Textura						CIC total	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Al <sup>+++</sup> +H <sup>+</sup>
												Cmol (+) / Kg					
12389	Suelo	1.05	55.84	33.00	11.16	Francoso arenoso	7.56	1.49	50.19	242.00	1.32	13.91	12.18	1.35	0.08	0.30	-

LABORATORIO DE ANALISIS DE AGUA Y SUELO

Ing. Msc. Teresa Velásquez Bejarano  
 JEFE DE LABORATORIO

**Anexo 3: Registro de datos meteorológicos promedio mensual en el periodo de la investigación (junio – septiembre del 2017)**

<b>MES</b>	<b>T<sub>max</sub></b> <b>(°C)</b>	<b>T<sub>min</sub></b> <b>(°C)</b>	<b>HR</b> <b>(%)</b>	<b>V<sub>v</sub></b> <b>(m/s)</b>	<b>Pp</b> <b>(mm)</b>	<b>U</b> <b>(MJ/m2-dia)</b>	<b>ET<sub>o</sub></b> <b>(mm/dia)</b>
Junio	22.20	14.90	89.63	1.12	0.75	12.68	1.11
Julio	21.60	13.50	88.12	1.15	0.00	15.94	1.27
Agosto	20.10	13.30	90.85	1.18	0.50	15.82	1.31
Septiembre	22.10	13.30	91.95	1.10	0.75	12.06	1.55

FUENTE: Estación meteorológica del departamento de recursos hídricos. UNALM

**Anexo 4: Fotografías de la preparación del terreno – pre-siembra**



**Machacado del terreno**



**Laboreo mecanizado del suelo**

**Anexo 5: Fotografías de la prueba de bulbo húmedo**



**Franja humedecida con excelente traslape**



**Prueba de bulbo húmedo**

## Anexo 6: Labores culturales realizadas



Siembra del tubérculo con una separación de 30 cm y una profundidad de 10 cm.



Aporque desarrollado a los 30 días de siembra.



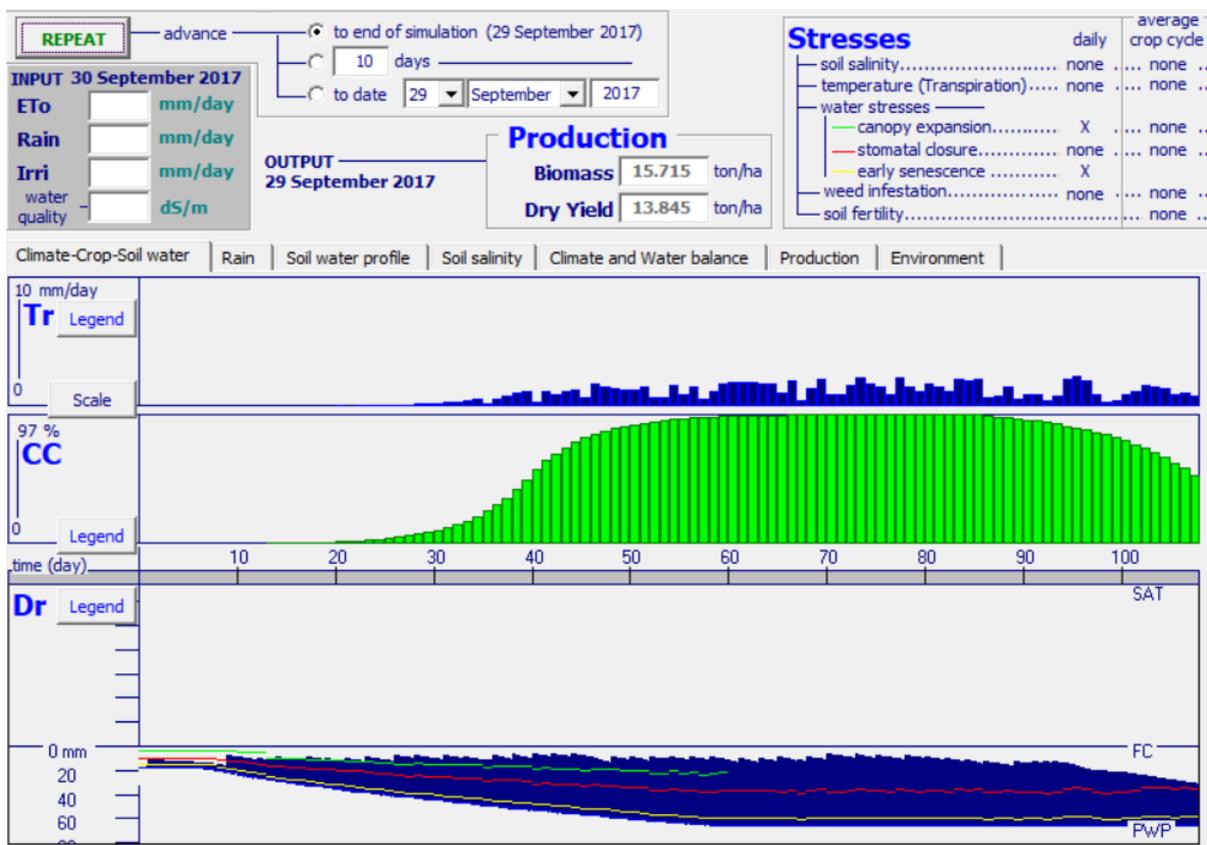
Fumigación realizada para el control de plagas y aplicación de abonos foliares

**Anexo 7: Láminas de riego aplicadas durante el experimento**

DIA DESPUES DE LA SIEMBRA	Nº DE RIEGO	FECHA DE APLICACIÓN	VOLUMEN DE AGUA POR TRATAMIENTO ( m3/ha)	
			T	RP
10	1	23/06/2017	80	80
13	2	26/06/2017	20	20
15	3	28/06/2017	32	32
18	4	1/07/2017	34	34
<b>20</b>	<b>5</b>	<b>3/07/2017</b>	<b>13</b>	<b>5</b>
<b>22</b>	<b>6</b>	<b>5/07/2017</b>	<b>15</b>	<b>10</b>
<b>24</b>	<b>7</b>	<b>7/07/2017</b>	<b>26</b>	<b>15</b>
<b>27</b>	<b>8</b>	<b>10/07/2017</b>	<b>43</b>	<b>20</b>
<b>29</b>	<b>9</b>	<b>12/07/2017</b>	<b>20</b>	<b>10</b>
32	10	15/07/2017	28	28
34	11	17/07/2017	18	18
37	12	20/07/2017	41	41
39	13	22/07/2017	42	42
41	14	24/07/2017	40	40
43	15	26/07/2017	29	29
45	16	28/07/2017	28	28
49	17	1/08/2017	50	50
51	18	3/08/2017	29	29
53	19	5/08/2017	38	38
55	20	7/08/2017	15	15
57	21	9/08/2017	33	33
59	22	11/08/2017	25	25
62	23	14/08/2017	40	40
64	24	16/08/2017	38	38
66	25	18/08/2017	35	35
69	26	21/08/2017	36	36
71	27	23/08/2017	54	54
74	28	26/08/2017	39	39
<b>76</b>	<b>29</b>	<b>28/08/2017</b>	<b>30</b>	<b>15</b>
<b>79</b>	<b>30</b>	<b>31/08/2017</b>	<b>40</b>	<b>20</b>
<b>81</b>	<b>31</b>	<b>2/09/2017</b>	<b>24</b>	<b>10</b>
<b>83</b>	<b>32</b>	<b>4/09/2017</b>	<b>20</b>	<b>10</b>
<b>85</b>	<b>33</b>	<b>6/09/2017</b>	<b>20</b>	<b>10</b>
<b>87</b>	<b>34</b>	<b>8/09/2017</b>	<b>20</b>	<b>10</b>
<b>90</b>	<b>35</b>	<b>11/09/2017</b>	<b>30</b>	<b>15</b>
<b>92</b>	<b>36</b>	<b>13/09/2017</b>	<b>17</b>	<b>10</b>
<b>94</b>	<b>37</b>	<b>15/09/2017</b>	<b>10</b>	<b>5</b>
<b>TOTAL</b>			<b>1152</b>	<b>989</b>

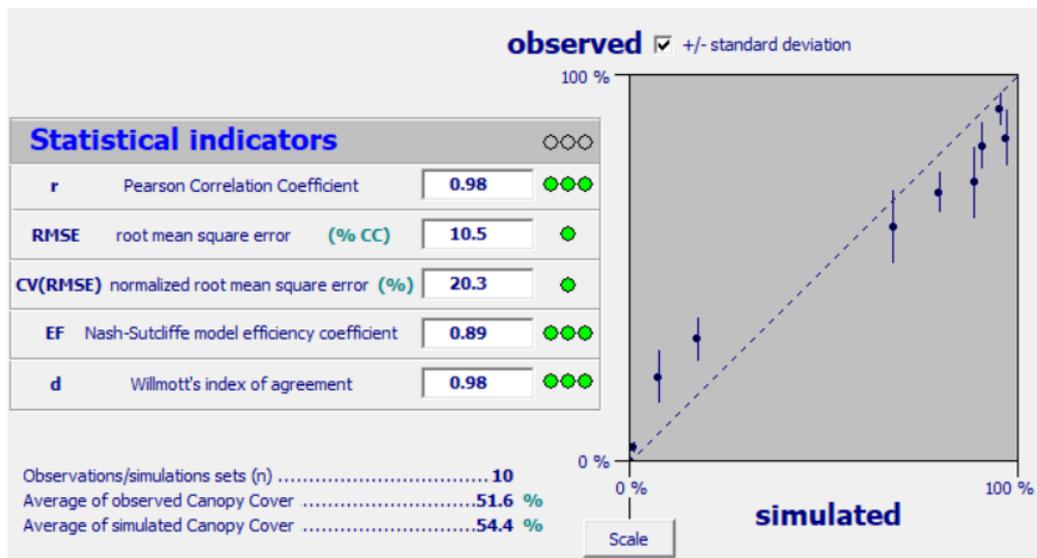
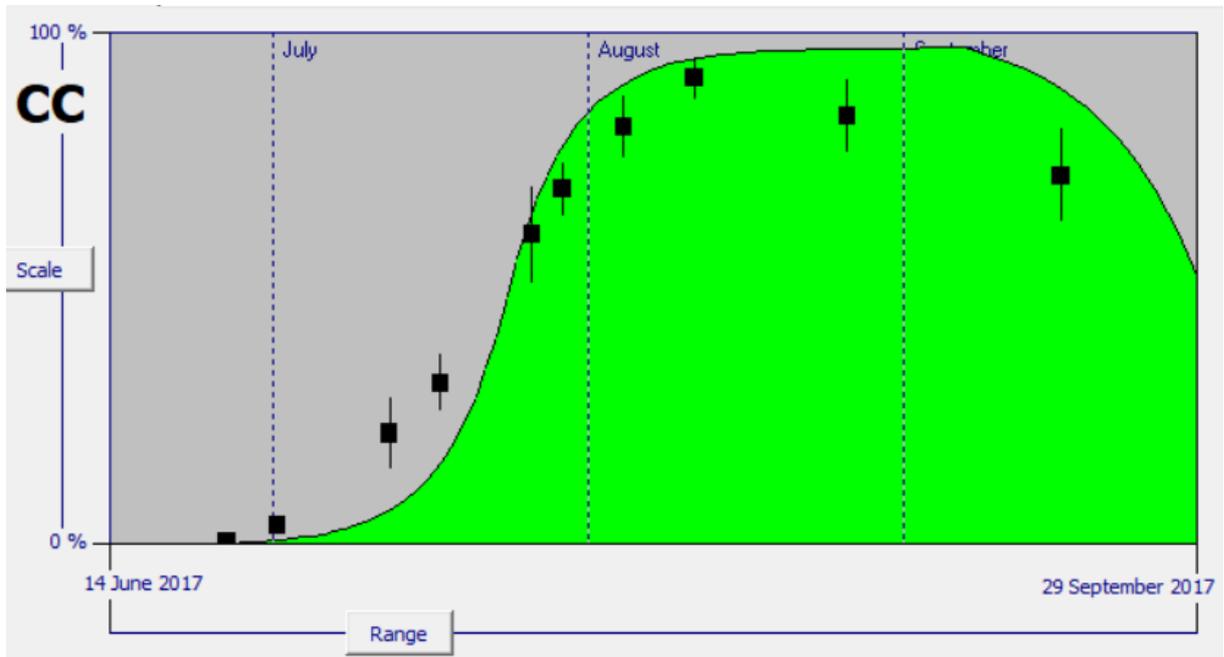
**Anexo 8 : Resultados de la simulación en la calibración, representación gráfica de la transpiración, cobertura de dosel y de la humedad de suelo.**

(Lamina óptima)



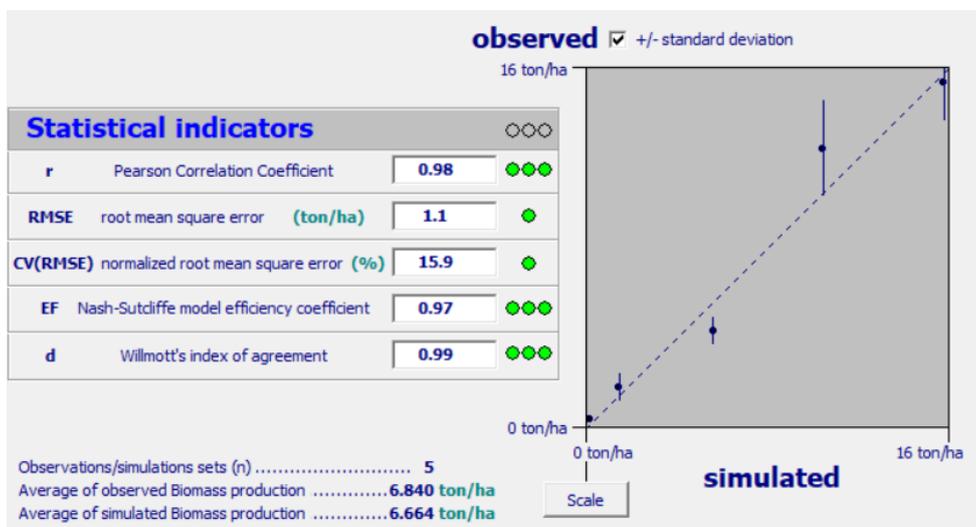
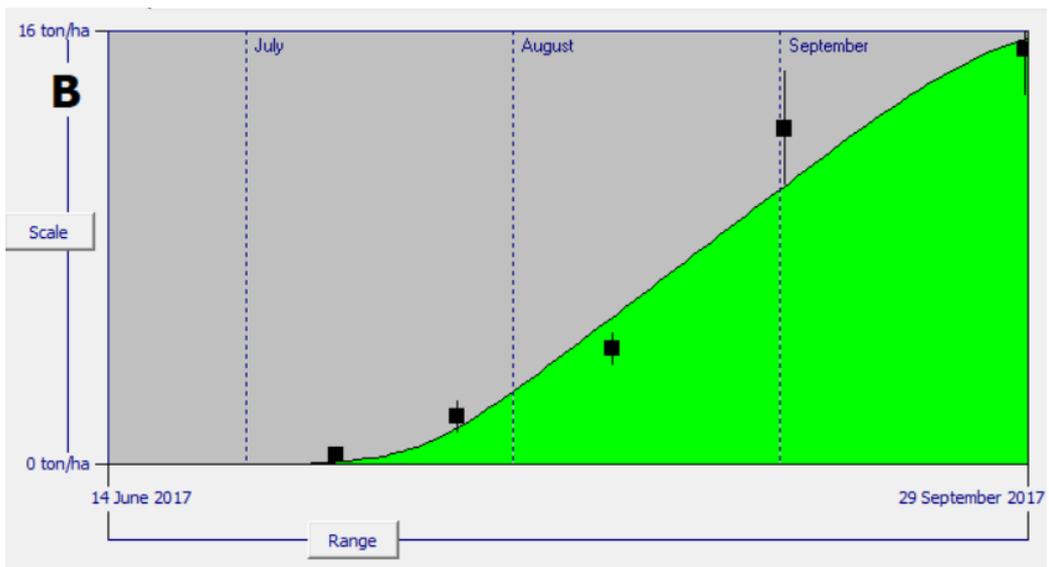
**Anexo 9: Análisis de sensibilidad de la evolución de la cobertura de dosel en la calibración del modelo:  
línea continua (simulado) y puntos (medidos)**

(Lamina óptima)



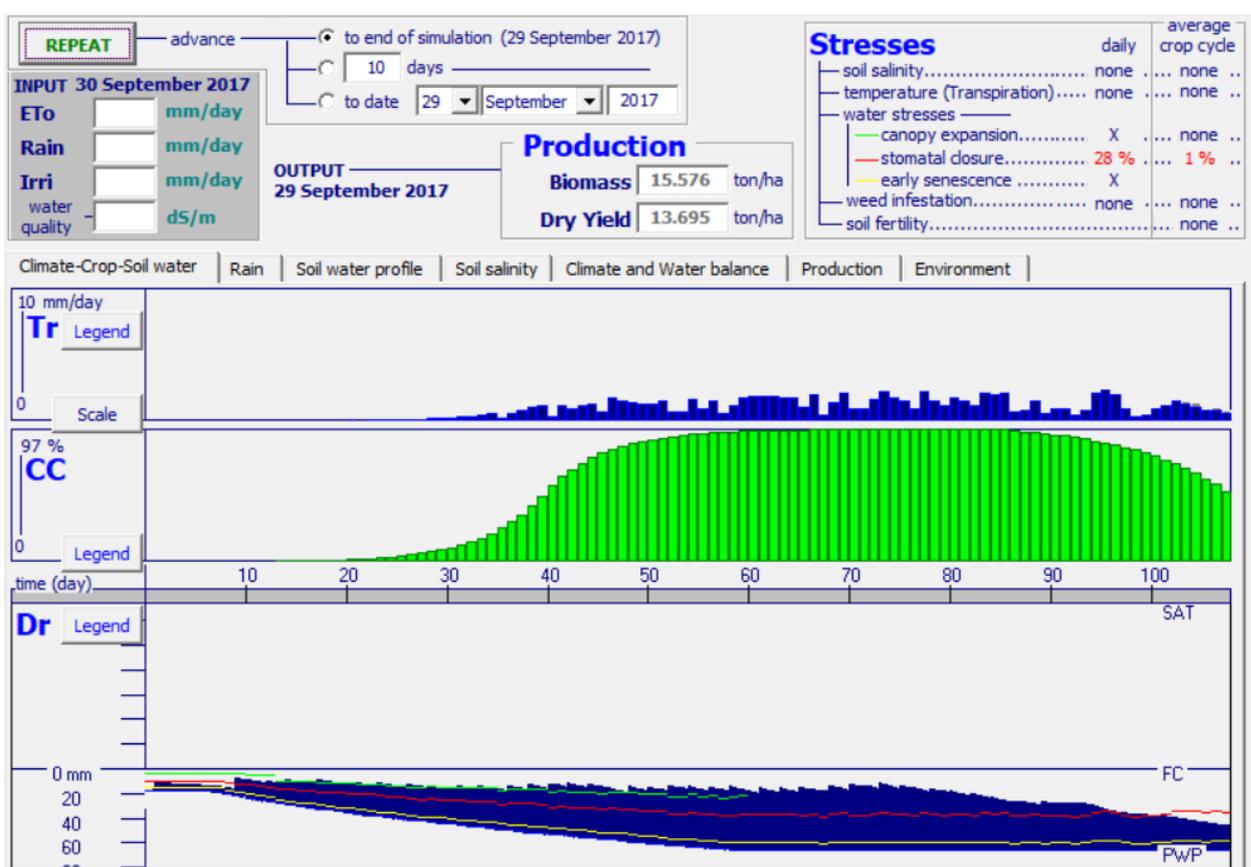
**Anexo 10: Análisis de sensibilidad de la evolución de la materia seca total en la calibración del modelo:  
línea continua (simulado) y puntos (medidos)**

(Lamina óptima)



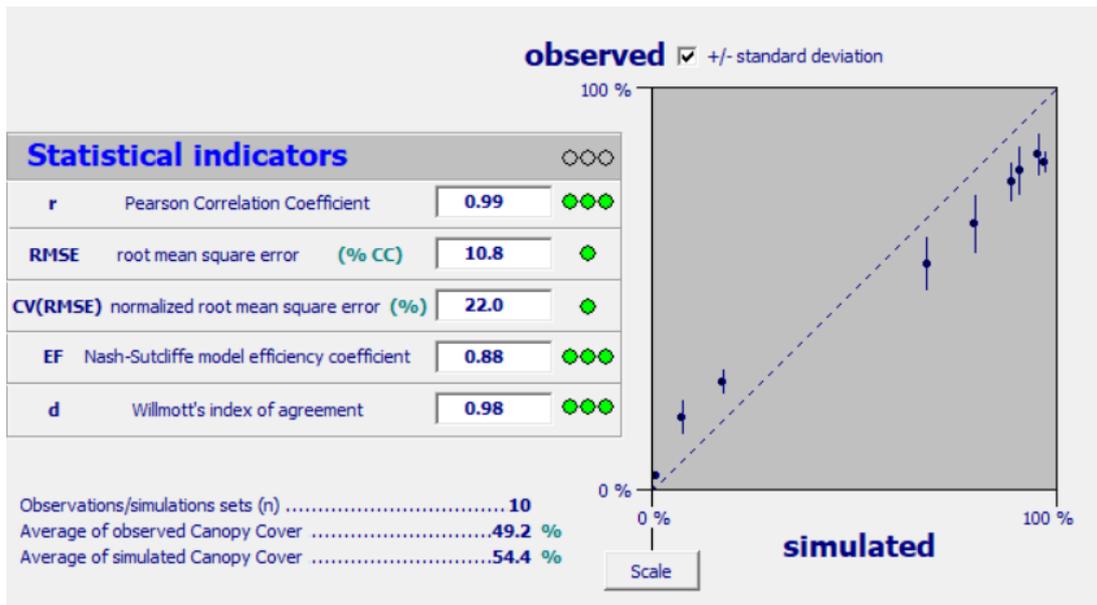
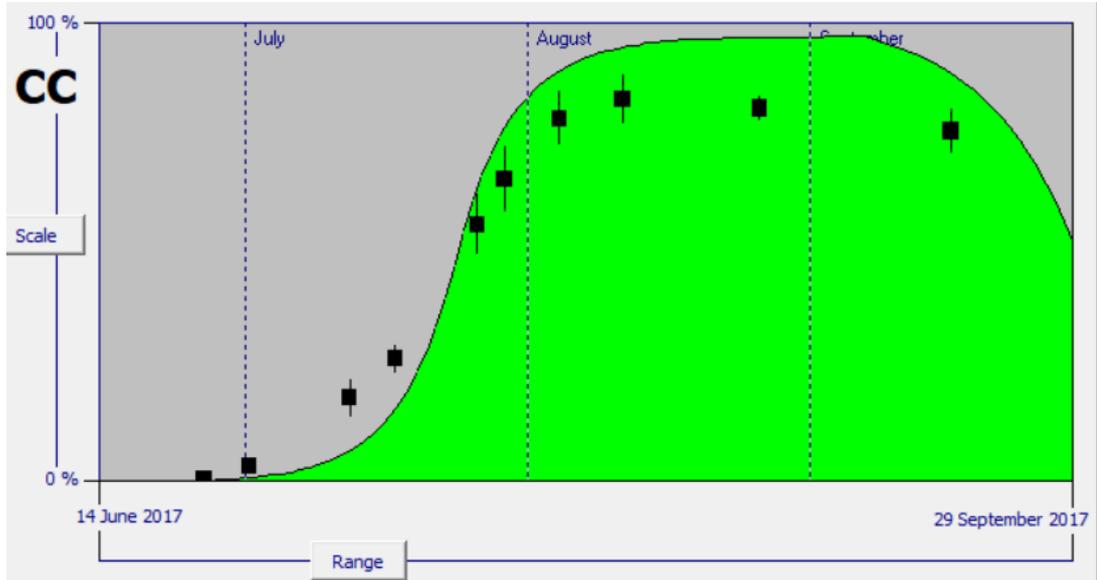
**Anexo 11: Resultados de la simulación en la validación, representación gráfica de la transpiración, cobertura de dosel y de la humedad de suelo.**

(Lamina reducida)



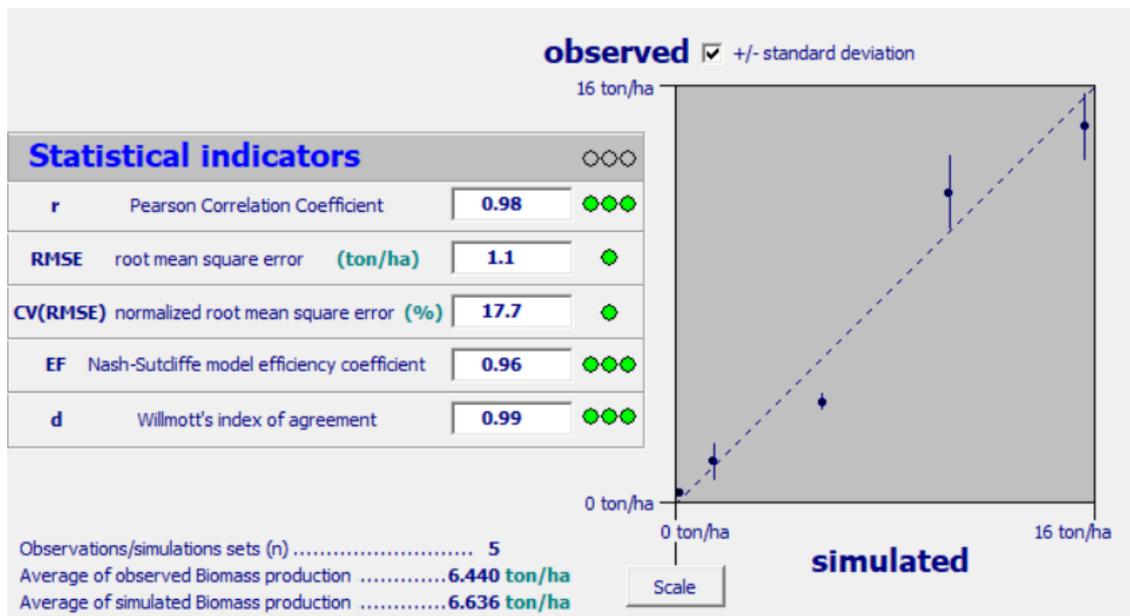
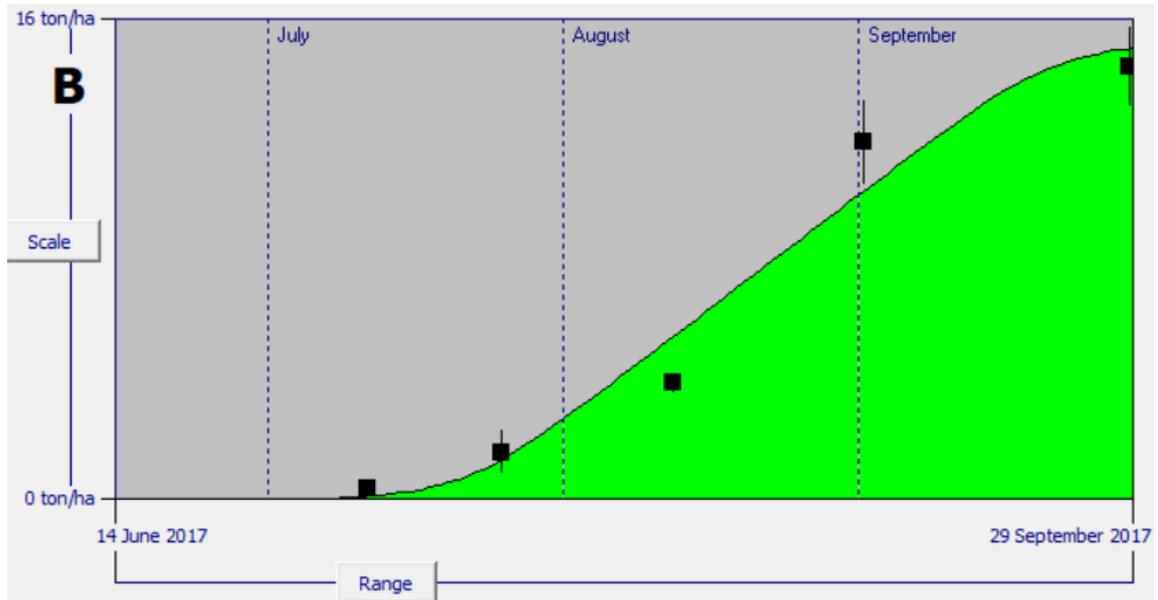
**Anexo 12: Análisis de sensibilidad de la evolución de la cobertura de dosel en la calibración del modelo: línea continua (simulado) y puntos (medidos)**

(Lamina reducida)



**Anexo 13: Análisis de sensibilidad de la evolución de la materia seca total en la calibración del modelo:  
línea continua (simulado) y puntos (medidos)**

(Lamina reducida)



**Anexo 14: Resultado del análisis foliar donde se determinó el porcentaje de materia seca del tubérculo**



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
 FACULTAD DE AGRONOMIA - DEPARTAMENTO DE SUELOS  
 LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



**INFORME DE ANALISIS FOLIAR**

SOLICITANTE : PIERO ABRAHAN NATIMIDAD TORIBIO  
 PROCEDENCIA : LIMA/ LIMA/ LA MOLINA  
 MUESTRA DE : TUBÉRCULOS DE PAPA  
 REFERENCIA : H.R. 60866  
 BOLETA : 667  
 FECHA : 18/10/2017

N. Lab.	CLAVE DE CAMPO	N %	P %	K %	Ca %	Mg %	S %	Na %	Zn ppm	Cu ppm	Mn ppm	Fe ppm	B ppm	M.S. %
8149	T-1	1.18	0.22	1.75	0.08	0.11	0.12	0.03	17	4	7	31	9	21.03
8150	T-2	1.18	0.18	1.46	0.06	0.09	0.10	0.03	17	5	7	27	6	21.19
8151	RP1	1.68	0.23	2.15	0.07	0.10	0.12	0.03	20	6	8	45	6	22.03
8152	RP2	1.11	0.19	1.81	0.08	0.09	0.12	0.04	17	5	7	31	9	22.13

*D<sup>a</sup> Sad<sup>a</sup> García Bende<sup>a</sup>zú*  
 Jefe de Laboratorio