

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**“MODELACIÓN DEL RENDIMIENTO Y BIOMASA DE CUCURBITA
PEPO EN FUNCIÓN DE CUATRO LAMINAS DE RIEGO MEDIANTE
EL PROGRAMA AQUACROP”**

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

RAY BHRANDON LEONARDO GARAY

LIMA – PERÚ

2020

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA

**“MODELACIÓN DEL RENDIMIENTO Y BIOMASA DE CUCURBITA
PEPO EN FUNCIÓN DE CUATRO LÁMINAS DE RIEGO MEDIANTE EL
PROGRAMA AQUACROP”**

TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE:

INGENIERO AGRÍCOLA

Presentado por:

BACH. RAY BHRANDON LEONARDO GARAY

Sustentado y aprobado por el siguiente jurado:

Mg. Sc. LUIS RAMÓN RÁZURI RAMÍREZ
Presidente

Dr. EDUARDO ABRAHAM CHÁVARRI VELARDE
Asesor

Mg. Sc. MIGUEL ÁNGEL SÁNCHEZ DELGADO
Miembro

Dra. LÍA RAMOS FERNÁNDEZ
Miembro

LIMA – PERU

2020

DEDICATORIA

A mis padres Ana Garay y Leoncio Leonardo

A mis hermanos Henry y Mell Leonardo

A mi persona especial y amigos

Por su apoyo, cariño, comprensión

Y guiarme por el camino de la superación personal y profesional



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**ACTA DE SUSTENTACIÓN VIRTUAL DE TESIS
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AGRÍCOLA
N° 071-2020/FIA**

Los que suscriben, miembros del Jurado para la Sustentación virtual de la Tesis titulada:
“MODELACIÓN DEL RENDIMIENTO Y BIOMASA DE CUCURBITA PEPO EN FUNCIÓN DE CUATRO LÁMINAS DE RIEGO MEDIANTE EL PROGRAMA AQUACROP”, presentado por su autor:

RAY BHRANDON LEONARDO GARAY

Bachiller en Ciencias-Ingeniería Agrícola, luego de estudiar su contenido, se han reunido en la fecha, y han procedido a escuchar la exposición virtual del autor, a formular las observaciones, preguntas pertinentes y luego de una evaluación del conjunto, lo declaran:

AROBADO

Con el calificativo de:

SOBRESALIENTE

En consecuencia, el autor de la Tesis queda apto de recibir el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AGRÍCOLA**, de conformidad con lo estipulado en el artículo 89° del Estatuto de la Universidad Nacional Agraria La Molina, en concordancia con la Ley 30220.

La Molina, 17 de noviembre del 2020.

Mg. Sc. LUIS RAMÓN RÁZURI RAMÍREZ
Presidente

Mg. Sc. MIGUEL ÁNGEL SÁNCHEZ DELGADO
Miembro

Dra. LÍA RAMOS FERNÁNDEZ
Miembro

Dr. EDUARDO ABRAHAM CHÁVARRI VELARDE
Asesor

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por su cariño, apoyo y enseñarme como ser una mejor persona y un mejor profesional.

A mis hermanos por su compañía, cariño y apoyo incondicional.

A la Universidad Nacional Agraria La Molina por permitir que me desarrolle como persona y como profesional.

A mi asesor el Dr. Eduardo Chávarri, por guiarme, apoyarme y aconsejarme en el desarrollo de esta investigación.

Al presidente y miembros del jurado por sus conocimientos y recomendaciones que ayudaron a mejorar esta investigación.

INDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1.	Zapallito Italiano.....	3
2.1.1.	Origen y evolución del cultivo	3
2.1.2.	Características generales del Zapallito Italiano	3
2.1.3.	Requerimiento climático y condiciones de suelo	4
2.1.4.	Características Fenológicas	5
2.1.5.	Manejo de campo de zapallito italiano.....	6
2.2.	Modelo AQUACROP	6
2.2.1.	Descripción del modelo AQUACROP	6
2.2.2.	Descripción del proceso de simulación de AQUACROP	7
2.2.3.	Información de ingreso a AQUACROP(Input).....	9
2.2.4.	Interfaz y simulación en AQUACROP	19
2.2.5.	Calibración del modelo en AQUACROP	29
III.	METODOLOGÍA.....	28
3.1.	Zona de estudio	28
3.1.1.	Ubicación.....	28
3.1.2.	Clima	29
3.1.3.	Agua	30
3.1.4.	Diseño experimental.....	30
3.1.5.	Sistema de Riego	30
3.1.6.	Suelo.....	38
3.2.	Materiales, equipos y herramientas computacionales.....	41
3.3.	Procedimiento	42
3.3.1.	Fase de campo	42
3.3.2.	Fase de calibración del modelo	50

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	55
4.1. Muestreo del cultivo	55
4.1.1. Biomasa aérea seca del zapallito italiano	55
4.1.2. Cobertura del dosel del zapallito italiano	60
4.1.3. Raíces del zapallito italiano	65
4.1.4. Rendimiento del zapallito italiano	66
4.2. Muestreo del contenido de humedad	67
4.3. Análisis de sensibilidad	69
4.4. Calibración del modelo AQUACROP	74
4.4.1. Modelo basado en el tratamiento de riego equivalente al 120% de la Eto	75
4.4.2. Modelo basado en el tratamiento de riego equivalente al 100% de la Eto	79
4.4.3. Modelo basado en el tratamiento de riego equivalente al 80% de la Eto	83
4.4.4. Modelo basado en el tratamiento de riego equivalente al 60% de la Eto	87
4.4.5. Calibración del rendimiento del Zapallito italiano	91
4.4.6. Eficiencia del uso del agua	91
V. CONCLUSIONES	92
VI. RECOMENDACIONES	93
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94
VIII. ANEXOS	97

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Composición nutricional del Zapallito italiano	4
Tabla 2: Parámetros más sensibles para un modelo de tomate.....	2
Tabla 3: Parámetros más sensibles para un modelo de cebolla.....	2
Tabla 4: Parámetros más sensibles para un modelo de pimiento	2
Tabla 5: Información de textura del suelo del área experimental.....	38
Tabla 6: Cálculo de densidad aparente en el área experimental.....	39
Tabla 7: Contenido de humedad del suelo (%)	39
Tabla 8: Materiales y equipos.....	41
Tabla 9: Fechas de muestreo de la biomasa aérea	44
Tabla 10: Fechas de muestreo de la cobertura del dosel	46
Tabla 11: Fechas de cosecha del zapallito italiano.....	49
Tabla 12: Valores iniciales o por defecto de los parámetros de AQUACROP a los cuales se realizará un análisis de sensibilidad.....	51
Tabla 13: Indicadores estadísticos para analizar la eficiencia del modelo calibrado	54
Tabla 14: Biomasa aérea seca (T x ha ⁻¹) del tratamiento de riego equivalente al 120% de la Eto muestreada en los 3 bloques.....	55
Tabla 15: Biomasa aérea seca (T x ha ⁻¹) del tratamiento de riego equivalente al 100% de la Eto muestreada en los 3 bloques.....	56
Tabla 16: Biomasa aérea seca (T x ha ⁻¹) del tratamiento de riego equivalente al 80% de la Eto muestreada en los 3 bloques.....	56
Tabla 17: Biomasa aérea seca (T x ha ⁻¹) del tratamiento de riego equivalente al 60% de la Eto muestreada en los 3 bloques.....	57
Tabla 18: Cobertura del dosel (%) del tratamiento de riego equivalente al 120% de la Eto muestreada en los 3 bloques	60
Tabla 19: Cobertura del dosel (%) del tratamiento de riego equivalente al 100% de la Eto muestreada en los 3 bloques	61
Tabla 20: Cobertura del dosel (%) del tratamiento de riego equivalente al 80% de la Eto muestreada en los 3 bloques	61
Tabla 21: Cobertura del dosel (%) del tratamiento de riego equivalente al 60% de la Eto muestreada en los 3 bloques	62
Tabla 22: Medición de la profundidad de las raíces muestreadas	65

Tabla 23: Profundidad mínima y máxima efectiva de raíz para el modelo AQUACROP..	65
Tabla 24: Rendimiento total (T x ha-1) del zapallito italiano	66
Tabla 25: Valores finales de los principales parámetros de cada modelo en AQUACROP	74
Tabla 26: Información de la cobertura del dosel observada y simulada del tratamiento de riego equivalente al 120% de la Eto	75
Tabla 27: Indicadores estadísticos de la cobertura del dosel para el modelo con tratamiento de riego equivalente al 120% de la Eto	76
Tabla 28: Información de la biomasa aérea seca observada y simulada del tratamiento de riego equivalente al 120% de la Eto	77
Tabla 29: Indicadores estadísticos de la biomasa aérea seca para el modelo con tratamiento de riego equivalente al 120% de la Eto	77
Tabla 30: Indicadores estadísticos del contenido de humedad para el modelo con tratamiento de riego equivalente al 120% de la Eto	78
Tabla 31: Información de la cobertura del dosel observada y simulada del tratamiento de riego equivalente al 100% de la Eto	79
Tabla 32: Indicadores estadísticos de la cobertura del dosel para el modelo con tratamiento de riego equivalente al 100% de la Eto	80
Tabla 33: Información de la biomasa aérea seca observada y simulada del tratamiento de riego equivalente al 100% de la Eto	81
Tabla 34: Indicadores estadísticos de la biomasa aérea seca para el modelo con tratamiento de riego equivalente al 100% de la Eto	81
Tabla 35: Indicadores estadísticos del contenido de humedad para el modelo con tratamiento de riego equivalente al 100% de la Eto	82
Tabla 36: Información de cobertura del dosel observada y simulada del tratamiento de riego equivalente al 80% de la Eto	83
Tabla 37: Indicadores estadísticos de la cobertura del dosel para el modelo con tratamiento de riego equivalente al 80% de la Eto	84
Tabla 38: Información de biomasa aérea seca observada y simulada del tratamiento de riego equivalente al 80% de la Eto	85
Tabla 39: Indicadores estadísticos de la biomasa aérea seca para el modelo con tratamiento de riego equivalente al 80% de la Eto	85
Tabla 40: Indicadores estadísticos del contenido de humedad para el modelo con tratamiento de riego equivalente al 80% de la Eto	86

Tabla 41: Información de cobertura del dosel observada y simulada del tratamiento de riego equivalente al 60% de la Eto	87
Tabla 42: Indicadores estadísticos de la cobertura del dosel para el modelo con tratamiento de riego equivalente al 60% de la Eto	87
Tabla 43: Información de la biomasa aérea seca observada y simulada del tratamiento de riego equivalente al 60% de la Eto	89
Tabla 44: Indicadores estadísticos de la biomasa aérea seca para el modelo con tratamiento de riego equivalente al 60% de la Eto	89
Tabla 45: Indicadores estadísticos del contenido de humedad para el modelo con tratamiento de riego equivalente al 60% de la Eto	90
Tabla 46: Rendimiento (T x ha-1) observado y simulado por tratamiento de riego	91
Tabla 47: Eficiencia del uso del agua por tratamiento de riego simulado en AQUACROP91	
Tabla 48: Información de temperatura máxima recopilada de la estación meteorológica “ClimateMinder”	97
Tabla 49: Información de temperatura mínima recopilada de la estación meteorológica “ClimateMinder”	98
Tabla 50: Información de precipitación recopilada de la estación meteorológica “ClimateMinder”	99
Tabla 51: Información de evapotranspiración de referencia (Eto) recopilada de la estación meteorológica “ClimateMinder”	100
Tabla 52: Protocolo de riego usado para la operación del sistema de riego.....	101
Tabla 53: Lamina de riego aplicada al tratamiento de riego equivalente al 120% de la Eto	105
Tabla 54: Lamina de riego aplicada al tratamiento de riego equivalente al 100% de la Eto	106
Tabla 55: Lamina de riego aplicada al tratamiento de riego equivalente al 80% de la Eto	107
Tabla 56: Lamina de riego aplicada al tratamiento de riego equivalente al 60% de la Eto	108
Tabla 57: Contenido de humedad del tratamiento de riego equivalente al 120% de la Eto.	109
Tabla 58: Contenido de humedad del tratamiento de riego equivalente al 100% de la Eto.	110
Tabla 59: Contenido de humedad del tratamiento de riego equivalente al 80% de la Eto.	111

Tabla 60: Contenido de humedad del tratamiento de riego equivalente al 60% de la Eto.	112
Tabla 61: Análisis de varianza para la biomasa aérea seca final T x ha-1	113
Tabla 62: Prueba de Turkey para la biomasa aérea seca final con un nivel de significancia de 5%	113
Tabla 63: Análisis de varianza para la cobertura del dosel final (%)	113
Tabla 64: Prueba de Turkey para la cobertura del dosel final con un nivel de significancia de 5%	113
Tabla 65: Análisis de varianza para el rendimiento del cultivo T x ha-1	114
Tabla 66: Prueba de Turkey para el rendimiento del cultivo con un nivel de significancia de 5%	114

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de cálculo de AQUACROP con indicación de los 4 pasos, y los procesos (flechas de puntos) afectados por el estrés hídrico (de la A a la E) y el estrés de la temperatura (de la F a la G).	7
Figura 2: Esquema de cálculo de AQUACROP	9
Figura 3: Desarrollo de la cobertura del dosel para condiciones no limitantes.	13
Figura 4: Factores que afectan la simulación de la transpiración.....	14
Figura 5: Factores que afectan la simulación de la producción de biomasa aérea seca	15
Figura 6: Factores que afectan la simulación del rendimiento	16
Figura 7: Umbrales para el cierre estomático (3) y condiciones de aireación deficientes (4) que afectan la transpiración del cultivo.	18
Figura 8: Interfaz del programa AQUACROP	20
Figura 9: Modulo clima de la interfaz AQUACROP	21
Figura 10: Modulo cultivo (Sub modulo desarrollo del cultivo) de la interfaz AQUACROP	22
Figura 11: Modulo cultivo (Sub modulo Evapotranspiración) de la interfaz AQUACROP	23
Figura 12: Modulo cultivo (Sub modulo Producción) de la interfaz AQUACROP.....	24
Figura 13: Modulo cultivo (Sub modulo estrés hídrico) de la interfaz AQUACROP	26
Figura 14: Modulo de riego (Sub modulo eventos de riego) de la interfaz AQUACROP..	27
Figura 15: Modulo suelo (Sub modulo características de los horizontes del suelo) de la interfaz AQUACROP.....	29
Figura 16: Interfaz de data observada, pestaña estadística del programa AQUACROP.....	30
Figura 17: Curva de crecimiento de la biomasa aérea seca del tomate	30
Figura 18: Ubicación del área experimental.....	28
Figura 19: Plataforma virtual de la estación meteorológica automática “ClimateMinder”	29
Figura 20: Temperatura máxima del aire(°C) desde la siembra a la última cosecha del zapallito italiano	31
Figura 21: Temperatura mínima del aire (°C) desde la siembra a la última cosecha del zapallito italiano	32
Figura 22: Precipitación diaria (mm/día) desde la siembra a la última cosecha del zapallito italiano	33

Figura 23: Evapotranspiración diaria (mm/día) desde la siembra a la última cosecha del zapallito italiano	34
Figura 24: Croquis del flujo de agua desde el reservorio hacia el área experimental	35
Figura 25: Disposición de los tratamientos de riego en el área experimental	36
Figura 26: Croquis del sistema de riego en el área experimental	37
Figura 27: Tiempo vs velocidad de infiltración.....	40
Figura 28: Fotografía del terreno preparado para la siembra	42
Figura 29: Collage de fotografías del muestreo de la biomasa aérea	45
Figura 30: Collage de fotografías del crecimiento del dosel	46
Figura 31: Collage de fotografías del muestreo de raíces	47
Figura 32: Collage de fotografías del monitoreo de los sensores.....	48
Figura 33: Collage de fotografías de las cosechas.....	50
Figura 34: Proceso de simulación de la biomasa y rendimiento en AQUACROP	53
Figura 35: Biomasa aérea seca promedio del tratamiento de riego equivalente al 120% de la Eto en las fechas muestreadas	55
Figura 36: Biomasa aérea seca promedio del tratamiento de riego equivalente al 100% de la Eto en las fechas muestreadas	56
Figura 37: Biomasa aérea seca promedio del tratamiento de riego equivalente al 80% de la Eto en las fechas muestreadas	57
Figura 38: Biomasa aérea seca promedio del tratamiento de riego equivalente al 60% de la Eto en las fechas muestreadas	58
Figura 39: Comparación de la biomasa aérea seca promedio por tratamiento de riego.....	59
Figura 40: Cobertura del dosel promedio del tratamiento de riego equivalente al 120% de la Eto en las fechas muestreadas	60
Figura 41: Cobertura del dosel promedio del tratamiento de riego equivalente al 100% de la Eto en las fechas muestreadas	61
Figura 42: Cobertura del dosel promedio del tratamiento de riego equivalente al 80% de la Eto en las fechas muestreadas	62
Figura 43: Cobertura del dosel promedio del tratamiento de riego equivalente al 60% de la Eto en las fechas muestreadas	63
Figura 44: Cobertura del dosel promedio por tratamiento en las fechas muestreadas	64
Figura 45: Contenido de humedad por tratamiento de riego desde la fecha de siembra hasta la última cosecha	68

Figura 46: Análisis de sensibilidad para el modelo correspondiente al tratamiento de riego equivalente al 120% de la Evapotranspiración.....	70
Figura 47: Análisis de sensibilidad para el modelo correspondiente al tratamiento de riego equivalente al 100% de la Evapotranspiración.....	71
Figura 48: Análisis de sensibilidad para el modelo correspondiente al tratamiento de riego equivalente al 80% de la Evapotranspiración.....	72
Figura 49: Análisis de sensibilidad para el modelo correspondiente al tratamiento de riego equivalente al 60% de la Evapotranspiración.....	73
Figura 50: Comparación de la data observada y simulada de la cobertura del dosel para el tratamiento de riego equivalente al 120% de la Eto	75
Figura 51: Comparación de la data observada y simulada de la biomasa aérea seca para el tratamiento de riego equivalente al 120% de la Eto	76
Figura 52: Comparación de la información observada y simulada del contenido de humedad a una profundidad de 30cm	78
Figura 53: Gráfica de comparación de la data observada y simulada de la cobertura del dosel para el tratamiento de riego equivalente al 100% de la Eto	79
Figura 54: Gráfica de comparación de la data observada y simulada de la biomasa aérea seca para el tratamiento de riego equivalente al 100% de la Eto	80
Figura 55: Comparación de la data observada y simulada del contenido de humedad a una profundidad de 30cm.....	82
Figura 56: Comparación de la data observada y simulada de la cobertura del dosel para el tratamiento de riego equivalente al 80% de la Eto	83
Figura 57: Comparación de la data observada y simulada de la biomasa aérea seca para el tratamiento de riego equivalente al 80% de la Eto	84
Figura 58: Comparación de la data observada y simulada del contenido de humedad a una profundidad de 30cm.....	86
Figura 59: Comparación de la data observada y simulada de la cobertura del dosel para el tratamiento de riego equivalente al 60% de la Eto	87
Figura 60: Comparación de la data observada y simulada de la biomasa aérea seca para el tratamiento de riego equivalente al 60% de la Eto	88
Figura 61: Comparación de la data observada y simulada del contenido de humedad a una profundidad de 30cm.....	90
Figura 62: Resultado de la simulación en AQUACROP del tratamiento de riego equivalente al 120% de la Eto.....	115

Figura 63: Resultado de la simulación en AQUACROP del tratamiento de riego equivalente al 100% de la Eto.....	115
Figura 64: Resultado de la simulación en AQUACROP del tratamiento de riego equivalente al 80% de la Eto.....	116
Figura 65: Resultado de la simulación en AQUACROP del tratamiento de riego equivalente al 60% de la Eto.....	116
Figura 66: Balance hídrico simulado para el tratamiento de riego equivalente al 120% de la Eto.....	117
Figura 67: Balance hídrico simulado para el tratamiento de riego equivalente al 100% de la Eto.....	117
Figura 68: Balance hídrico simulado para el tratamiento de riego equivalente al 80% de la Eto.....	118
Figura 69: Balance hídrico simulado para el tratamiento de riego equivalente al 60% de la Eto.....	118
Figura 70: Preparación del terreno	119
Figura 71: Siembra del Zapallito italiano	119
Figura 72: Operación y control del sistema de riego.....	120
Figura 73: Monitoreo del cultivo.....	120
Figura 74: Planta del Zapallito Italiano	121

INDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: INFORMACIÓN CLIMÁTICA.....	97
ANEXO 2: PROTOCOLO DE RIEGO	101
ANEXO 3: LAMINAS DE RIEGO APLICADAS EN CAMPO	105
ANEXO 4: INFORMACIÓN DE HUMEDAD A 30 CM DE PROFUNDIDAD REGISTRADA POR LOS DATA LOGGERS	109
ANEXO 5: ANÁLISIS ESTADÍSTICO	113
ANEXO 6: RESULTADO DE LA SIMULACIÓN EN AQUACROP	115
ANEXO 7: BALANCE HÍDRICO SIMULADO EN AQUACROP	117
ANEXO 8: PANEL FOTOGRÁFICO	119

RESUMEN

El trabajo de investigación tuvo como objetivo principal simular el rendimiento y biomasa del cultivo zapallito italiano (Cucurbita pepo) en función de cuatro láminas de riego mediante el programa AQUACROP para condiciones de clima y suelo de la Universidad Nacional Agraria La Molina, se desarrolló en una parcela ubicada junto a la facultad de ingeniería agrícola cuyas dimensiones fueron de 15 metros de largo por 5 metros de ancho, la cual se dividió en 3 bloques compuestos por 4 cintas de goteo cada bloque, ordenados aleatoriamente siguiendo un diseño de bloques completamente al azar, que aplicaron una lámina de riego equivalente al 120%, 100%, 80% y 60% de la evapotranspiración diaria, la siembra se realizó el 06 de mayo del 2019 siguiendo un margen de plantación de 1 metro entre cintas de goteo y 0.4 metros entre goteros, además se monitoreó el crecimiento de la cobertura del dosel y la biomasa aérea seca en 5 y 6 fechas respectivamente, mientras que el contenido de humedad fue monitoreado a través de sensores de humedad GS-3 ubicados a 30 cm de profundidad debajo de un gotero de cada tipo de tratamiento de riego, los que registraron la información en 2 data logger desde la siembra hasta la última cosecha que fue el 06 de agosto del 2019. Se realizaron cuatro modelos en AQUACROP basados en cada tratamiento de riego, los cuales fueron calibrados con éxito, para ello fue necesario calibrar cada variable muestreada del cultivo y el contenido de humedad, por ejemplo, en el caso de la calibración de la biomasa aérea seca se obtuvo un coeficiente de correlación de Pearson (r) de 0.98 y un índice de eficiencia de Nash (EF) de 0.93-0.95% los cuales indican un ajuste muy bueno del modelo. Por lo tanto, el modelo AQUACROP es una herramienta que permite simular el rendimiento y biomasa del zapallito italiano y evaluar la eficiencia del uso del agua.

Palabras clave: AQUACROP, Tratamientos de riego, Zapallito italiano.

ABSTRACT

The main objective of the research work was to simulate the yield and biomass of the Italian zucchini crop (*Cucurbita pepo*) based on four irrigation sheets through the AQUACROP program for climate and soil conditions of the La Molina National Agrarian University, it was developed in a plot located next to the faculty of agricultural engineering whose dimensions were 15 meters long by 5 meters wide, which was divided into 3 blocks composed of 4 drip tapes each block, randomly ordered following a completely random block design, that applied an irrigation sheet equivalent to 120%, 100%, 80% and 60% of the daily evapotranspiration, the sowing was carried out on May 6, 2019 following a planting margin of 1 meter between drip tapes and 0.4 meters between droppers, in addition, the growth of canopy coverage and dry aerial biomass was monitored on 5 and 6 dates respectively, while the moisture content was monitored through GS-3 moisture sensors located 30 cm deep under a dropper of each type of irrigation treatment, which recorded the information in 2 data loggers from sowing to the last harvest, which was on August 6 from 2019. Four models were made in AQUACROP based on each irrigation treatment, which were calibrated successfully, for this it was necessary to calibrate each sampled variable of the crop and the moisture content, for example, in the case of the calibration of the dry aerial biomass a Pearson correlation coefficient (r) of 0.98 and a Nash efficiency index (EF) of 0.93-0.95% were obtained, which indicate a very good fit of the model. Therefore, the AQUACROP model is a tool that allows simulating the yield and biomass of the Italian zucchini and evaluating the efficiency of water use.

Keywords: AQUACROP, Irrigation treatments, Italian zucchini.

I. INTRODUCCIÓN

La escasez del recurso hídrico en el Perú y a nivel global es un reto que conlleva a mejorar el uso del agua, una de las actividades que más usa este recurso es el sector agrícola, por lo cual a través del uso de sistemas de riego tecnificados se mejoró la eficiencia y el manejo del agua. La demanda hídrica agrícola depende en gran parte del tipo de cultivo, pero también influye las características del suelo y el tipo de clima, por lo que la lámina que se debe aplicar a un mismo tipo de cultivo varía con la ubicación geográfica y el clima. Generalmente el agricultor aplica una lámina de riego con base empírica, para obtener determinado rendimiento en su cosecha, esta aplicación puede optimizarse a través del modelo AQUACROP el cual simula el crecimiento del cultivo y como se relaciona con el medio ambiente (tipo de clima y características del suelo) para determinada lámina de riego dando como resultado final el rendimiento del cultivo, por lo que es posible evaluar si a una lámina de riego menor se puede obtener un rendimiento similar, mejorando así la eficiencia en la aplicación del riego.

Por lo expuesto anteriormente la investigación busco evaluar si el modelo AQUACROP podía simular el cultivo zapallito italiano (Cucurbita Pepo) el cual no está registrado en la base de datos de AQUACROP. Se preparó una parcela ubicada en la Universidad Nacional Agraria La Molina en la cual se instaló un sistema de riego por goteo el cual aplico 4 diferentes láminas de riego equivalentes a un porcentaje de la evapotranspiración diaria cuya información se obtuvo de la estación meteorológica automática “ClimateMinder” ubicada cerca al área experimental. Para analizar la eficiencia del modelo agrometeorológico AQUACROP, fue necesario monitorear las principales características del cultivo y suelo para calibrar los 4 modelos que se generaron a partir de cada lamina aplicada. También se analizó los resultados de evaporación, transpiración y rendimiento del cultivo que da AQUACROP, ya que a partir de ellos se obtuvo la eficiencia del uso del agua el cual es un indicador que permite identificar mejores rendimientos de cultivo a menores consumos de agua.

OBJETIVOS

El trabajo de investigación tuvo como objetivo principal simular el rendimiento y biomasa del cultivo Zapallito Italiano (Cucurbita pepo) en función de cuatro láminas de riego mediante el programa AQUACROP para condiciones de clima y suelo de la Universidad Nacional Agraria La Molina, el cual se logró a través de los siguientes objetivos específicos:

- Monitorear las principales variables del zapallito italiano y suelo durante su periodo vegetativo.
- Realizar el análisis de sensibilidad e identificar los parámetros más sensibles de los modelos.
- Calibrar el modelo AQUACROP de zapallito italiano para cada lamina de riego y analizar la eficiencia de uso de agua que da cada modelo.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Zapallito Italiano

2.1.1. Origen y evolución del cultivo

La especie Cucurbita pepo parece tener su origen en América, concretamente en zonas próximas a México, donde se han encontrado rastros con una antigüedad superior a los 10.000 años A.C. En Estados Unidos los restos más antiguos hallados datan del año 4.000 A.C. Son muchos los que apuntan a que pudo ser domesticada a la vez en México y Estados Unidos, teniendo a Cucurbita fraterna y Cucurbita texana como antepasados silvestres respectivamente. (Andrés Ruiz, 2012)

El origen del calabacín no está del todo claro, por una parte, parece ser que procede de Asia. Su nombre aparece entre las hortalizas citadas por egipcios y existen pruebas de que también eran conocidos por los romanos. Otras fuentes atribuyen su origen a la América precolombina, concretamente en la zona de México; siendo una de las especies que introdujeron los españoles en Europa, durante la época del descubrimiento. (Zamora, 1986)

2.1.2. Características generales del Zapallito Italiano

Su nombre científico es Cucurbita pepo L. perteneciente a la familia Cucurbitaceae con origen mexicano – Centroamericano, tiene un tamaño de planta de 0.8 m y un diámetro que varía de 0.8 a 1 metro, puede sembrarse en épocas de primavera, verano u otoño en las zonas de Lima, Huaral, Chancay y Cañete. Las plagas más comunes que lo afectan, que son: Arañita roja, barrenador de frutos, gusanos de tierra, mosca minadora, mosca blanca, mosquilla de los brotes y nematodos. Al igual que plagas, también existen enfermedades comunes los cuales debe prevenirse y son: Chupadera, Marchitez, Mildú, Oidiosis, pudrición acuosa o blanda y virosis. Para tener un buen desarrollo de los frutos, el suelo debe tener el PH en un rango de 5.5 – 6.8 el cual se considera óptimo para el zapallito italiano, normalmente la cosecha comienza a los 45 días, el momento óptimo varía con el tamaño del fruto, se consideran zapallitos miniatura o pequeños aquellos que tienen una longitud de 8 a 12 cm de longitud, los medianos varían de 15 a 18 cm y los grandes aquellos

con una longitud mayor a 20cm. El rendimiento esperado de los frutos varía también según el tamaño, los pequeños tienen un rendimiento de 7.5 T x ha⁻¹, los medianos 14.0 T x ha⁻¹ y los grandes 21 T x ha⁻¹. (Ugás R., S. Siura, 2000)

El zapallito italiano de variedad zucchini tiene un bajo aporte calórico y es muy rico en nutrientes, además es una fuente de vitamina A y C. En la tabla 1 se muestra la composición nutricional.

Tabla 1: Composición nutricional del Zapallito italiano

Composición nutricional	Unidad
Energía	13 kcal
Proteínas	0.6 g
Fibra	0.5 g
Calcio	24 mg
Hierro	0.4 mg
Magnesio	8 mg
Sodio	1 mg
Potasio	140 mg
Fósforo	17 mg
Vitamina C	22 mg
Vitamina A	4.5 mg

Fuente: Zegarra Hinojosa, 2012

2.1.3. Requerimiento climático y condiciones de suelo

Las características climáticas a las que puede estar sometido el zapallito italiano es como máximo una temperatura de 32°C y como mínimo una temperatura de 10°C, teniendo como condiciones óptimas el rango entre 18 °C y 27°C, además es exigente en luminosidad por lo que una mayor radiación solar traerá un mejor rendimiento en la cosecha. En lo referente a las condiciones de suelo, el zapallito italiano puede adaptarse a diferentes tipos de suelo, pero crece mejor en aquellos que tienen una textura franca y bien drenados y que tienen un pH óptimo en un rango de 5.5 – 6.8, además es moderadamente resistente a la salinidad del suelo, requiere abundante materia orgánica y un riego constante. (Huacac Trujillo, 2014)

2.1.4. Características Fenológicas

El zapallito italiano, según Maroto (2000), tiene hojas pecioladas con limbos profundamente lobuladas, con estrechamientos marcados y bordes aserrados. El color de las hojas va de verdad claro a oscuro dependiendo de la variedad, además en ocasiones presenta pequeñas manchas blancas. Sus flores son unisexuales, es decir en una misma planta existen flores masculinas y femeninas, son axilares, grandes y acampanadas. Consta de 5 pétalos de color amarillo, los tallos de las flores femeninas son cortas, gruesas y de sección irregular mientras que los tallos de las flores masculinas pueden alcanzar una longitud de 40 cm. Serrano (1979)

Becerra (1958) indica que el periodo vegetativo varía de dos a 3 meses y que el inicio de la cosecha se reconoce por la característica de los frutos, el cual según Maroto (2000) es pepónide, de forma ovalada alargada, cilíndrica, de superficie lisa y sin cavidad central que crece del ovario inferior de la flor femenina. Frecuentemente tiene un color verde y amarillento, además en su interior contiene numerosas semillas. Estudios realizados a la biomasa aérea seca aplicando una variedad de nutrientes dan como resultado crecimientos diferentes, por ejemplo en México según (Rodas-Gaitán, 2012) con una densidad de plantación de 26600 plantas x ha⁻¹ se obtuvo una biomasa aérea seca de 6.46 T x ha⁻¹, mientras que un estudio en un invernadero en una zona árida de argentina obtuvo una biomasa aérea seca de 2.98 T x ha⁻¹ (Orozco et al., 2016), otro estudio realizado en México con una densidad de plantación de 14800 plantas x ha⁻¹ resulto con una biomasa aérea seca de 6.22 T x ha⁻¹ (Victoriano, 2015). Un estudio realizado en México indica que en etapas iniciales el zapallito italiano puede tener una longitud de raíz de 0.19 a 0.3 m (Mata, 2004), comúnmente la profundidad radicular máxima varía de 0.6 a 1 m (Food and Agriculture Organization of the United Nations(FAO), 2006).

El rendimiento de las cosechas varía dependiendo de las condiciones de clima, suelo, densidad de siembra, materia orgánica, etc. Según Alcina Grau (1959), los rendimientos varían de 15 T x ha⁻¹ a 20 T x ha⁻¹ en verano, mientras que según Douglas (1998), varia de 3000 a 4000 docenas x ha⁻¹. (Montenegro Rojas, 2018) indica que del año 2008 al 2012 el rendimiento vario de 22.736 T x ha⁻¹ a 25.985 T x ha⁻¹ respectivamente, mientras que según (Ugás R., S. Siura, 2000) el rendimiento varía de 14 T x ha⁻¹ a 21 T x ha⁻¹ para tamaños medianos y grandes respectivamente.

2.1.5. Manejo de campo de zapallito italiano

Para sembrar el zapallito italiano debe esperarse los periodos de verano, primavera y otoño ya que el crecimiento peligra en periodos fríos, se pueden sembrar 2 ó 3 semillas por golpe en caso no tenga una buena germinación, no es recomendable realizar trasplante a raíz desnuda, debe hacerse por macetas u otro método. (Astorquizaga, 2009). Durante todo el periodo vegetativo es recomendable, según Becerra (1958), dar riegos frecuentes y seguir así aun cuando ya se ha iniciado la primera cosecha, debido a que a medida que se va cosechando siguen desarrollándose nuevas flores, cabe resaltar que el momento de la cosecha será definido por el tamaño de los frutos, los pequeños tienen un tamaño aproximado de 8 a 12 cm, los medianos de 15 a 18 cm y los grandes mayores a 20 cm de longitud, es decir cuando el fruto alcance el tamaño deseado se podrá cosechar para dejar desarrollar los frutos de las nuevas flores. (Ugás R., S. Siura, 2000)

2.2. Modelo AQUACROP

2.2.1. Descripción del modelo AQUACROP

El modelo AQUACROP simula las interacciones entre la planta y suelo del cultivo, esta ocurre en la zona de raíz desde la cual la planta extrae agua y nutrientes. El manejo de campo (Fertilidad del suelo, etc.) y el manejo del riego (Lamina de riego, frecuencia, etc.) influyen en este proceso de interacción, además la atmosfera a través de la radiación solar, evapotranspiración del cultivo y Co₂ influyen en el crecimiento del cultivo y la raíz por lo cual se considera a la atmosfera dentro de este sistema de interacciones, por último, la capa freática si es poco profunda puede interferir en el sistema ya que ascendería por aumento capilar. (Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2017)

En la figura 1 se muestra el proceso de simulación del rendimiento en AQUACROP, mediante 4 pasos que hacen que el modelo sea robusto y eficaz. Los pasos de simulación de AQUACROP son: 1) El primer paso consiste en la simulación del desarrollo del dosel, el cual se basa los coeficientes de crecimiento y la cobertura máxima observada. 2) El segundo paso es la simulación de la transpiración del cultivo el cual se basa en la cobertura del dosel simulada en el primer paso y coeficientes de transpiración y estrés. 3) en el tercer paso se simula la biomasa aérea seca (B) la cual se basa en la transpiración del cultivo, la evapotranspiración y la productividad del agua normalizada. 4) Finalmente simula el rendimiento del cultivo a través de la biomasa aérea seca y el índice de cosecha de referencia. (Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2017)

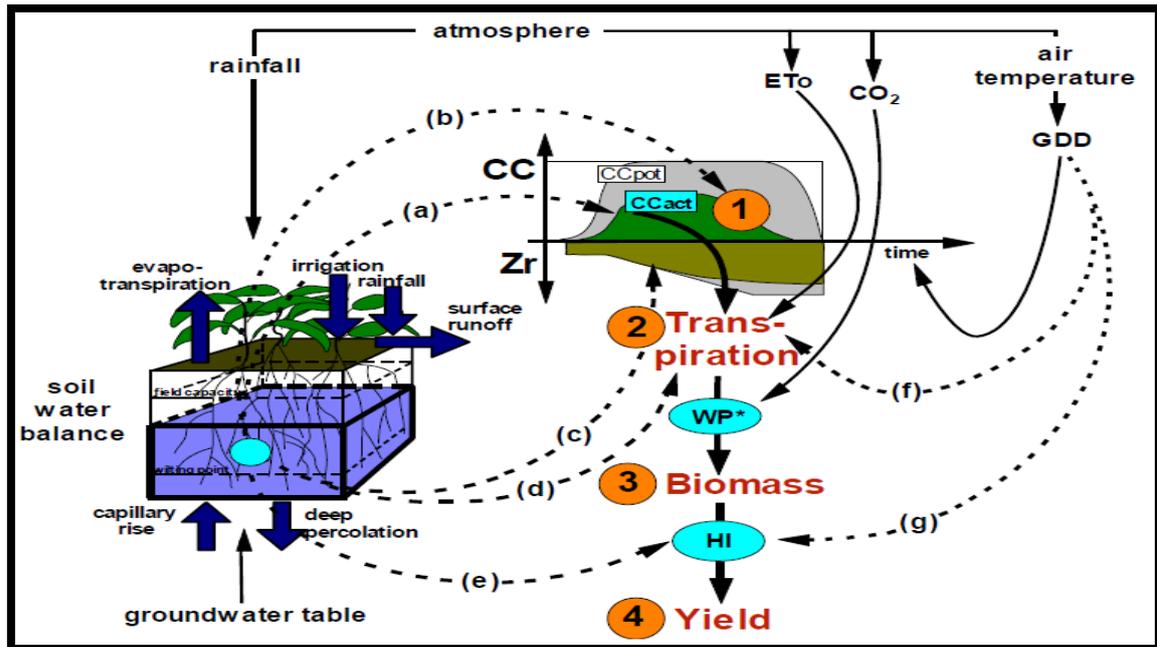


Figura 1: Esquema de cálculo de AQUACROP con indicación de los 4 pasos, y los procesos (flechas de puntos) afectados por el estrés hídrico (de la A a la E) y el estrés de la temperatura (de la F a la G).

Fuente: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2017)

Donde, CC es cubierta de dosel verde; Zr, profundidad de enraizamiento; ETo, evapotranspiración de referencia; WP *, productividad de agua de biomasa normalizada; HI, índice de cosecha; y GDD, día de grado creciente. Estrés hídrico: (a) frena la expansión del dosel, (b) acelera la senescencia del dosel, (c) disminuye la profundización de la raíz, pero solo si es grave, (d) reduce la apertura y la transpiración de la estoma y (e) afecta el índice de cosecha. El estrés por temperatura fría (f) reduce la transpiración del cultivo. El estrés por temperatura caliente o fría (g) inhibe la polinización y reduce la HI.

(Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2017)

2.2.2. Descripción del proceso de simulación de AQUACROP

El proceso de simulación de AQUACROP se realiza mediante una secuencia de 4 pasos, que son: Desarrollo de la cubierta del dosel, transpiración del cultivo, biomasa aérea seca y desarrollo del cultivo. Los cuales, dependen cada uno del resultado calculado en el paso anterior. Además, puede ser simulado diaria o periódicamente dependiendo de la información disponible a continuación, se describirá cada paso y que parámetros o procesos intervienen en cada una de ellas.

a. Desarrollo de la cubierta verde del dosel (CC)

AQUACROP simula la cubierta verde del dosel a través de la fracción de la superficie del suelo cubierta por el dosel, este varía desde un valor de 0 % en la siembra hasta un valor máximo de 100% cuando la superficie del suelo está cubierta en su totalidad por el dosel. Los factores que influyen en su cálculo son: 1) Los de estrés hídrico, el cual reduce la expansión del dosel y en casos extremos puede provocar la senescencia temprana. 2) Los parámetros específicos del cultivo (Cobertura máxima del dosel, días de emergencia, etc.)

b. Transpiración del cultivo (Tr)

La simulación de la transpiración del cultivo (Tr) es uno de los pasos más importantes ya que a partir de este se calcula la biomasa, los parámetros que intervienen en el proceso de cálculo de la transpiración son: 1) El crecimiento de la cobertura del dosel, 2) Coeficiente de transpiración del agua, 3) Coeficiente de transpiración máxima, 4) Coeficiente de transpiración del cultivo y 5) La evapotranspiración. Con estos parámetros se calcula la transpiración del cultivo diaria o mensual dependiendo de la información disponible, ya que es directamente proporcional al CC por lo cual varía a lo largo del ciclo de vida del cultivo.

c. Biomasa aérea (B)

AQUACROP considera solo la simulación de la biomasa aérea seca (B) es decir todo el cultivo menos las raíces y el fruto, los parámetros que influyen en el proceso de cálculo de B son: 1) Coeficientes de estrés por fertilidad, 2) Productividad del agua normalizada y 3) La relación entre la sumatoria de la transpiración (Tr) y la evapotranspiración. Con estos parámetros disponibles AQUACROP calcula y simula el crecimiento de la biomasa aérea seca a lo largo del ciclo de vida del cultivo.

d. Rendimiento del cultivo (Y):

El último paso en el proceso de simulación es el cálculo del rendimiento del cultivo el cual se basa en: 1) La biomasa aérea seca, 2) Índice de cosecha de referencia (HIO) y 3) Un multiplicador cuyo valor depende de cuando ocurrió el estrés hídrico, por ejemplo, si el estrés hídrico ocurrió antes de la etapa de la floración, el multiplicador será positivo, es decir incrementará el valor de HIO. Una vez terminado el último paso, culmina el proceso de simulación y se puede observar los resultados en el programa AQUACROP.

En la figura 2 se muestra un esquema que muestra los procesos y las descripciones de los factores que influyen en cada paso de la simulación de AQUACROP, la cual fue extraída del Manual de referencia de AQUACROP del año 2017.

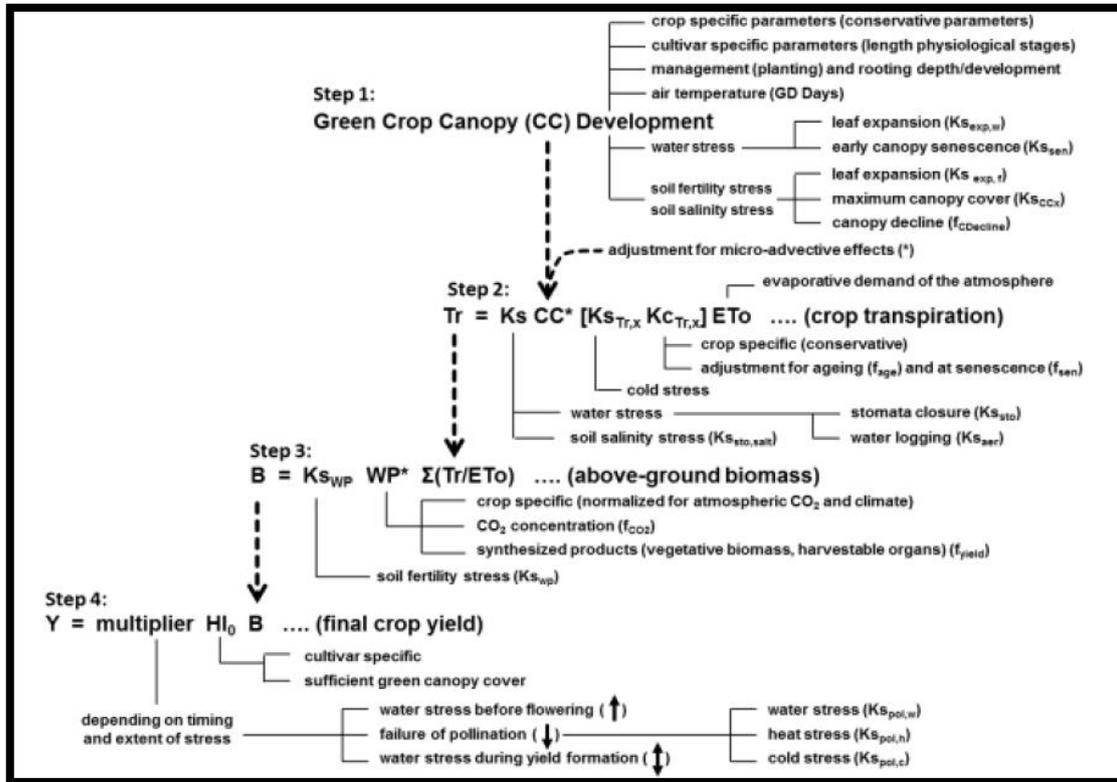


Figura 2: Esquema de cálculo de AQUACROP

Fuente: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2017)

2.2.3. Información de ingreso a AQUACROP(Input)

La información que se debe ingresar al programa AQUACROP consiste en datos climáticos, características del suelo, características del cultivo, y prácticas de manejo que definen el entorno en el que se desarrollará el cultivo.

a. Información climática

a.1 Evapotranspiración de referencia

La evapotranspiración de referencia (ETo) es aquella generada en una superficie vegetada en condiciones estándar, la condición estándar es aquella que no genera limitaciones en la producción del cultivo a condiciones climáticas dadas.

La FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación), desarrollo un método estandarizado para calcular la ETo a partir de la data climática local, el cual fue llamado FAO Penman – Monteith, este corrige las deficiencias del método de Penman, esta puede ser calculada a través del software ETo calculator, también puede ingresarse la data climática local y AQUACROP calcula de forma automática la ETo o se puede ingresar el valor de forma directa.

a.2 Temperatura máxima y mínima del aire(°C)

La temperatura del aire se mide con termómetros, termistores que están incorporados en una estación meteorológica a 2 metros sobre la superficie del suelo. De la data muestreada se deberá extraer la temperatura máxima (Tx) y temperatura mínima (Tn), que podrá ser diaria o mensual según la información disponible.

a.3 Humedad relativa del aire (%)

La humedad relativa del aire es la diferencia entre la saturación y la presión de vapor real, esta se mide a través de un higrómetro o un higrógrafo instalado en una estación meteorológica. Cuando no se tienen datos precisos se puede estimar asumiendo que la temperatura a punto de rocío (Tdew) es cercana a la temperatura mínima diaria (Tn).

a.4 Datos de radiación solar

La radiación solar es la energía que llega a través de la luz del sol, esta puede medirse a través de piranómetros, radiómetros o solarímetros. Se mide en ($\text{Watts} \times \text{m}^2^{-1}$) y es un parámetro necesario para estimar la evapotranspiración de referencia (ETo)

a.5 Velocidad del viento ($\text{Km} \times \text{h}^{-1}$)

La velocidad del viento cumple la función de mover el vapor del aire a causa de la evaporación o transpiración en la zona de cultivo. Se mide con anemómetros instalados en las estaciones meteorológicas a una altura de referencia de 2 metros sobre la superficie.

b. Características del suelo

La información de suelo necesaria para simular un cultivo en AQUACROP se divide en dos, las características físicas del suelo y el movimiento del agua en el suelo.

b.1 Características físicas del suelo

Como data de entrada el modelo AQUACROP requiere la siguiente información:

- Textura del suelo: Proporción de arena, limo y arcilla con respecto a la masa total del suelo.
- Densidad aparente del suelo: La densidad aparente del suelo indica la cantidad de masa seca por unidad de volumen del suelo.
- Contenido volumétrico de agua del suelo: Se requiere conocer el contenido de agua en capacidad de campo (FC), Contenido de agua a punto de marchitez (PWP) y Contenido de agua a punto de saturación (SAT).
- Capacidad de campo (FC): La capacidad de campo se alcanza cuando las fuerzas que retienen el agua en el suelo están en equilibrio con las fuerzas gravitacionales que tiran del agua hacia abajo, esta se considera como condición óptima para el crecimiento del cultivo.
- Punto de marchitez permanente (PWP): El punto de marchitamiento permanente (PWP) se alcanza cuando el suelo esta tan seco que las raíces ya no pueden extraer agua.
- Cantidad total de agua disponible (TAW): Dado que la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente son, respectivamente los límites superior e inferior del agua extraíble de la planta, determinan la cantidad total de agua (TAW) que puede utilizar el cultivo.

b.2 Movimiento de agua en el suelo

- Drenaje de agua en el suelo (Infiltración y Percolación): La infiltración y percolación en AQUACROP se basa en una función de drenaje τ (tau) la cual es proporcional a la conductividad hidráulica en saturación del suelo (K_{sat}).
- Aumento Capilar (CR) de una capa freática poco profunda: AQUACROP considera el aumento capilar cuando existe una capa freática poco profunda, para calcularlo utiliza la información de las características del suelo y la conductividad hidráulica de saturación a través de la cual se mueve hacia arriba.
- Escorrentía superficial (RO): La escorrentía superficial es simulada mediante el método del número de curva (CN) el cual tiene un valor predeterminado que se deriva del K_{sat} del primer horizonte del suelo. Además, cuando se usa un método de riego tecnificado ya sea aspersión o goteo, no se considera la escorrentía en la simulación porque se considera que el riego está totalmente controlado.

c. Características del cultivo

El programa AQUACROP tiene una base de datos que contiene información de cultivos que ya han sido calibrados y validados sobre los cuales se puede trabajar. Pero es necesario verificar los parámetros de cultivo específicos y no conservadores estos varían con la variedad del cultivo, la ubicación geográfica, etc. Y pueden requerir un ajuste con valores tomados de campo, para ello es necesario muestrear las variables y compararlas para poder calibrar el modelo a nuestras condiciones, los parámetros que engloban el módulo del cultivo en AQUACROP son:

c.1 Condiciones iniciales y desarrollo del cultivo

Los parámetros que están dentro de las condiciones iniciales y desarrollo del cultivo son:

- Método de plantación: Puede ser siembra directa o trasplante.
- Densidad de plantación: Depende del área y margen de plantación, este parámetro es importante porque a partir de ella se calcula el coeficiente de cobertura inicial.
- Desarrollo de la cobertura verde del dosel: AQUACROP expresa el crecimiento de la cobertura del dosel del cultivo (CC) como la fracción de la superficie del suelo cubierta por el dosel:

$$CC = \frac{\text{Superficie del suelo cubierta por el dosel verde}}{\text{Unidad de superficie del terreno}} \quad (1)$$

La cubierta verde del dosel varía desde cero en la siembra (0% de la superficie cubierta por el dosel verde) hasta un valor de 1 cuando alcanza el máximo crecimiento (100% de la superficie del suelo cubierta por el dosel).

- Máxima cobertura del dosel (CCx): Varía según el tipo de cultivo y la densidad de siembra, además este valor debe ser medido en campo o tomado de investigaciones anteriores.
- Tiempo de emergencia: En caso de que la siembra haya sido directa, se debe ingresar el tiempo en días en el que ocurrió la emergencia.
- Tiempo para alcanzar la máxima cobertura del dosel (CCx): El valor de este parámetro depende de cada cultivo y el valor debe ser tomado en campo o de algún estudio anterior.
- Tiempo para comenzar la senescencia del dosel: Al igual que CCx debe ser medido en campo o tomado de estudios anteriores.

En la figura 3 se puede observar un gráfico extraído del manual de referencia de AQUACROP elaborado por la FAO en la cual se muestra el desarrollo de la cobertura del dosel en condiciones no limitantes (sin estrés).

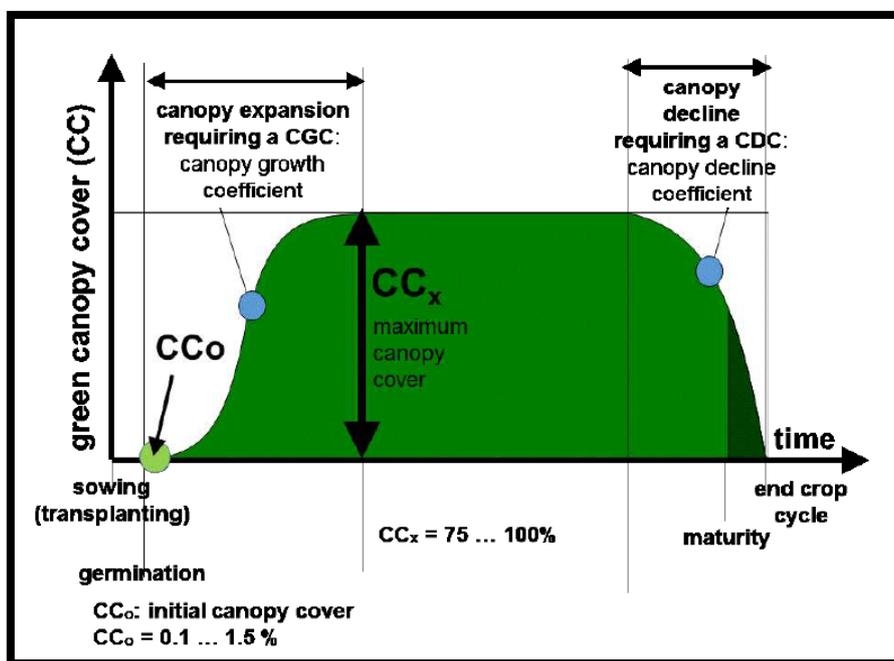


Figura 3: Desarrollo de la cobertura del dosel para condiciones no limitantes.

Fuente: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2017)

c.2 Floración, formación del rendimiento y profundidad de la raíz

Los parámetros usados por AQUACROP para caracterizar el desarrollo de la flor, el rendimiento y la raíz son:

- Tiempo de inicio de la floración: Este valor se registra cuando comienza la etapa de floración del cultivo.
- Duración de la floración: La duración de la etapa de floración se monitorea en campo y normalmente termina antes de la última cosecha.
- Profundidad máxima y mínima de enraizamiento: Los valores de este parámetro varían con el cultivo y es necesario muestrear al comienzo del ciclo de vida y cuando se alcanza el máximo crecimiento.
- Velocidad de profundización de las raíces: Este valor se obtiene a partir de diferentes muestreos en campo, ya que varía con las características físicas y químicas del suelo.

c.3 Evapotranspiración

- Coeficiente de transpiración del cultivo (Kctr)

El coeficiente de transpiración del cultivo es un factor muy importante en la simulación de la transpiración del cultivo, la cual es la cantidad de agua que pierde el cultivo por efecto de la radiación solar. AQUACROP simula la transpiración del cultivo multiplicando la evapotranspiración de referencia ingresada, el coeficiente de estrés hídrico, el coeficiente de estrés por frío y Kctr.

$$Tr = Ks \times CC * x (Ks_{Tr,x} \times Kc_{Tr,x}) Eto \quad (2)$$

El factor que puede ajustarse dependiendo de la transpiración del cultivo es Kctr, ya que al aumentar su valor incrementa el consumo de agua por parte del cultivo en la simulación realizada por AQUACROP y viceversa.

En la figura 4 se puede observar un extracto del manual de referencia de AQUACROP elaborado por la FAO en la cual se muestra el paso 2 en el proceso de simulación del cultivo, el corresponde a la transpiración y los factores que intervienen en ella.

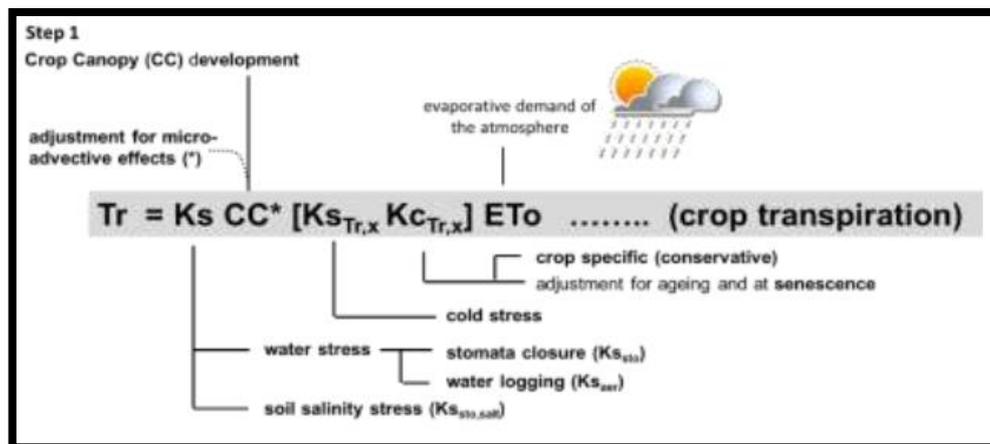


Figura 4: Factores que afectan la simulación de la transpiración

Fuente: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2017)

c.4 Productividad del agua y el índice de cosecha de referencia

- Productividad normalizada del agua (WP*)

Para poder entender mejor el parámetro productividad normalizada del agua es necesario entender el concepto de biomasa. La biomasa aérea seca simulada por AQUACROP corresponde a todos los productos biológicos que se acumulan a lo largo del crecimiento del cultivo, estos son los tallos, hojas, flores, etc. A excepción de las raíces y los frutos, el cálculo de B es el tercer paso en la secuencia de simulación de AQUACROP y depende de 3

variables: La transpiración del cultivo (Tr), la evapotranspiración (Eto) y la productividad del agua de la biomasa normalizada para el clima (WP*).

$$B = K_{s_{WP}} \times WP^* \times \sum \frac{Tr_i}{Eto_i} \quad (3)$$

En la figura 5 se puede observar el esquema que representa el cálculo del paso 3 de cálculo de la biomasa aérea seca elaborada por la FAO, en esta se muestra todas las variables que intervienen, además indica que la producción de biomasa está sujeta a un coeficiente de estrés por fertilidad el cual puede aumentar o disminuir el valor de B dependiendo de las condiciones del manejo de campo.

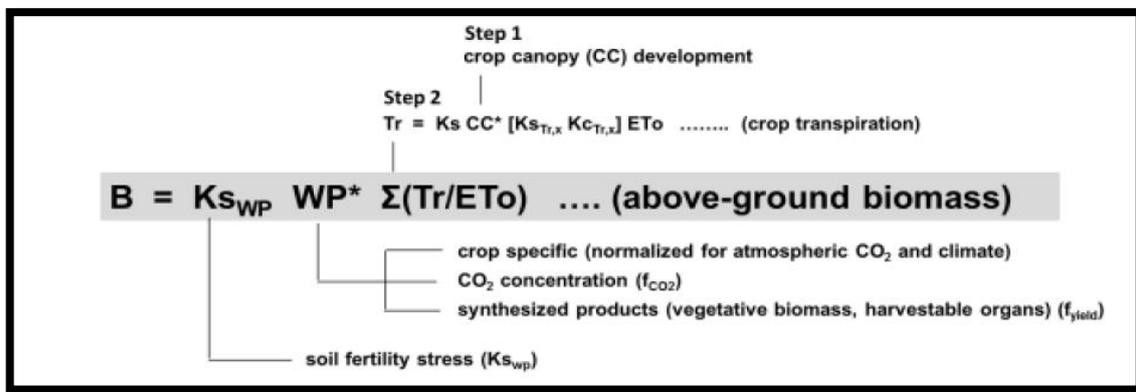


Figura 5: Factores que afectan la simulación de la producción de biomasa aérea seca

Fuente: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2017)

El modelo AQUACROP diferencia la productividad de agua de biomasa (WP) y productividad del agua ET (WPET) que es llamada eficiencia del uso del agua, los cuales serán definidos a continuación:

Productividad de agua de biomasa (WP): Hace referencia a la cantidad de biomasa que se puede obtener (B) con una cierta cantidad de agua transpirada (Tr).

$$WP = \frac{\text{Biomasa producida (kg)}}{\text{Agua transpirada (m3)}} \quad (4)$$

El termino productividad de agua de biomasa normalizada (WP*), es definida como WP, pero normalizada para el clima, es decir puede ser aplicable a diversos lugares, estaciones y concentraciones de CO₂, este valor debe ajustarse dependiendo de la producción de biomasa aérea seca del cultivo.

Productividad del agua ET (WPET): Es la relación entre el rendimiento del cultivo (Y) y la evapotranspiración (Eto), este indicador permite evaluar el rendimiento del sistema, es decir

permite analizar hasta qué punto se puede maximizar el rendimiento por unidad de agua evapotranspirada.

$$WPET = \frac{\text{Rendimiento producido (kg)}}{\text{Evapotranspiración (m}^3\text{)}} \quad (5)$$

- Índice de cosecha de referencia

El parámetro índice de cosecha de referencia está relacionado al cálculo del rendimiento del cultivo (Y), el cual corresponde al último paso en la secuencia de 4 pasos de simulación de AQUACROP, Y se expresa como un porcentaje de la biomasa aérea total y se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$Y = HI * B \quad (6)$$

Donde HI es el índice de cosecha, parámetro que está relacionado al índice de cosecha de referencia a través de un multiplicador cuyo valor depende de si existe o no estrés en el desarrollo del cultivo y dependiendo de en qué etapa del desarrollo fenológico del cultivo ocurra puede generar efectos positivos o negativos haciendo que HI se aleje de su valor de referencia (HI₀) el cual debe ser ajustado en el modelo según el rendimiento esperado o medido en campo. Es decir, en condiciones no limitantes el valor que debería alcanzar HI es el valor ingresado de HI₀ en el modelo AQUACROP.

En la figura 6 se observa el esquema que representa los cálculos necesarios para culminar el paso 4 que es el rendimiento del cultivo. Como ese puede observar el efecto del estrés hídrico puede afectar de forma positiva o negativa al índice de cosecha de referencia lo cual influye en el rendimiento de cultivo final calculado.

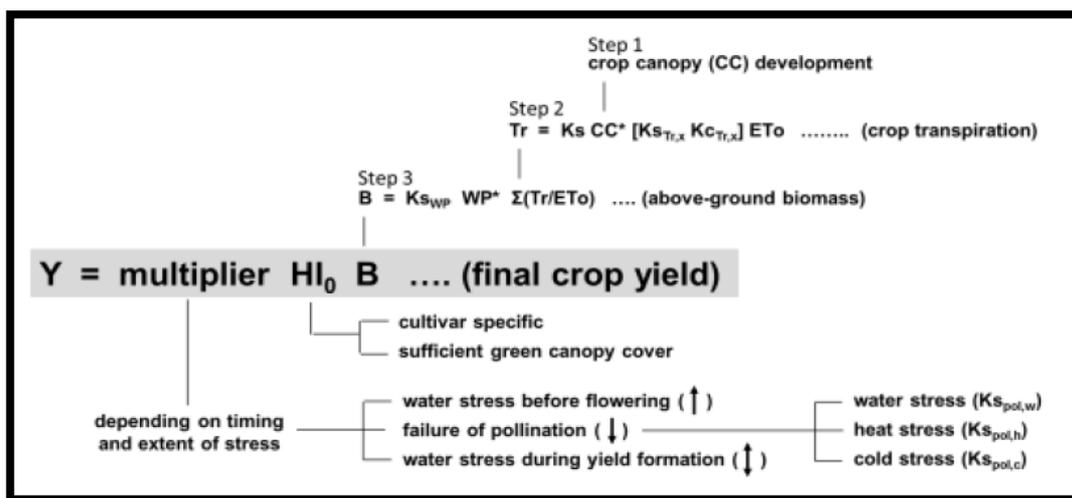


Figura 6: Factores que afectan la simulación del rendimiento

Fuente: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2017)

c.5 Coeficientes de estrés del cultivo

AQUACROP simula el estrés del cultivo a través del coeficiente “Ks”, el cual está relacionado a: i) Estrés por exceso o escases de agua; ii) Estrés por temperatura; y iii) Estrés por salinidad. El valor del coeficiente “Ks” tiene un rango de variación de cero a uno en el cual el valor de cero indica un estrés total y uno que el cultivo se encuentra sin algún tipo de estrés. A continuación, se describirá los tipos de estrés mencionados:

- Escases de agua

El contenido de humedad que puede ser fácilmente aprovechado por la raíz (TAW) se encuentra entre el punto de capacidad de campo (FC) y marchitez permanente (PWP), los cuales pueden ser medidos a través de un tensiómetro el cual indica un valor de 0% en FC y 100% en PWP, para ello es necesario analizar el comportamiento de cada cultivo a medida que el contenido de humedad se acerca al PWP para medir el grado de estrés por escases de agua ya que este tipo de estrés genera el cierre estomas que es representado en AQUACROP mediante el coeficiente “Kssto”.

- Estrés por exceso de agua

La cantidad de agua que puede ser retenida por el suelo es el punto de saturación (n), cualquier contenido de humedad por encima de ella genera una acumulación de agua en la superficie del suelo que no se infiltra sino empieza a percolar, además en algún punto por encima de el de saturación ocurre escases de aire en la zona de raíz debido a que los poros son acumulados por agua, esto causa estrés por deficiencia de aire en el cultivo el cual es representado en AQUACROP por el coeficiente “Ksaer”.

- Estrés por temperatura del aire

La temperatura del aire influye en el desarrollo del cultivo, por lo que AQUACROP considera el estrés que podría causar una temperatura muy fría o muy caliente en su desarrollo, para lo cual es necesario ingresar al programa la temperatura base y temperatura superior, que son los límites mínimos o máximos en la que cualquier temperatura fuera de estos límites no permitiría el desarrollo del cultivo. Además, también es necesario ingresar el coeficiente de estrés por temperatura fría (Kstr) el cual, dependiendo del valor, puede generar cierto grado de estrés en el cultivo.

- Estrés por salinidad del suelo

Este tipo de estrés depende de la salinidad del campo o del agua de riego, que es la conductividad eléctrica promedio de la pasta del suelo de saturación en la zona de raíz, la

cual puede ser medida en campo o puede observarse si el cultivo muestra algún tipo de estrés por salinidad en su desarrollo.

En la figura 7, se muestra un gráfico que representa el balance hídrico y los coeficientes K_{ssto} y K_{saer} , los cuales son los umbrales o límites para el estrés hídrico, siendo K_{saer} el límite superior y K_{ssto} el límite inferior.

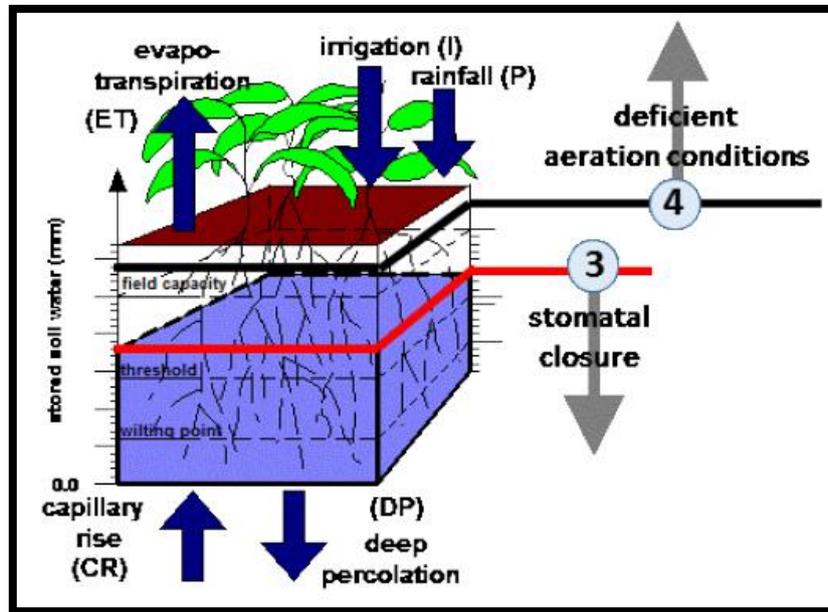


Figura 7: Umbrales para el cierre estomático (3) y condiciones de aireación deficientes (4) que afectan la transpiración del cultivo.

Fuente: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2017)

d. Riego

d.1 Método de riego

En el modelo AQUACROP se pueden usar los siguientes tipos de riego:

- Método de riego el secano: El cual considera como aporte de riego a la lluvia, por lo que no se considera una programación de riego.
- Método de riego por goteo y aspersion: En ambos métodos el programa de riego puede generarse en AQUACROP a través de diversas condiciones o se puede ingresar el plan de riego que se usó en campo para evaluar su eficiencia en el uso de agua.

d.2 Generar horarios de riego

Cada tipo de riego debe ser ingresado con una programación de aplicación, esta puede generarse en AQUACROP dependiendo de los criterios de cuándo debe aplicarse y cuanta cantidad de agua se aplicará, a continuación, se explicará detalladamente:

- El criterio de riego de “cuando debe aplicarse” tiene dos opciones, se puede aplicar el riego en un plazo fijo de días o puede aplicarse cada que el contenido de humedad en la zona de raíz se agote hasta cierto porcentaje especificado.
- El criterio de cuánto debe aplicarse, depende de la lámina de agua de riego necesaria para que el contenido de humedad en la zona de raíz alcance la capacidad de campo.

d.3 Programas de riego especificados

El modelo AQUACROP permite evaluar programas de riego que se han usado en campo o que se van a usar en algún cultivo, para ello es necesario ingresar la siguiente información:

- Tiempo de aplicación: El periodo de tiempo o intervalos entre aplicaciones de riego, puede ser diario, inter diario, cada 15 días, etc. En caso de que se quiera evaluar un programa de riego que se aplicó en campo, es necesario tener el registro intervalos de riego.
- Lamina de aplicación: La cantidad de agua aplicada a través del riego debe ser medida o calculada, en el caso de goteros de riego se puede calcular con la información de su manual de especificaciones en la cual se encontrará el caudal que aporta por hora, este dato con el tiempo de riego nos dará como resultado la lámina aplicada por día.
- Calidad del agua: La conductividad eléctrica (CE) debe ser considerada e ingresada junto con el tiempo y cantidad de aplicación de riego en caso el agua sea de baja calidad o se observen efectos de la salinidad en el cultivo.

d.4 Riego deficitario

El riego deficitario es una cantidad de agua insuficiente para que el cultivo se desarrolle con normalidad, ocasionando estrés hídrico por lo que su cobertura del dosel, biomasa y rendimiento disminuirán dependiendo del grado de estrés que tenga. Es necesario evaluar hasta qué punto el cultivo puede soportar un riego deficitario y en qué grado disminuye su rendimiento, porque al aplicar una menor cantidad de agua se puede maximizar la eficiencia de uso del agua.

2.2.4. Interfaz y simulación en AQUACROP

Los parámetros de entrada que usa AQUACROP están en gran parte, disponibles en diferentes trabajos de investigación o pueden medirse a través de métodos simples. La data de ingreso son características del cultivo, características del suelo, datos meteorológicos de la zona de trabajo, características del cultivo y el manejo de campo; con todas estas características AQUACROP podrá definir el entorno en el cual se desarrollará el cultivo. (Raes & van Gaalen, 2017)

En la figura 8 se presenta la interfaz principal de AQUACROP en la que se observan las opciones disponibles para realizar la simulación. Como se puede observar los títulos de cada opción son: Clima, Cultivo, Practicas de Manejo y Suelo. En los cuales se debe introducir: i) Las características del suelo, ii) Data climática de la zona de estudio, iii) Las características del cultivo que se va a modelar y iv) La gestión o manejo de campo.

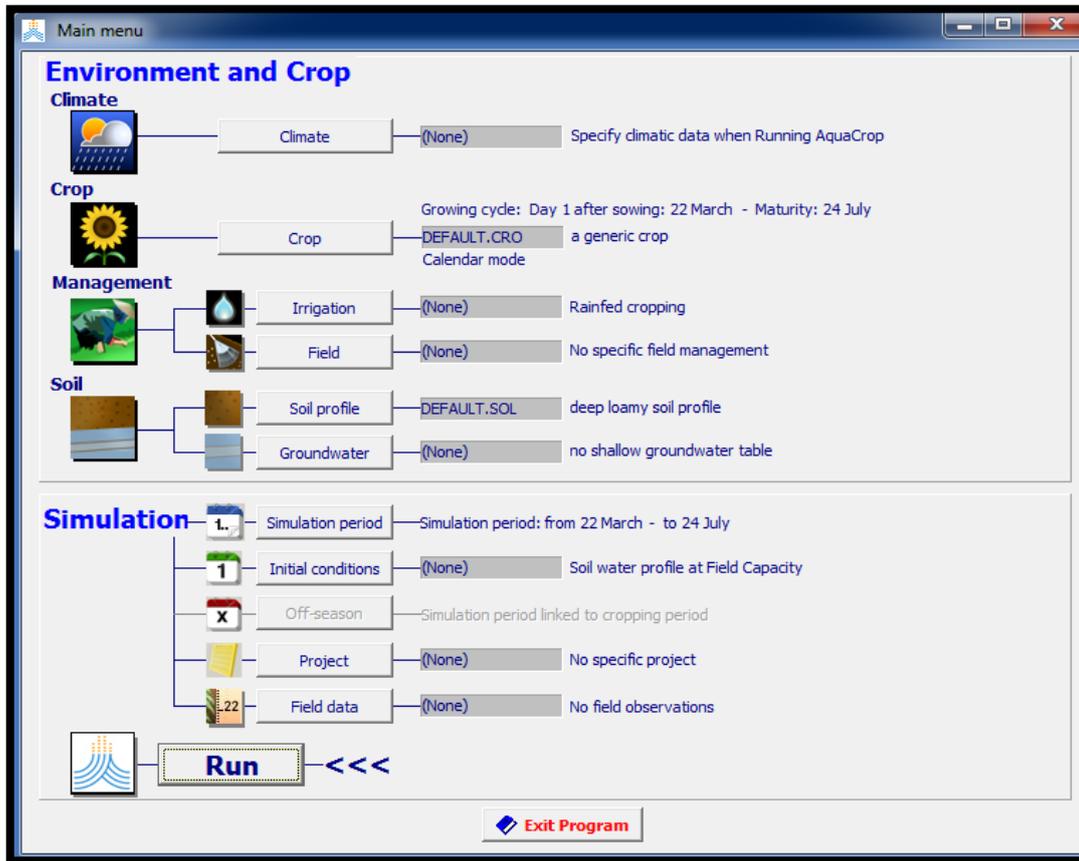


Figura 8: Interfaz del programa AQUACROP

Ahora se describirán los módulos del programa AQUACROP y los principales parámetros que deben ingresarse para poder caracterizar el cultivo y su interacción con el entorno.

a. Clima

En el módulo clima se debe ingresar la data meteorológica de la zona de estudio, para ello será necesario contar con una estación meteorológica cercana o en la zona de estudio de la cual se deberá extraer la siguiente información para ingresarla a AQUACROP:

- Precipitación
- Temperatura del aire máxima y mínima
- Evapotranspiración (ET_o)

Cabe resaltar que esta información es la necesaria para simular el modelo en AQUACROP, pero para calcular la evapotranspiración se requiere también información de: Velocidad del viento, radiación solar, etc. La cual puede ingresarse al programa “ETo Calculator” de la FAO y calcular de forma rápida la ETo, en caso la estación meteorológica genere de forma automática la ETo se podrá ingresar de forma directa a AQUACROP.

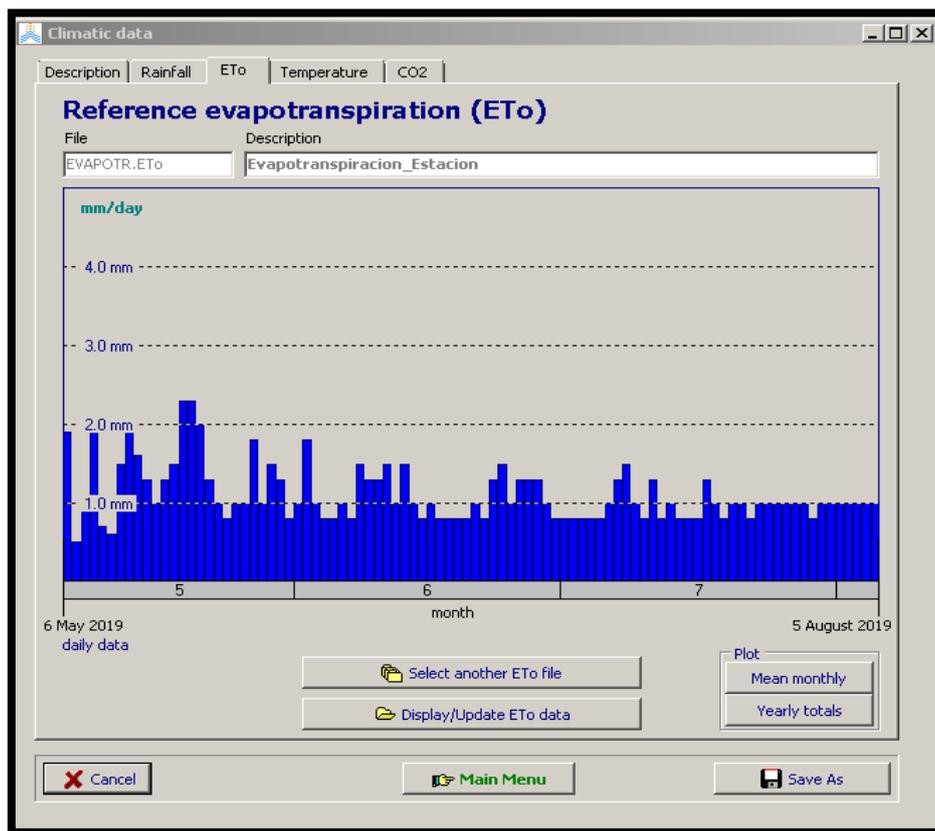


Figura 9: Modulo clima de la interfaz AQUACROP

b. Cultivo

Para poder simular correctamente el crecimiento del dosel, biomasa y la producción del cultivo será necesario ingresar información de cómo el cultivo se desarrolló a lo largo de su crecimiento y cómo fue su interacción con el medio ambiente, por lo cual AQUACROP divide el módulo de cultivo principalmente en los siguientes cuatro sub módulos:

b.1 Desarrollo del cultivo

Este sub módulo define como se desarrolla el cultivo con las condiciones de clima y terreno ingresadas desde la germinación hasta la última cosecha, el módulo está sub dividido en cuatro partes importantes los cuales se describirán a continuación:

- Cobertura inicial del dosel: En este apartado debe ingresarse la densidad de plantación, a partir de la cual AQUACROP estima el porcentaje inicial de cobertura del dosel.
- Desarrollo de la cobertura del dosel: Aquí será ingresada la mayor cantidad de información del cultivo, por ejemplo: En qué día después de la siembra ocurrió la emergencia, la máxima cobertura del dosel, la senescencia y la madurez. También será necesario ingresar el porcentaje de cobertura del dosel máximo y en qué momento empieza a comenzar el declive del dosel.
- Floración y formación del rendimiento: La información que requiere esta sub división está relacionada a la duración y el inicio de la floración la cual será ingresada para estimar el tiempo de desarrollo de los frutos.
- Desarrollo de la raíz: Para ingresar la información necesaria en esta sub división, se deberá sacar muestras en diferentes etapas del crecimiento del cultivo para medir el tamaño de la raíz. Aquí es necesario ingresar el tamaño de la raíz mínima efectiva y la raíz máxima efectiva.

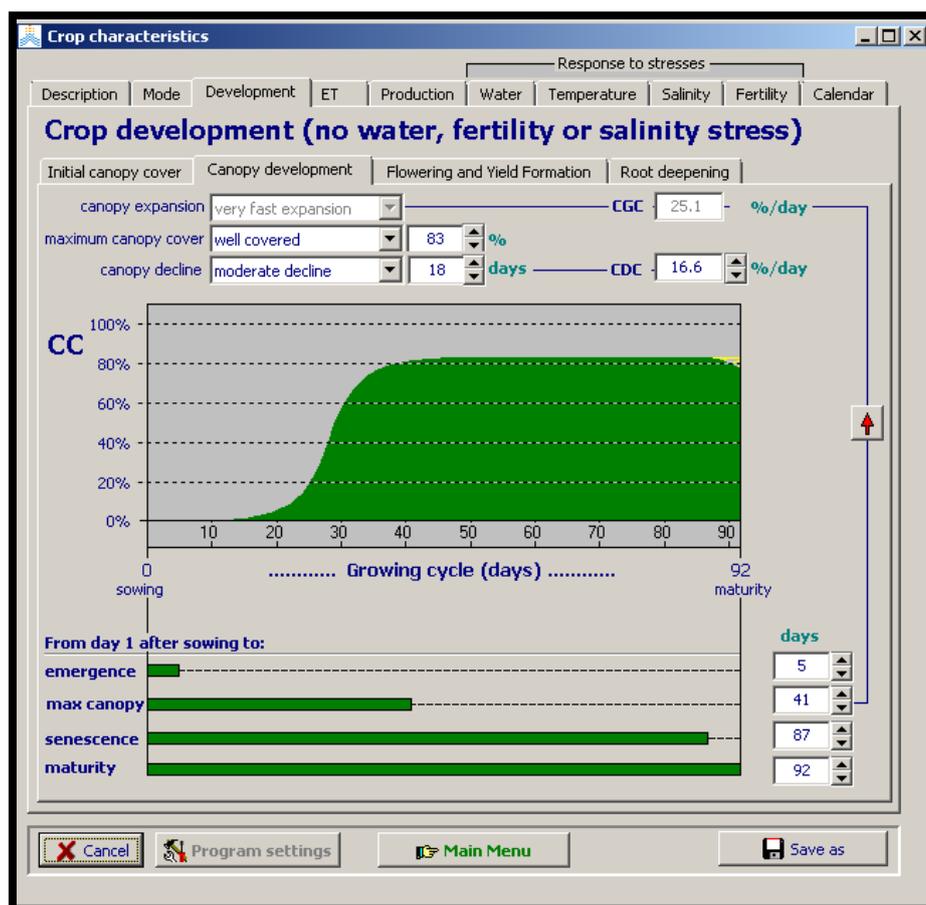


Figura 10: Modulo cultivo (Sub modulo desarrollo del cultivo) de la interfaz AQUACROP

b.2 Evapotranspiración

El sub módulo evapotranspiración define en gran parte la relación del cultivo con el medio ambiente a través de coeficientes de transpiración y evaporación del cultivo. Además, es posible también ajustar el porcentaje de extracción de agua del cultivo a medida que se profundiza la raíz. Este sub modulo tiene 2 sub divisiones que se explicaran a continuación:

- Coeficientes: AQUACROP divide el coeficiente de evapotranspiración en 2, el coeficiente de evaporación (K_e) y transpiración (K_{ctr}), de los cuales el modelo es más importante el K_{ctr} debido a que es uno de los parámetros más sensibles del modelo, generando una variación importante en los resultados al cambiar su valor.
- Porcentaje de extracción del agua: En esta sub división AQUACROP permite especificar, por rangos de profundidad de raíz, que porcentaje de agua capta el cultivo.

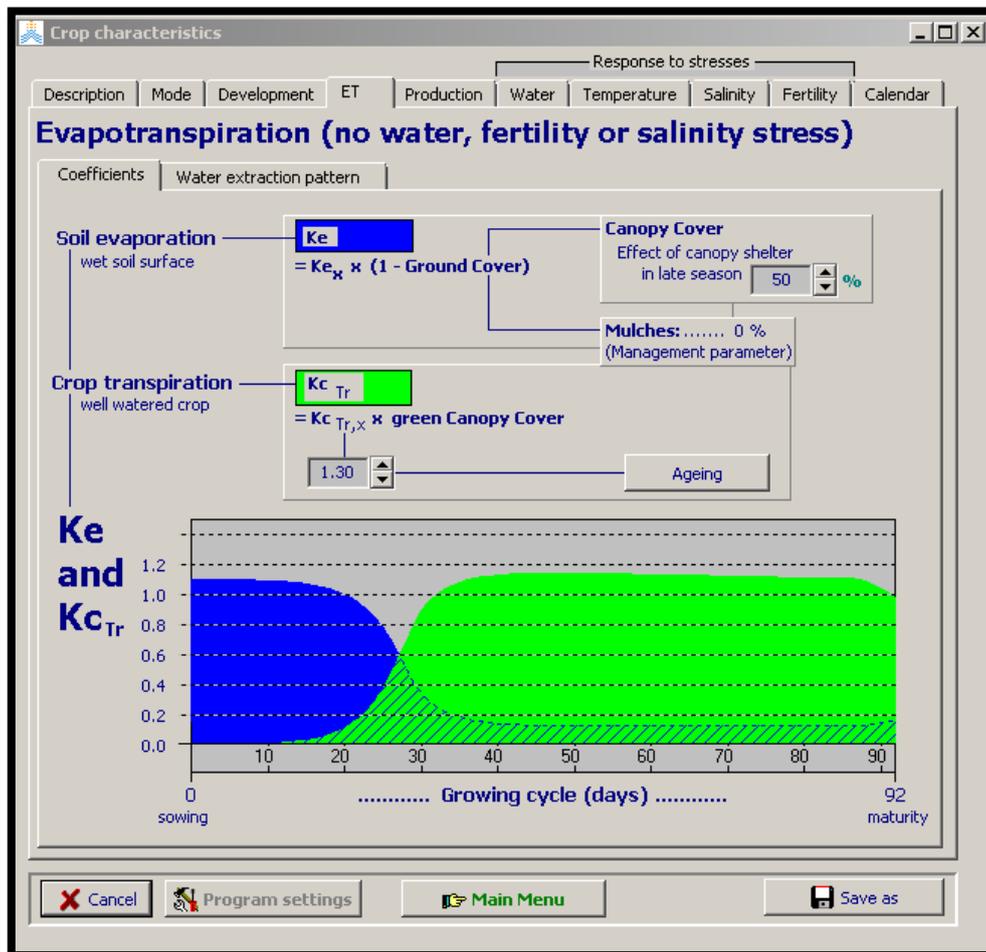


Figura 11: Modulo cultivo (Sub modulo Evapotranspiración) de la interfaz AQUACROP

b.3 Producción

El sub modulo producción define el crecimiento de la biomasa aérea seca y la cantidad de producción que se estimará. Esta sub dividido en 2 partes, la productividad del agua del cultivo y el índice de cosecha.

- Productividad del agua del cultivo: En esta sub división se define el crecimiento de la biomasa a partir de los siguientes parámetros: i) Productividad normalizada del agua (WP*) la cual permite estimar los valores finales de biomasa producida y ii) Coeficiente de reducción que describe el efecto de los productos sintéticos durante la formación del rendimiento (Fyield) el cual permite dar forma a la curva de crecimiento de la biomasa.
- Índice de cosecha: Esta sub división define la cantidad de producción, a partir del índice de cosecha de referencia el cual es un multiplicador que afecta a la biomasa para dar como resultado la producción. Se denomina índice de cosecha de referencia porque es un valor al cual debe llegar el índice de cosecha, pero si el cultivo es sometido a estrés en determinadas etapas de su desarrollo puede afectar negativamente el desarrollo de la producción causando que el valor final del índice de cosecha será menor.

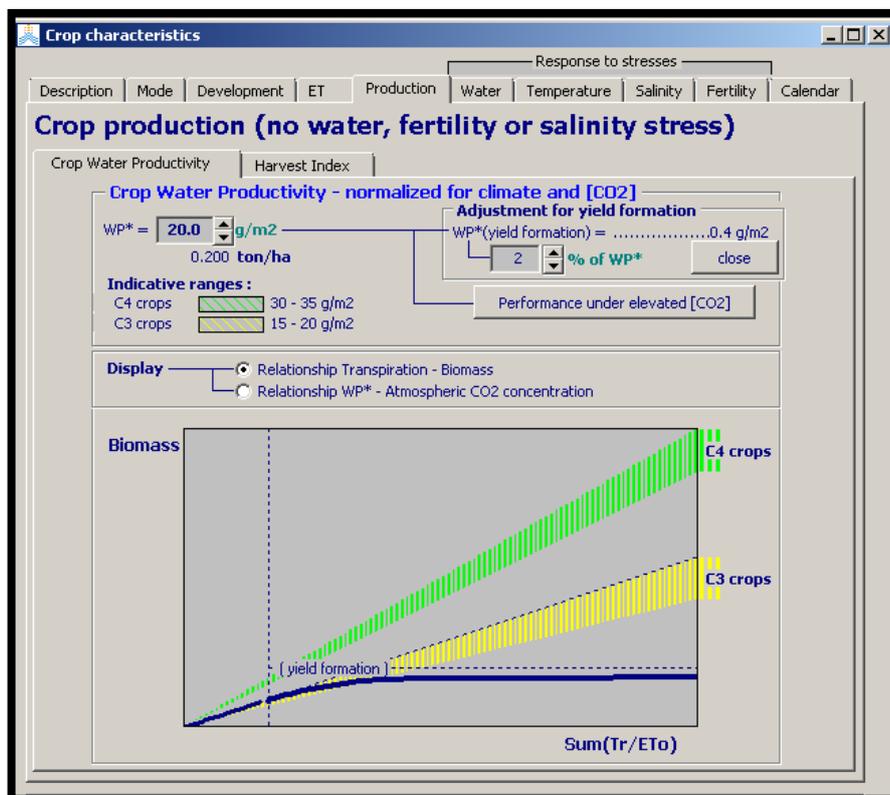


Figura 12: Modulo cultivo (Sub modulo Producción) de la interfaz AQUACROP

b.4 Respuesta del cultivo al estrés

La respuesta del cultivo al estrés está dividida en cuatro sub módulos los cuales están relacionados a las principales causas por las que la planta está en condiciones de estrés, estas son:

- Respuesta al estrés hídrico: Este sub módulo define el grado de sensibilidad del cultivo al estrés hídrico, por ello se sub divide en 5 partes que definen el efecto que causa el estrés hídrico en el cultivo. i) Primero se define en que grado afecta el estrés hídrico a la expansión del dosel para ello es necesario establecer los límites del coeficiente de estrés hídrico a la expansión del dosel (KS_{exp}). ii) Segundo se define el grado de sensibilidad del cultivo al cierre de estomas por estrés hídrico, por lo cual AQUACROP requiere que se defina el límite del coeficiente de estrés hídrico del cultivo al cierre de estomas (KS_{sto}). iii) Tercero se define si el estrés hídrico puede causar la senescencia temprana del dosel, para ello es necesario especificar el límite del coeficiente de estrés hídrico del cultivo a la senescencia temprana del dosel (KS_{sen}), iv) Cuarto debe definirse en qué grado el cultivo es tolerante al estrés hídrico por aireación en el suelo, para ello debe establecerse el límite del coeficiente de estrés hídrico a la aireación (KS_{aer}) el cual está relacionado al grado de saturación del suelo, v) Quinto esta última sub división corresponde al efecto del estrés hídrico en el desarrollo del índice de cosecha(HI), para ello es necesario especificar en qué momento sufrió de estrés el cultivo y en qué grado, ya que dependiendo de eso el efecto sobre el HI puede ser negativo o positivo.
- Respuesta al estrés por temperatura: En este sub modulo se define si las temperaturas del clima son favorables para el desarrollo óptimo del cultivo o si genera estrés en su desarrollo. Para ello AQUACROP sub divide este sub módulo en las siguientes 3 partes: i) Primero se define el estrés en el desarrollo del cultivo, en la cual se especifica la temperatura base y temperatura superior del cultivo, los cuales son límites por debajo y encima del cual se detiene el desarrollo del cultivo. ii) Segundo se define el estrés a la transpiración del cultivo a través del coeficiente de estrés del cultivo a las temperaturas frías ($KStr$) el cual debe representa el límite inferior por debajo del cual el cultivo se somete a estrés por frio. iii) Tercero debe definirse los límites de temperatura para que no se detenga la polinización del cultivo, al igual que la temperatura base y superior, los valores de estos límites deben ser revisado en investigaciones pasadas que se hayan centrado en analizar estos parámetros.

- Respuesta al estrés por salinidad: Aquí se define el grado de tolerancia del cultivo a la salinidad. Por ello si se planea analizar el efecto de la salinidad en el cultivo, debe medirse e ingresar la conductividad eléctrica (CE) junto con el programa de riego. Para poder definir mejor la respuesta del cultivo al estrés por salinidad AQUACROP lo sub divide en 2: i) Tolerancia a la salinidad, en este apartado se definiría en qué grado el cultivo es tolerante a la salinidad, para ello es necesario definir el límite superior e inferior de CE, donde cualquier valor de salinidad fuera del rango generará estrés en el cultivo. ii) Respuesta del cultivo, aquí se podrá observar previamente como afectará la CE al desarrollo y crecimiento del cultivo.
- Respuesta al estrés por fertilidad: Para poder analizar este sub módulo es necesario registrar el comportamiento del cultivo en campo, en caso no se haya estado aportando los nutrientes necesarios al suelo, el cultivo en estas condiciones no se desarrollará de forma óptima y por ende no alcanzará su crecimiento óptimo, el modelo AQUACROP nos permite aquí calibrar la cobertura del dosel final que alcanzará el cultivo en condiciones de estrés por fertilidad.

En la figura 13 se muestra la interfaz AQUACROP, específicamente en el módulo de cultivo y sub módulo estrés hídrico, para lograr acceder a esta opción es necesario que en el sub modulo “descripción” se marque la opción “Full set” que para el modelo se traduce como opciones completas.

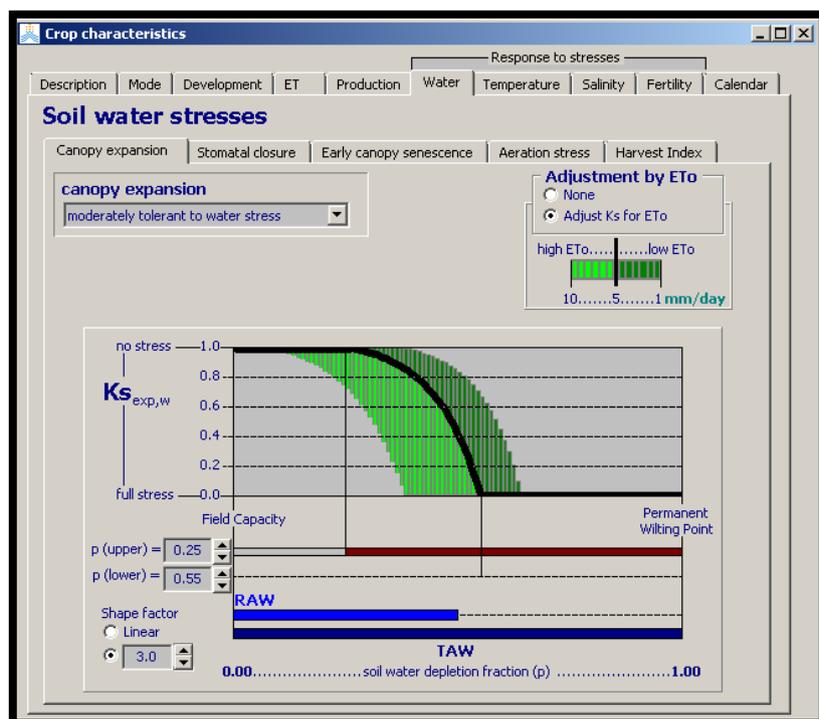


Figura 13: Modulo cultivo (Sub modulo estrés hídrico) de la interfaz AQUACROP

c. Riego

Este módulo permite crear programas de riego a partir de criterios definidos o permite ingresar módulos de riego que se han usado en campo, todo esto con el fin de simular el comportamiento del cultivo ante distintas láminas de riego. Para ello AQUACROP divide este módulo en 2:

- Método de riego: En este sub módulo debe especificarse el tipo de riego que se quiere evaluar, dentro de la base de datos de AQUACROP se puede evaluar el riego por aspersión, riego por goteo y riego por surco.
- Eventos de riego: AQUACROP puede generar programas de riego de forma automática dependiendo de los criterios que se ingresen y si se quiere evaluar un módulo de riego existente se puede ingresar las láminas de riego aplicadas en el periodo de tiempo especificado, es decir si el riego fue diario, inter diario o cada intervalo de días y la cantidad aplicada en ese tiempo. Además, si se cuenta con la información o registro se puede ingresar la conductividad eléctrica del agua (CE) para que el programa pueda analizar si genera o no estrés por salinidad al cultivo.

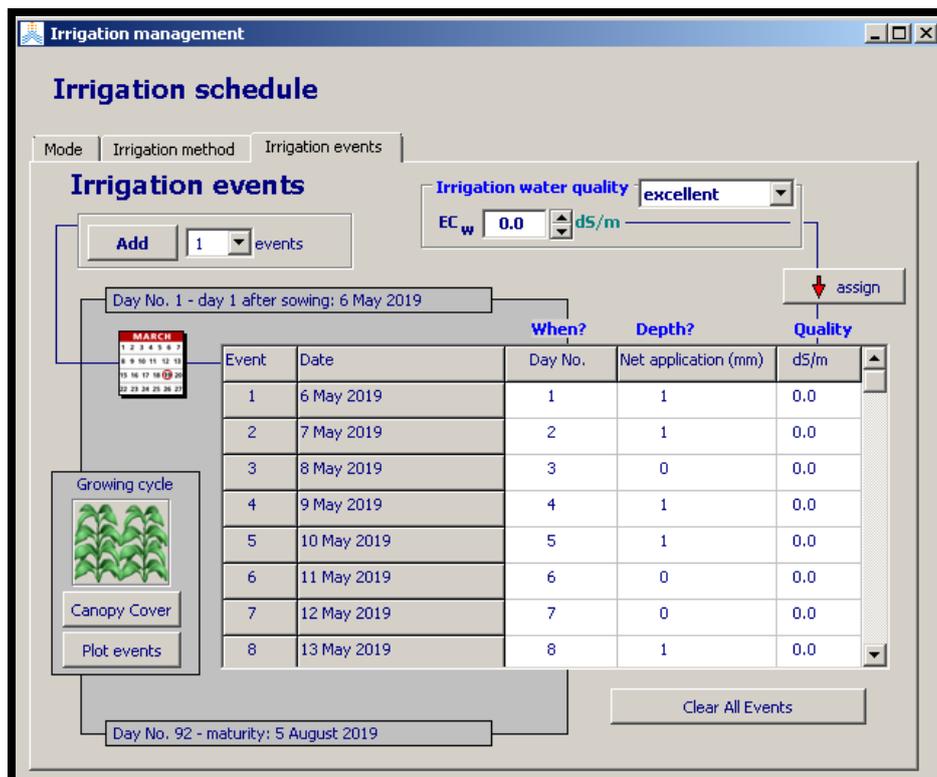


Figura 14: Modulo de riego (Sub modulo eventos de riego) de la interfaz AQUACROP

d. Suelo

AQUACROP cuenta con una base de datos de suelos, con todas las características que requiere dependiendo de la textura. Pero para realizar una simulación más precisa y real con el fin de poder calibrar y validar el modelo de un cultivo, es necesario muestrear las características del suelo de la zona de estudio o recopilar información anterior de la zona de estudio. Para poder caracterizar de forma precisa las características del suelo y su comportamiento con el entorno, AQUACROP divide este módulo en 3:

- Características de los horizontes del suelo: Aquí debe ingresarse todas las características del suelo, para ello es necesario primero realizar un muestreo en campo de la cantidad de horizontes del suelo en la zona de raíz. Los parámetros de suelo que deben ingresarse son: Profundidad de los horizontes, Contenido de humedad a capacidad de campo (FC), punto de marchitez permanente (PWP), saturación del suelo (SAT), conductividad hidráulica de saturación (Ksat). Además, de contener grava el suelo, AQUACROP permite ingresar en qué porcentaje se encuentra esta, también nos permite ingresar el grado de penetrabilidad de las raíces, esto está relacionado al grado de compactación del suelo, entre más suelto se encuentre el suelo mayor será la penetrabilidad de las raíces.
- Superficie del suelo: En este sub módulo se define el comportamiento de la escorrentía superficial y la evaporación del agua en la superficie, para ello AQUACROP define dos coeficientes, el número curva (CN) y el agua fácilmente evaporable (REW). CN tiene un valor por defecto y dependiendo de dicho valor se estima la escorrentía que causará la lluvia, o riego. Cabe resaltar que cuando se usa un riego tecnificado sea aspersión o goteo la escorrentía queda anulada, ya que AQUACROP considera que al ser un riego tecnificado la cantidad que se otorga es la necesaria y no genera escorrentía. REW está relacionado a la escorrentía ya que este parámetro, cuyas unidades está en milímetros (mm), representa la cantidad de agua que se encuentra en la superficie externa del suelo que es fácilmente evaporable.
- Ascenso capilar: Si el nivel freático es poco profundo, AQUACROP permite simular el ascenso capilar del agua, requiriendo como único dato la profundidad de la napa freática. Pero si no el nivel freático es profundo y no aporta agua a la zona de raíz, se debe ajustar el modelo a una profundidad que no interfiera con las raíces.

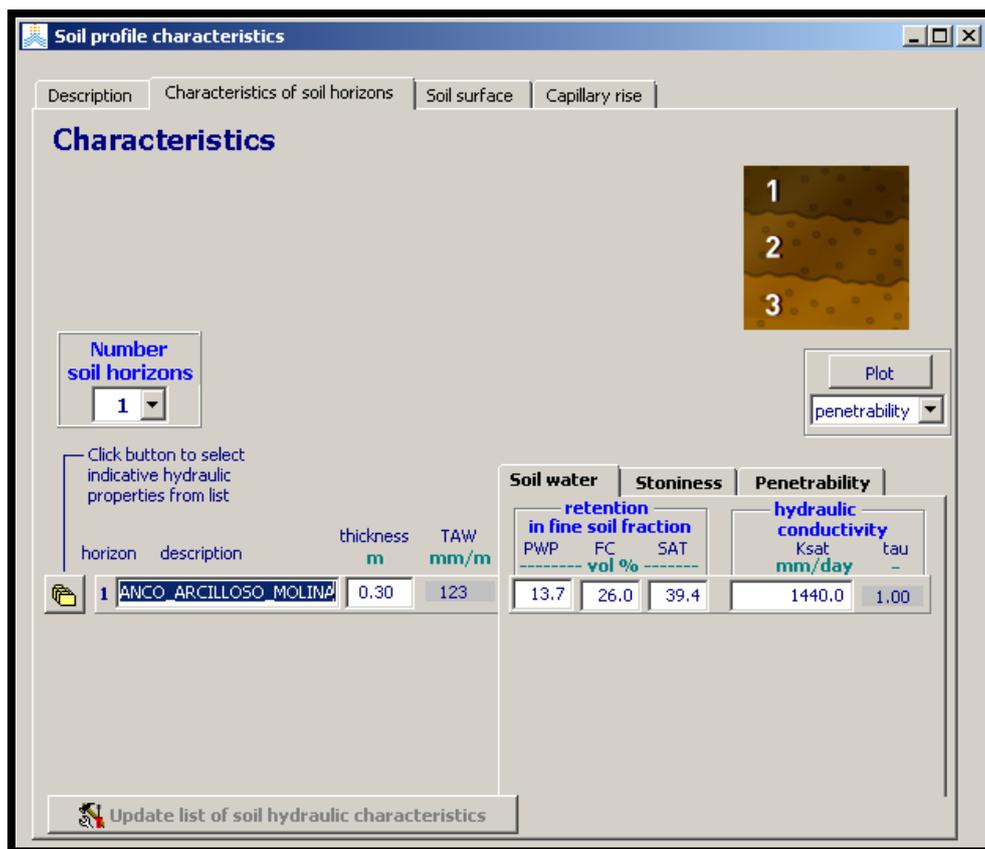


Figura 15: Modulo suelo (Sub modulo características de los horizontes del suelo) de la interfaz AQUACROP

2.2.5. Calibración del modelo en AQUACROP

El modelo AQUACROP permite ingresar la data registrada en campo durante el periodo de desarrollo del cultivo, en la interfaz de data observada se puede diferenciar, en general, dos tipos de data que puede ingresarse, la relacionada al desarrollo del cultivo y el contenido de humedad muestreado en determinada fecha (días después de la siembra) a una profundidad específica. La data relacionada al desarrollo del cultivo es: Cobertura del dosel y biomasa aérea seca; también nos permite comparar el resultado de rendimiento, pero eso se puede observar en la interfaz principal de resultados de la simulación. Con el fin de realizar un mejor proceso de calibración y validación del modelo, es recomendable ingresar los datos observados en campo luego de la primera simulación, así se podrá ajustar los parámetros del modelo de forma que los resultados observados y simulados se asemejen. Para lo cual primero es necesario realizar un análisis de sensibilidad a todos los parámetros de nuestro modelo, en la cual se podrá identificar los más sensibles, los que permitirán calibrar los resultados simulados.

El manual de referencia de AQUACROP de la FAO nos da recomendaciones y definiciones de los indicadores estadísticos dependiendo del valor que resulte. Estos indicadores nos ayudaran a definir si el modelo ha sido correctamente calibrado y validado, los indicadores estadísticos son: Coeficiente de correlación de Pearson (r), raíz del error medio cuadrático (RMSE), coeficiente de eficiencia de Nash (EF) y el Índice de Willmott (d).

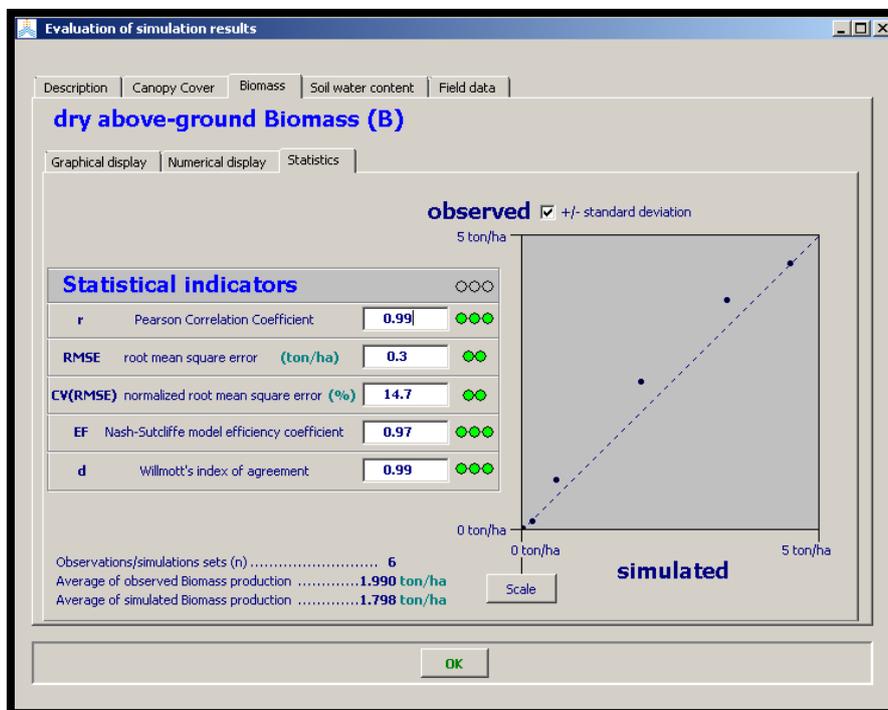


Figura 16: Interfaz de data observada, pestaña estadística del programa AQUACROP

En la figura 17 se muestra la curva de crecimiento de la biomasa aérea seca del tomate, el cual es una hortaliza que tiene investigaciones previas, al ser el zapallito italiano una hortaliza se espera que la curva de crecimiento de la biomasa aérea seca sea similar.

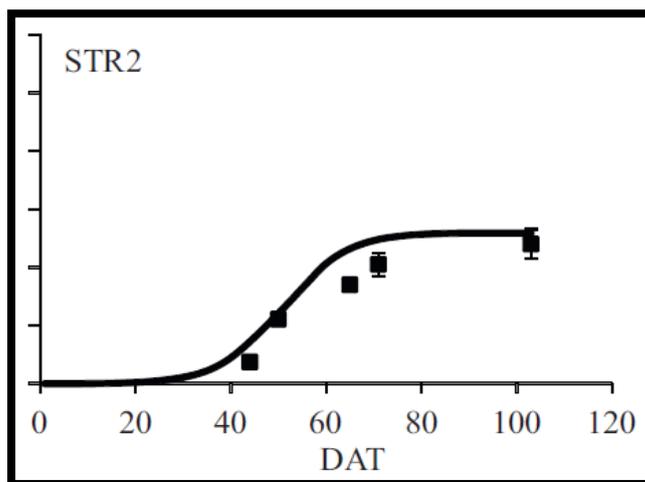


Figura 17: Curva de crecimiento de la biomasa aérea seca del tomate

Fuente: Katerji & Campi, 2013

En la tabla 2 se muestra los parámetros calibrados más sensibles para un modelo de tomate en México en el cual se observa que la máxima cobertura del dosel es de 68%, una productividad de agua de la biomasa normalizada de 19 g x m⁻² y un índice de cosecha de referencia de 64%.

Tabla 2: Parámetros más sensibles para un modelo de tomate

Parámetro	Valor calibrado	Unidad
Máxima cobertura del dosel (Cx)	68	%
Profundidad mínima efectiva de la raíz (Zr n)	0.15	m
Profundidad máxima efectiva de la raíz (Zr x)	0.75	m
Duración de la floración	39	días
Productividad del agua de la biomasa normalizada (WP*)	19	g x m ⁻²
Índice de cosecha de referencia (Hio)	64	%

Fuente: Katerji & Campi, 2013

Se encontró similitudes en otros modelos de hortalizas como la cebolla y pimiento, que se muestran en las tablas 3 y 4 respectivamente.

Tabla 3: Parámetros más sensibles para un modelo de cebolla

Parámetro	Valor calibrado	Unidad
Máxima cobertura del dosel (Cx)	60	%
Profundidad máxima efectiva de la raíz (Zr x)	0.35	m
Duración de la floración	20	m
Productividad del agua de la biomasa normalizada (WP*)	17	g x m ⁻²
Índice de cosecha de referencia (Hio)	45.2	%

Fuente: Agbem Abiese, 2015

Tabla 4: Parámetros más sensibles para un modelo de pimiento

Parámetro	Valor calibrado	Unidad
Máxima cobertura del dosel (Cx)	55	%
Profundidad máxima efectiva de la raíz (Zr x)	0.8	m
Duración de la floración	11	días
Productividad del agua de la biomasa normalizada (WP*)	17	gxm-2
Índice de cosecha de referencia (Hio)	50	%

Fuente: Sam-Amoah & Darko, 2013

III. METODOLOGÍA

3.1. Zona de estudio

3.1.1. Ubicación

La ubicación de la zona de estudio se encuentra en la región de Lima, provincia de Lima, distrito de La Molina, dentro de la Universidad Nacional Agraria La Molina. La figura 18 muestra la ubicación de la zona de estudio.

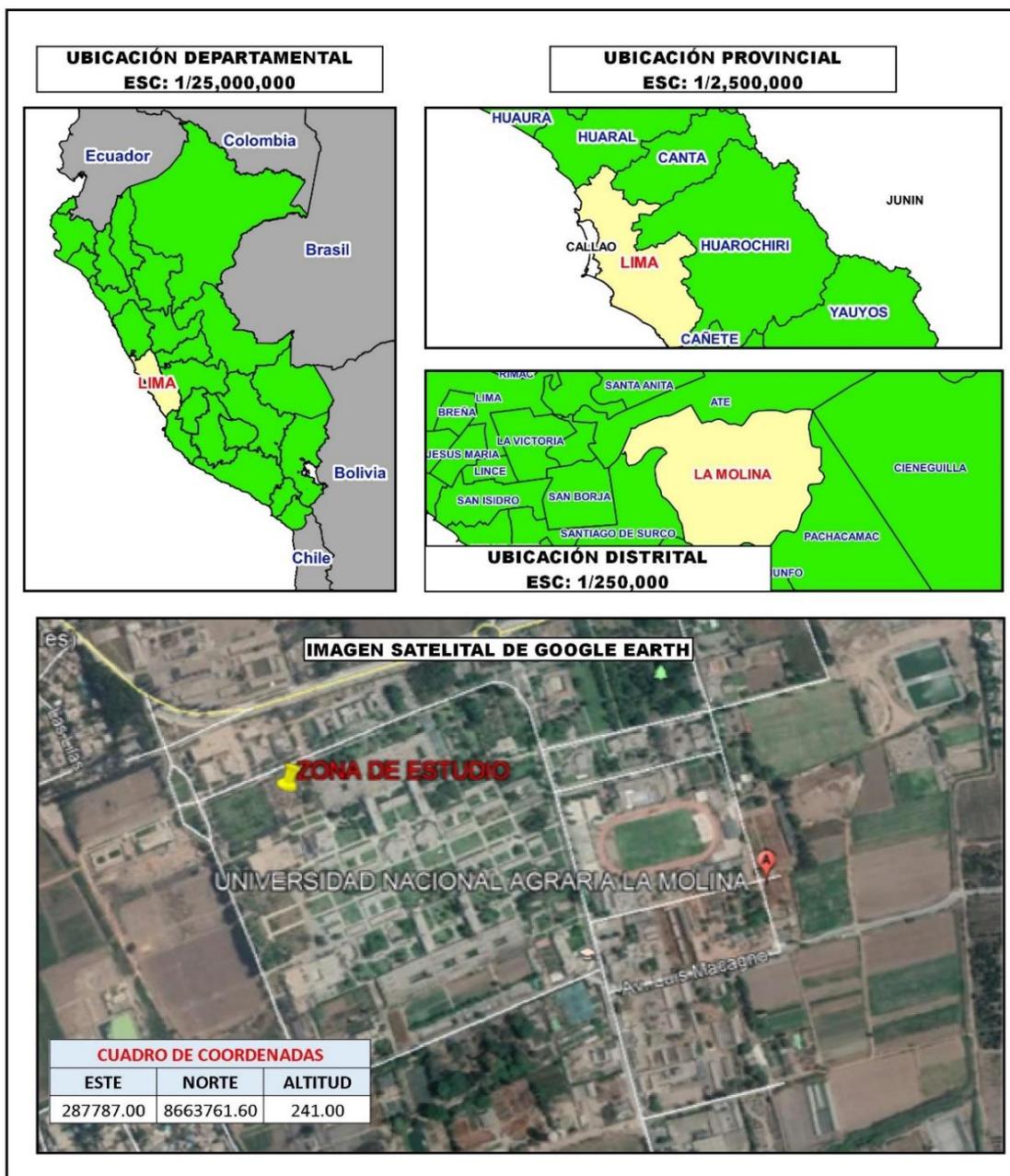


Figura 18: Ubicación del área experimental

3.1.2. Clima

La información diaria climatológica fue adquirida de la estación meteorológica automática “ClimateMinder” ubicada al lado del área experimental, la estación está conectada vía internet a una plataforma virtual a la cual se sube toda la información climática, de la cual se descargaron los datos del 06/05/2019 al 05/08/2019 que corresponde al periodo vegetativo y de floración del Zapallito Italiano. La información que se descargó para ingresar al modelo AQUACROP fue: temperatura diaria de la cual se extrajo la máxima y mínima diaria, precipitación y también calcula automáticamente de forma diaria la evapotranspiración.

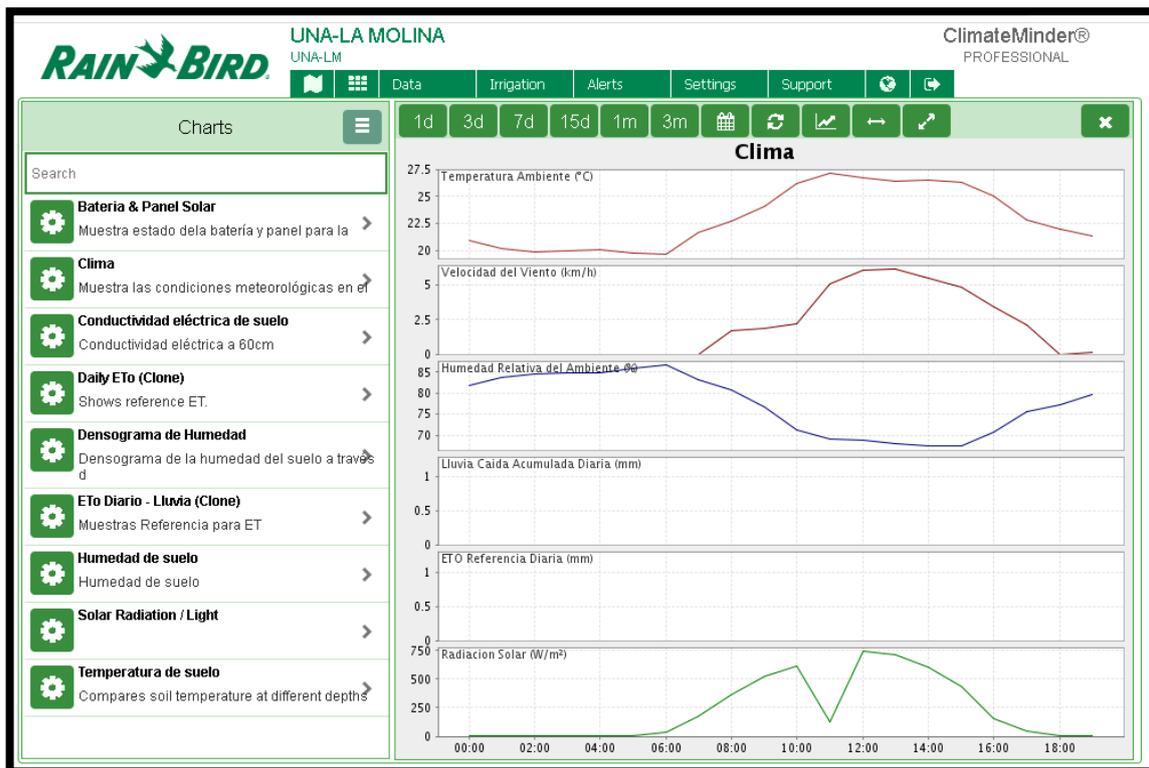


Figura 19: Plataforma virtual de la estación meteorológica automática “ClimateMinder”

a. Temperatura máxima diaria (°C)

La temperatura máxima diaria fue obtenida a partir de la estación ClimateMinder la cual registra información de temperatura cada 20 o 30 min al día. (Figura 20)

b. Temperatura mínima diaria (°C):

La temperatura mínima diaria fue obtenida a partir de la base de datos registrada por la estación ClimateMinder, la cual registra información de temperatura cada 20 o 30 min aproximadamente. (Figura 21)

c. Precipitación diaria (mm/día)

La precipitación registrada por la estación automática ClimateMinder, se observa en la figura 22.

d. Evapotranspiración (mm/día)

La estación ClimateMinder calcula automáticamente la evapotranspiración de referencia por el método de Penman Monteith FAO y sube a la base de datos a la plataforma virtual, de la cual se descargó la información presentada en la figura 23.

3.1.3. Agua

La fuente del agua, que se usó en el experimento, es el Río Rímac, esta agua es captada mediante un canal que llega hasta la Universidad Nacional Agraria La Molina, la cual se deriva a un reservorio, el cual es usado para el riego de las áreas verdes cercanas a la biblioteca agraria de la UNALM y de la facultad de ingeniería agrícola. Mediante una toma se deriva el agua del reservorio al tanque rotoplas de la caseta de riego, luego a través de una bomba es llevada hacia el área experimental. En la figura 24, se muestra el croquis del flujo del agua desde el reservorio hacia el área experimental.

3.1.4. Diseño experimental

Para evaluar el rendimiento, biomasa y cobertura del dosel en campo se usó un diseño experimental de bloques completamente al azar, en la cual se aplicaron tratamientos de riego equivalentes al 120% de la evapotranspiración (T1), 100 % de la evapotranspiración (T2), 80% de la evapotranspiración(T3) y 60 % de la evapotranspiración (T4). Debido al tamaño del área experimental se usaron solo 3 bloques donde cada bloque estuvo compuesto por 4 líneas de riego correspondiente a cada tratamiento de riego, la disposición que se usó se muestra en la figura 25. Además, a los resultados se aplicará un análisis de varianza para identificar si hubo diferencias significativas.(Badii & Castillo, 2007)

3.1.5. Sistema de Riego

Se instaló un sistema de riego por goteo, con goteros auto compensados marca Azud, asegurando que llegue el mismo caudal hasta el gotero más lejano. El marco de plantación usado fue 0.4 x 1.0 m (40 cm de distanciamiento entre plantas y 1 metro entre líneas). Además, considerando el diseño experimental se dio una separación de 2 metros entre bloques de repeticiones. En la figura 26, se presenta el croquis del sistema de riego usado.

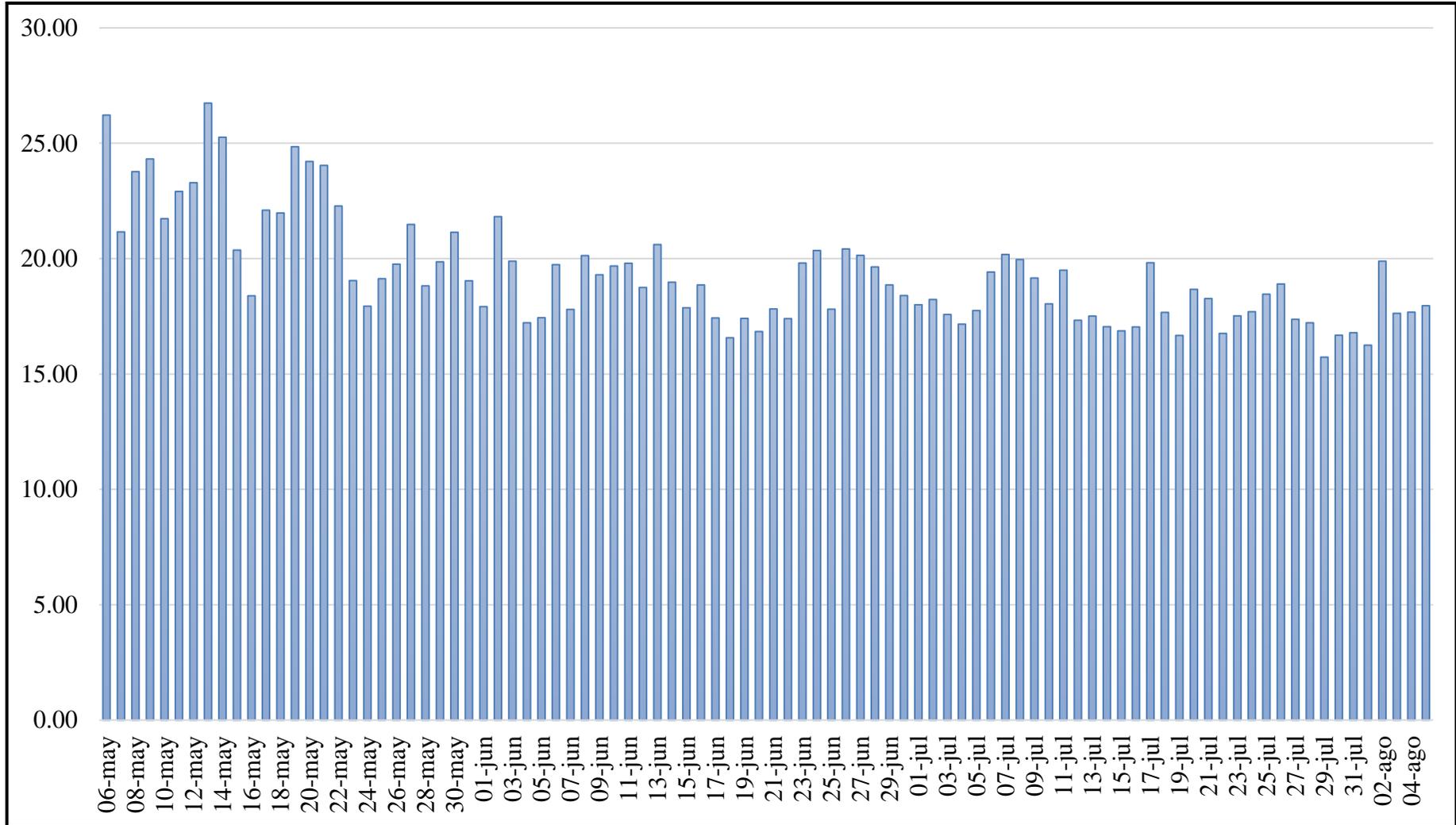


Figura 20: Temperatura máxima del aire(°C) desde la siembra a la última cosecha del zapallito italiano

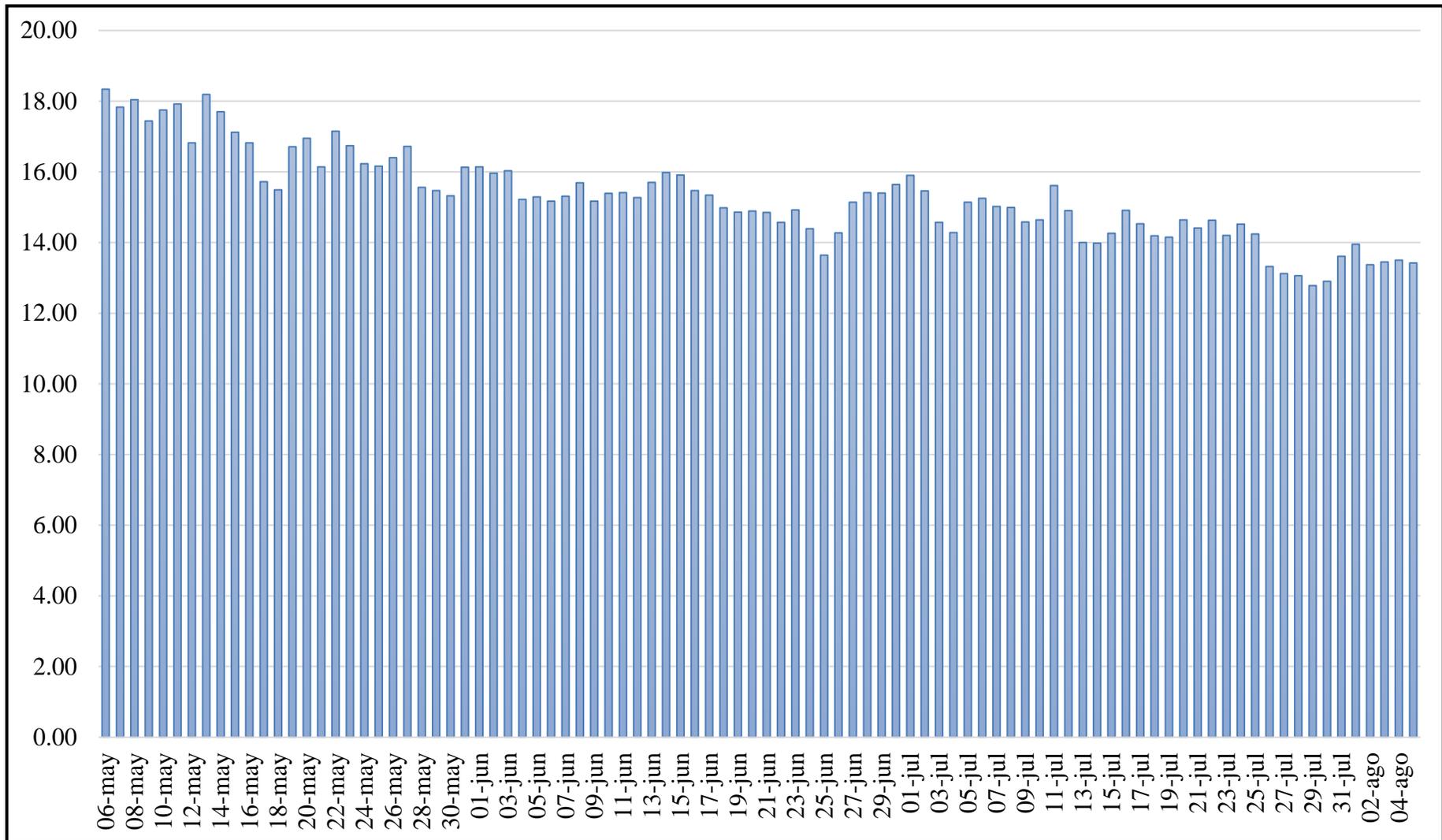


Figura 21: Temperatura mínima del aire (°C) desde la siembra a la última cosecha del zapallito italiano

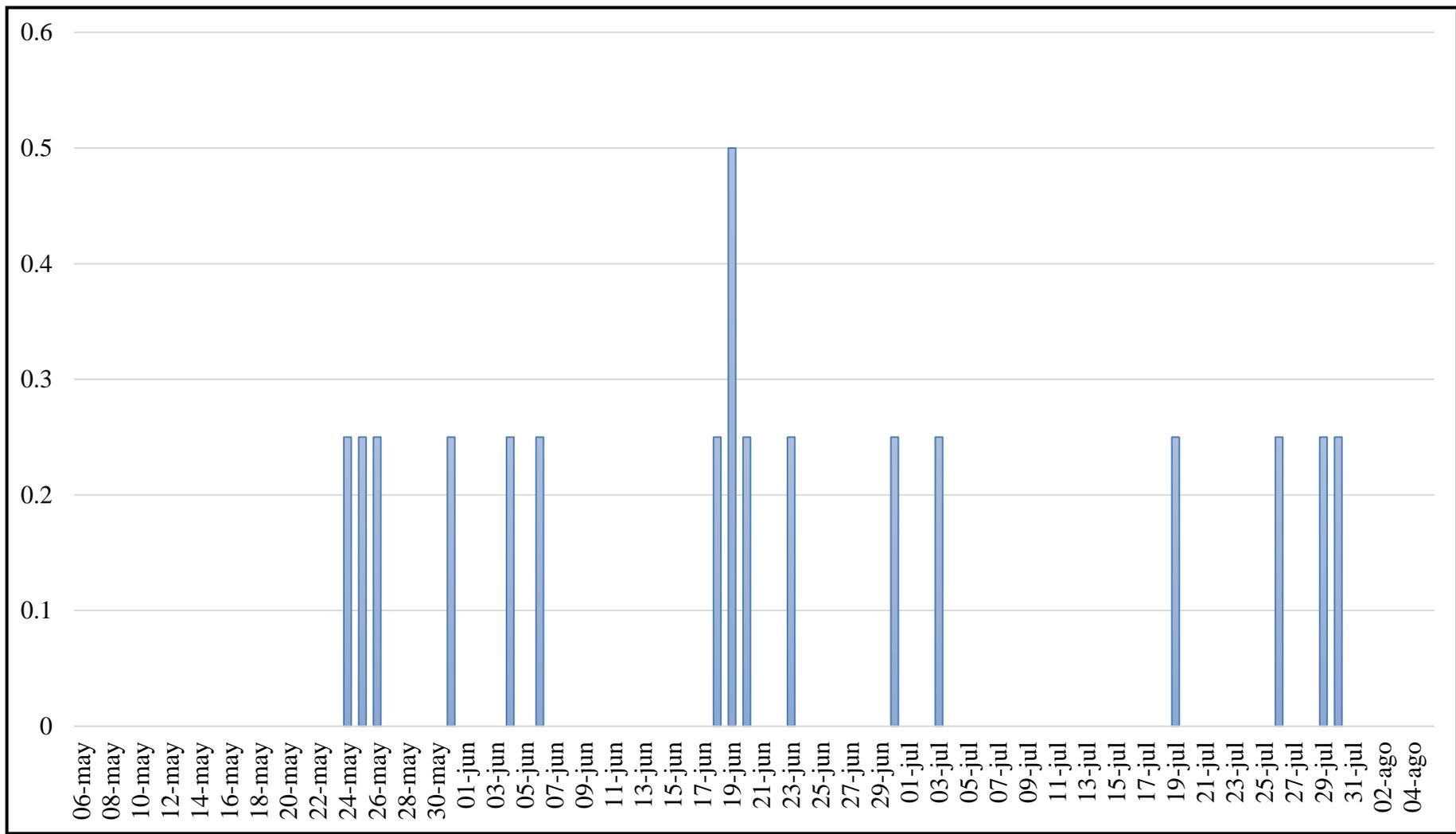


Figura 22: Precipitación diaria (mm/día) desde la siembra a la última cosecha del zapallito italiano

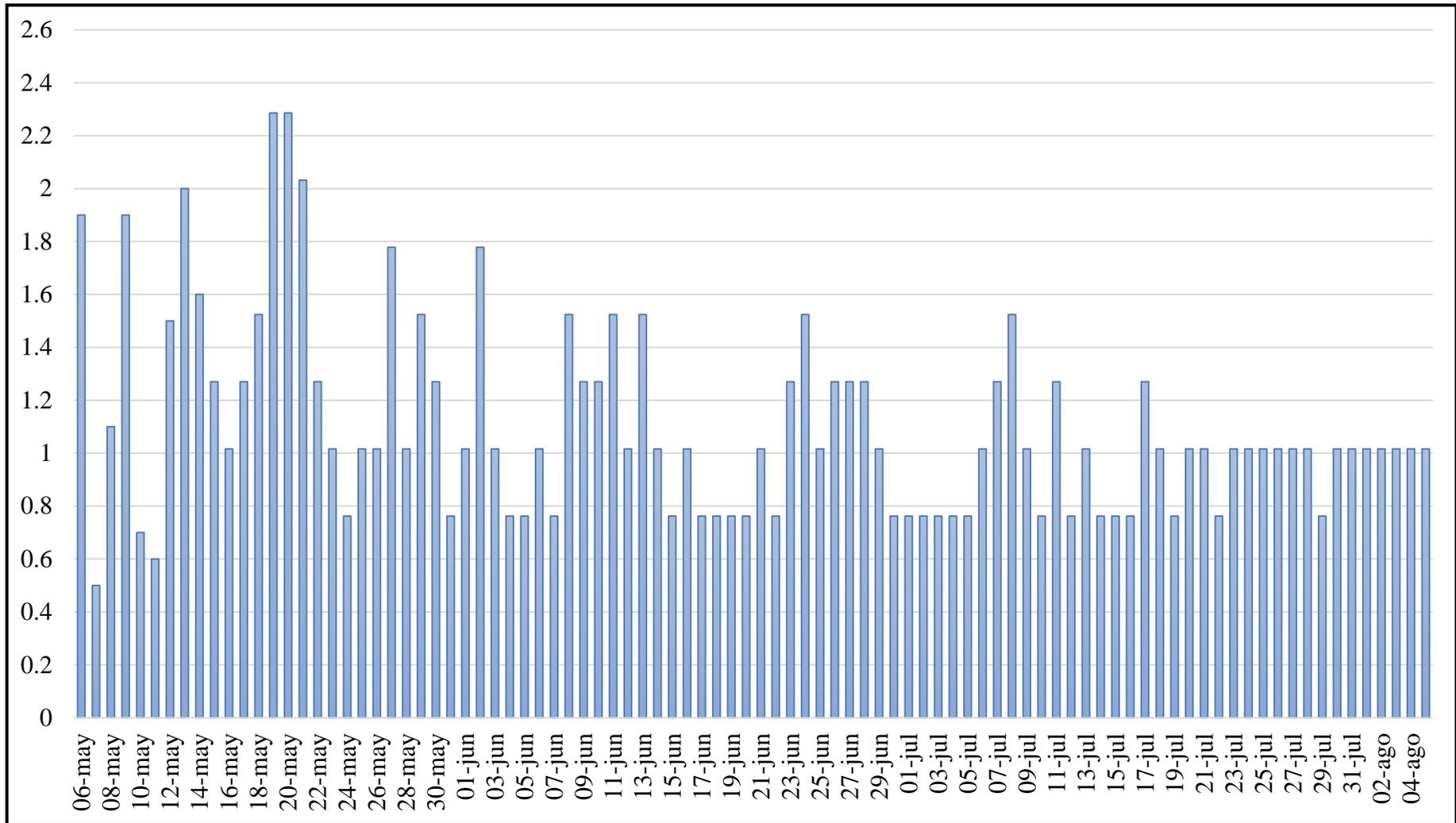


Figura 23: Evapotranspiración diaria (mm/día) desde la siembra a la última cosecha del zapallito italiano

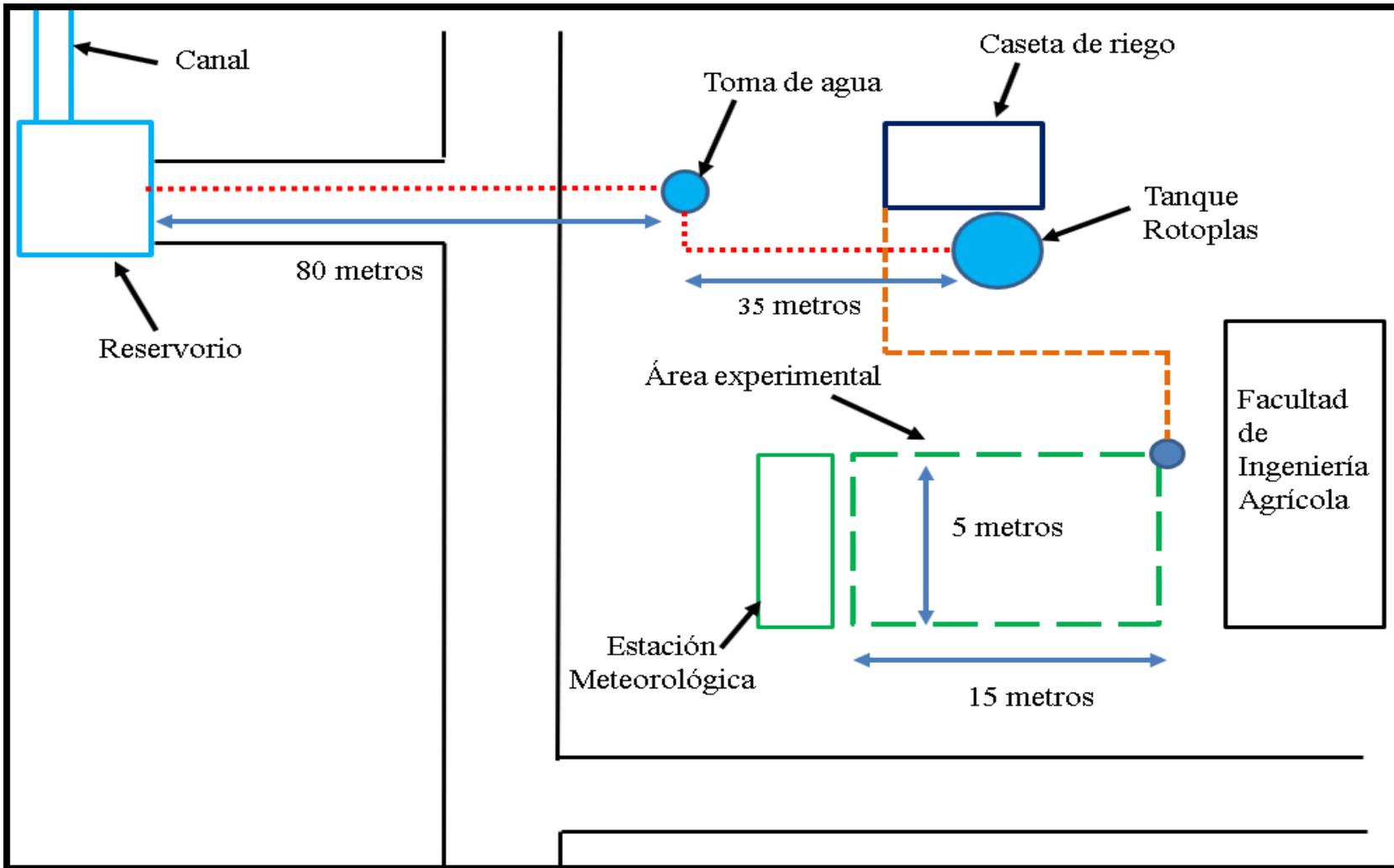


Figura 24: Croquis del flujo de agua desde el reservorio hacia el área experimental

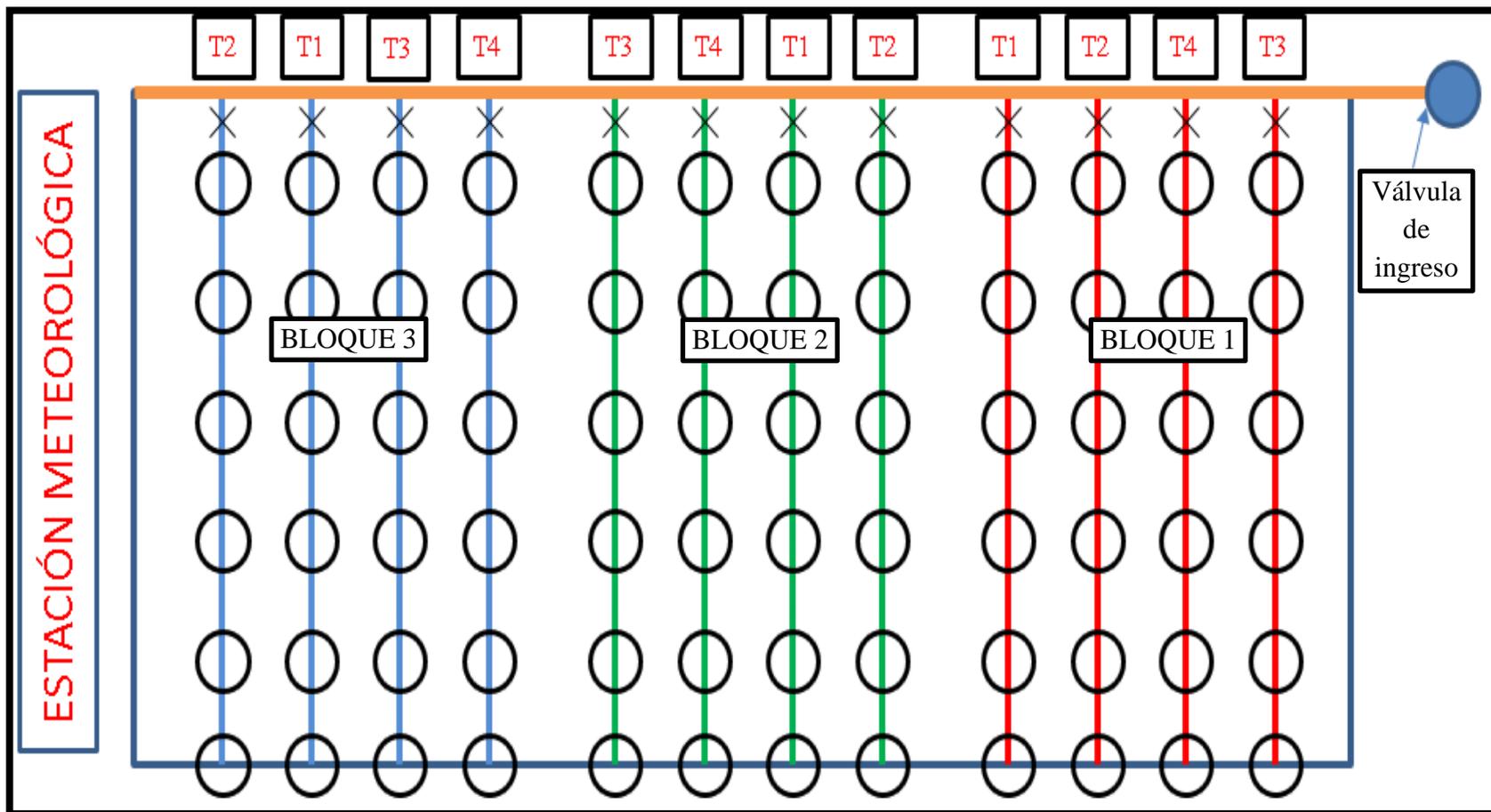


Figura 25: Disposición de los tratamientos de riego en el área experimental

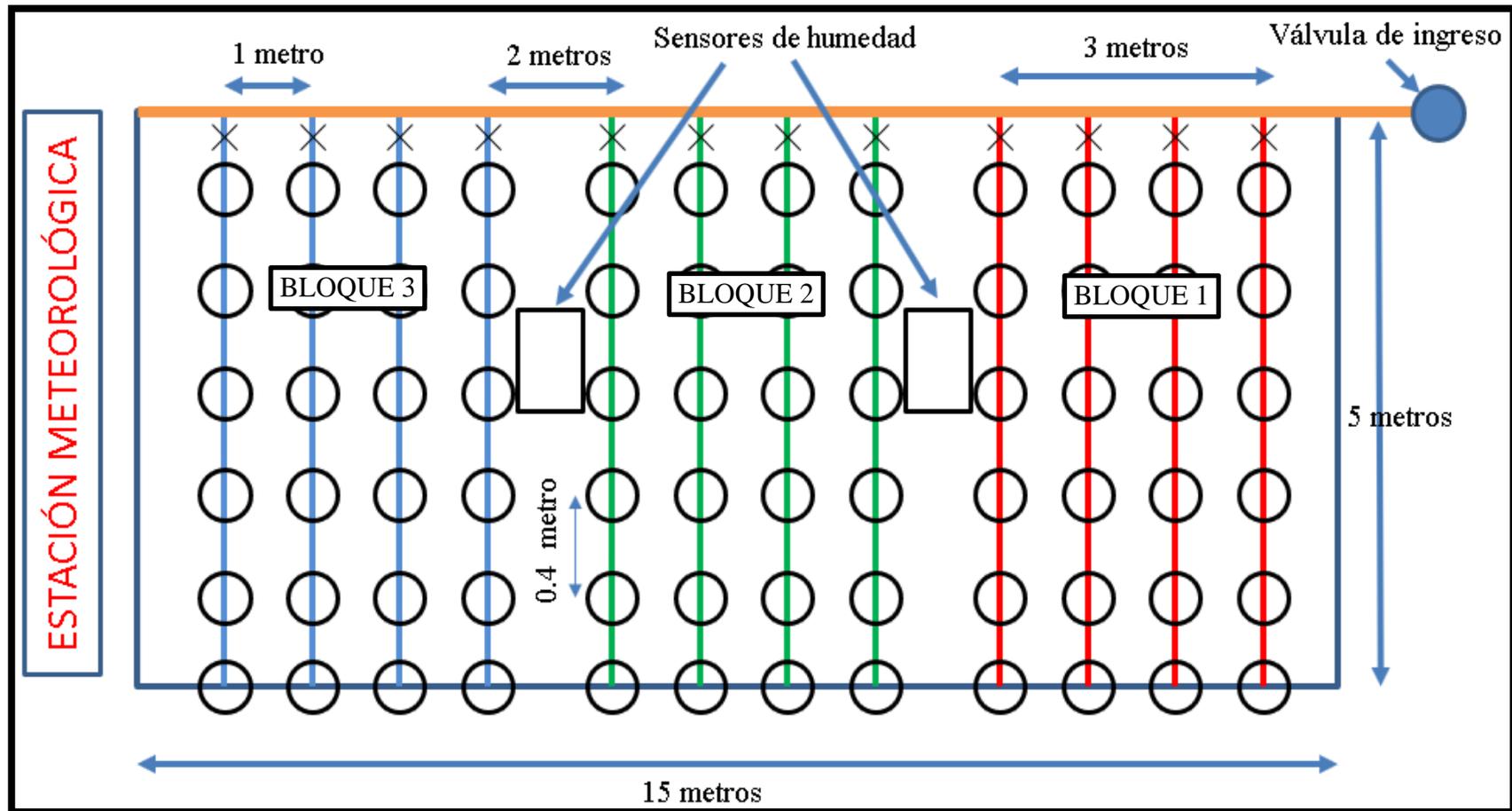


Figura 26: Croquis del sistema de riego en el área experimental

El riego se realizó de forma diaria, reponiendo la evapotranspiración del día que indica la estación automática, por ejemplo, si el día de hoy evapotranspiro 4 mm del suelo y planta, el día de mañana la estación indicará ese valor y se repondrá esos 4 mm por medio del riego. Debido a que el caudal del gotero es constante y de 1.5 l/hr es necesario reponer la evapotranspiración a través de un tiempo determinado de riego, el cual será calculado con la siguiente formula:

$$T \text{ (Hr)} = \frac{(\text{Espac. Goteros}) \times (\text{Espac. Lineas}) \times \left(\frac{E_{to}}{\text{Eficiencia de riego}} \right)}{\text{Caudal Gotero}} \quad (7)$$

El tiempo que deberá regarse variará dependiendo del tratamiento, por ello en la formula solo se cambiara el valor de la E_{to} dependiendo del porcentaje del tratamiento (120%, 100%, 80% o 60%), esto se realizara de forma diaria ya que el valor de la E_{to} es diferente para cada día.

3.1.6. Suelo

Para caracterizar el suelo del área experimental se realizaron muestreos en puntos aleatorios y posteriormente se hizo un análisis en el laboratorio de recursos hídricos de la facultad de ingeniería agrícola.

Los parámetros de suelo hallados mediante ensayos de laboratorio son:

a. Textura del suelo

Según el análisis el área experimental tiene una textura de suelo franco arcilloso, con la siguiente composición:

Tabla 5: Información de textura del suelo del área experimental.

% Arena	% Limo	% Arcilla
44.7	27.98	27.31

Fuente: Atocsa Gomez, 2015

b. Densidad aparente

Para calcular la densidad aparente se hizo una calicata, de la cual se extrajeron muestras de suelo a profundidades de 10, 20 y 30 cm. Luego se llevaron al horno durante 48 horas para posteriormente pesarlas y calcular la densidad aparente.

Tabla 6: Cálculo de densidad aparente en el área experimental

Muestra	Profundidad (cm)	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	Peso sobre (g)	Peso suelo seco (g)	Volumen (cm ³)	Densidad aparente (gr x cm ³ ⁻¹)
1	10	164.8	138.7	3.2	135.5	98.13	1.38
2	20	164.3	137.3	3.2	134.1	98.13	1.37
3	30	162.6	136.7	3.2	133.5	98.13	1.36

c. Porcentaje de saturación del suelo

Se considerará el contenido de humedad del suelo en saturación igual a la porosidad del suelo. Los valores comunes de la porosidad (n) para una textura de suelo franco arcillosa varían de 47 a 54%. (Flores & Alcalá, 2010). Por lo cual se consideró tomar el valor de 47.0 % para la porosidad del suelo.

d. Punto de marchitez permanente y Capacidad de campo

Según el análisis de contenido de humedad, los porcentajes de capacidad de campo y punto de marchitez permanente son los siguientes:

Tabla 7: Contenido de humedad del suelo (%)

Humedad	Capacidad de campo (FC %)	Punto de marchitez permanente (PWP %)
Gravimétrica	19.00	10.00
Volumétrica	26.03	13.70

Fuente: Atoccsa Gomez, 2015

e. Conductividad hidráulica de saturación:

La conductividad hidráulica de saturación (Ksat) se calculó a partir del ensayo de los anillos infiltrometros realizado en el área experimental. Con este ensayo se obtuvo la curva de velocidad de infiltración, tomando como valor de Ksat el valor constante de la curva. Como se muestra en la figura 27, aproximadamente se hace constante en el valor de 61 mm x hr⁻¹, por lo cual se tomó como valor de Ksat igual a 61 mm x hr⁻¹.

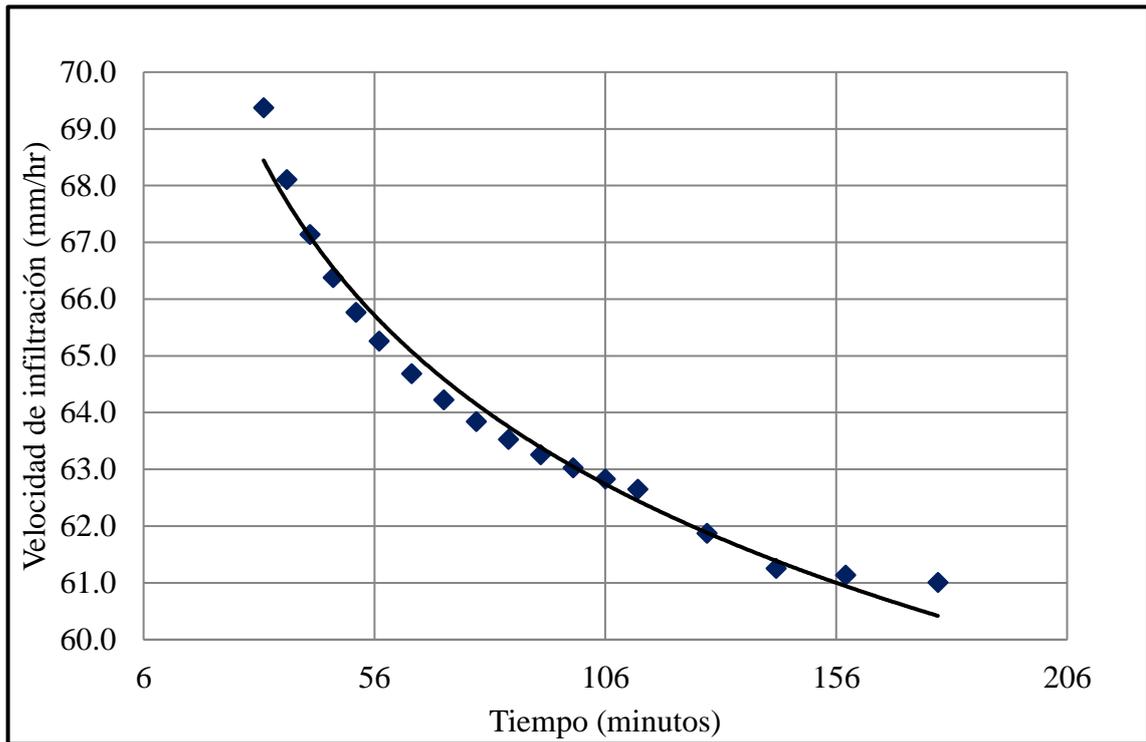


Figura 27: Tiempo vs velocidad de infiltración

f. Contenido de humedad:

Para monitorear el contenido de humedad se instaló sensores de humedad, estos serán colocados a una profundidad de 10cm y 30 cm en una línea de goteo correspondiente a cada lamina de riego que se aplicara (120%,100%, 80% y 60% de la Eto). La información será almacenada en 2 data logger y registrará las lecturas cada 2 horas durante todo el periodo vegetativo del zapallito italiano. Finalmente, esta información será comparada con la humedad simulada por AQUACROP.

3.2. Materiales, equipos y herramientas computacionales

Los equipos, herramientas, materiales y estructuras requeridas fueron:

Tabla 8: Materiales y equipos

Categoría	Materiales, equipos y herramientas
Sistema de riego	<p>Goteros Azud de 1.5 L/h auto compensado</p> <p>Mangueras de riego</p> <p>Tuberías de conducción</p> <p>Rotoplas</p> <p>Bomba eléctrica</p> <p>Filtros</p> <p>Reservorio</p> <p>Caseta de riego</p> <p>Cerco para delimitar la zona de estudio.</p>
Cultivo - Zapallito Italiano	<p>Semillas</p> <p>Guano</p> <p>Compost</p> <p>Agro-químicos</p>
Equipos y herramientas de laboratorio	<p>Balanza</p> <p>Horno de laboratorio</p> <p>Cilindros muestreadores</p> <p>Cilindro infiltrómetro</p> <p>Herramientas manuales</p>
Equipos automáticos	<p>Sensores de humedad</p> <p>Data logger</p> <p>Estación meteorológica automática</p> <p>Cajas de protección para los data logger</p>
Equipos y herramientas para el monitoreo de campo	<p>Trípode para posicionar la cámara</p> <p>Celular para toma de fotografías</p> <p>Herramientas para registro de datos</p> <p>Manómetro</p> <p>Vaso precipitado</p>
Herramientas electrónicas y software	<p>Laptop</p> <p>Software Green Crop Tracker</p> <p>Software AQUACROP</p>

3.3. Procedimiento

La metodología que se aplicó está dividida esencialmente en dos partes, la primera es la fase de campo en la cual se cultivó y se muestreo las características del cultivo necesarias para el modelo AQUACROP, la segunda es la fase de calibración en la cual por medio de un análisis de sensibilidad a los parámetros se calibraron los 4 modelos generados por tratamiento de riego.

3.3.1. Fase de campo

Las actividades que se realizaron en la fase de campo son: La Caracterización y preparación del terreno, siembra del zapallito italiano, Riego por medio de un protocolo diario, muestreo de biomasa, cobertura y contenido de humedad del suelo a través de los sensores y las diversas cosechas según el crecimiento del fruto.

a. Preparación del terreno

La caracterización y preparación del terreno se realizó aproximadamente 2 semanas antes de la siembra para lo cual se realizaron las siguientes actividades: Muestreo del suelo para la prueba de infiltración, prueba de infiltración, remoción del suelo con maquinaria, nivelación manual, arado del terreno, instalación del sistema de riego e instalación de los sensores de humedad con su data logger. Las actividades realizadas en la preparación del terreno se pueden observar en el anexo 8



Figura 28: Fotografía del terreno preparado para la siembra

b. Siembra del zapallito italiano

La siembra se realizó el día 06 de mayo del 2019 en la cual se colocaron, a una profundidad aproximada de 5 cm del nivel de suelo, 4 semillas por gotero para asegurar un 100% de germinación en cada punto. Previamente a esto se regó de 3 a 4 horas de forma diaria para que el contenido de humedad del suelo este en capacidad de campo, una vez colocada las semillas se inició con el tratamiento de riego a cada línea, es decir se aplicó una lámina correspondiente al 120%, 100%, 80% y 60% de la Eto a cada línea de riego. Se obtuvo una densidad de plantación de 25000 plantas x ha⁻¹, días después de la emergencia se colocó una trampa de afrecho con melaza para evitar que los gusanos se coman las hojas.

c. Manejo Agronómico

El manejo de plagas, enfermedades y fertilización del terreno fue manejado por una compañera de la facultad de agronomía, asesorada por la Ingeniera Saray Siura profesora de la facultad de agronomía y parte del programa de hortalizas del huerto UNALM. La cual se encargó que las condiciones de crecimiento del zapallito fueran las óptimas.

d. Operación diaria del sistema de riego

La operación del sistema de riego se dio de forma diaria, como se explicó anteriormente cada línea de goteo tiene asignada una lámina de riego equivalente al 120%, 100%, 80% y 60% de la Evapotranspiración (Eto) diaria, esto se hizo a través de un protocolo establecido el cual consistió en ingresar a la plataforma virtual de la estación automática para tener el valor diario de la Eto, con este valor se calculó el tiempo que debe abrirse la válvula de cada línea de riego. En el momento que todas las válvulas estaban abiertas se colocó un vaso de precipitado debajo de un gotero elegido de forma aleatoria durante 1 minuto aproximadamente para medir el caudal del gotero, cuando se haya terminado la medición se regresara el agua al punto del cual se extrajo, por último, se midió la presión con un manómetro cada cierto periodo de tiempo, para asegura que está funcionando a una presión adecuada según las especificaciones técnicas del gotero.

A medida que los tiempos de riego de cada línea de goteo se iban terminando se iban cerrando las válvulas hasta cerrar la válvula de entrada al área experimental y apagar el sistema en la caseta de bombeo, este protocolo se hizo de forma diaria para evaluar el efecto de cada lamina sobre el cultivo. Las fotografías de las actividades mencionadas se pueden observar en el anexo 8.

e. Muestreo de biomasa, cobertura del dosel y contenido de humedad

d.1 Muestreo de biomasa

La oportunidad de realizar varios muestreos de biomasa se generó a partir de que se colocaron 4 semillas por gotero y se obtuvo una germinación aproximada del 95%, el objetivo fue dejar solo 2 plantas por gotero y se planeó muestrear la biomasa casi hasta al final del periodo vegetativo, pero aproximadamente cuando la flor comenzó a crecer se vio en la necesidad de extraer todas las que quedaban y dejar 2 plantas ya que la gran cantidad de plantas podría traer como consecuencia enfermedades y perjuicio para los frutos.

El muestreo se realizó seleccionando aleatoriamente las plantas más representativas por cada tratamiento y se cortó a nivel de suelo, esto se realizó así ya que el modelo AQUACROP solo simula la biomasa aérea por lo que no fue necesario extraer lo que estaba por debajo del nivel del terreno, luego de cortar las plantas se colocó en un sobre manila, anotando el tratamiento al que corresponde con la fecha del día, se pesó y se llevó al horno a 60°C durante 2 días para pesarlo y registrar el valor de biomasa seca aérea.

Las fechas en las que se muestreo la biomasa fueron:

Tabla 9: Fechas de muestreo de la biomasa aérea

N°	Fecha	Días después de la siembra
1	21/05/2019	16
2	28/05/2019	22
3	01/06/2019	27
4	08/06/2019	34
5	14/06/2019	40
6	05/08/2019	92



Figura 29: Collage de fotografías del muestreo de la biomasa aérea

d.2 Muestreo de la cobertura del dosel

El crecimiento del dosel del zapallito italiano, según lo observado tuvo una expansión muy rápida, por ello inicialmente se pensó en realizar muestreos de forma constante hasta el final de su periodo vegetativo, pero debido a que el espacio entre líneas no fue el adecuado, al momento de transitar con los equipos para tomar la fotografía se empezó a maltratar los tallos y las hojas, por lo cual se decidió que el muestreo realizado el día 45 después de la siembra sea el último ya que las flores estaban brotando y se quiso evitar maltratar las flores y frutos.

El muestreo de la cobertura del dosel se realizó con la ayuda de un trípode modificado el cual tenía una ranura especial para el celular para la toma de fotografía, para ello los días en los que se realizó el monitoreo se seleccionó al azar la planta más representativa por cada tratamiento, se llevó el trípode hasta dicho punto se instaló y se colocó la cámara en la ranura a una altura aproximada de 1.60 y 1.70, luego se niveló el trípode y finalmente se tomó la fotografía, esto se repite para el muestreo en cada punto.

Las fechas en las que se muestreo la cobertura del dosel fueron:

Tabla 10: Fechas de muestreo de la cobertura del dosel

N°	Fecha	Días después de la siembra
1	14/05/2019	9
2	21/05/2019	16
3	02/06/2019	28
4	09/06/2019	35
5	15/06/2019	41

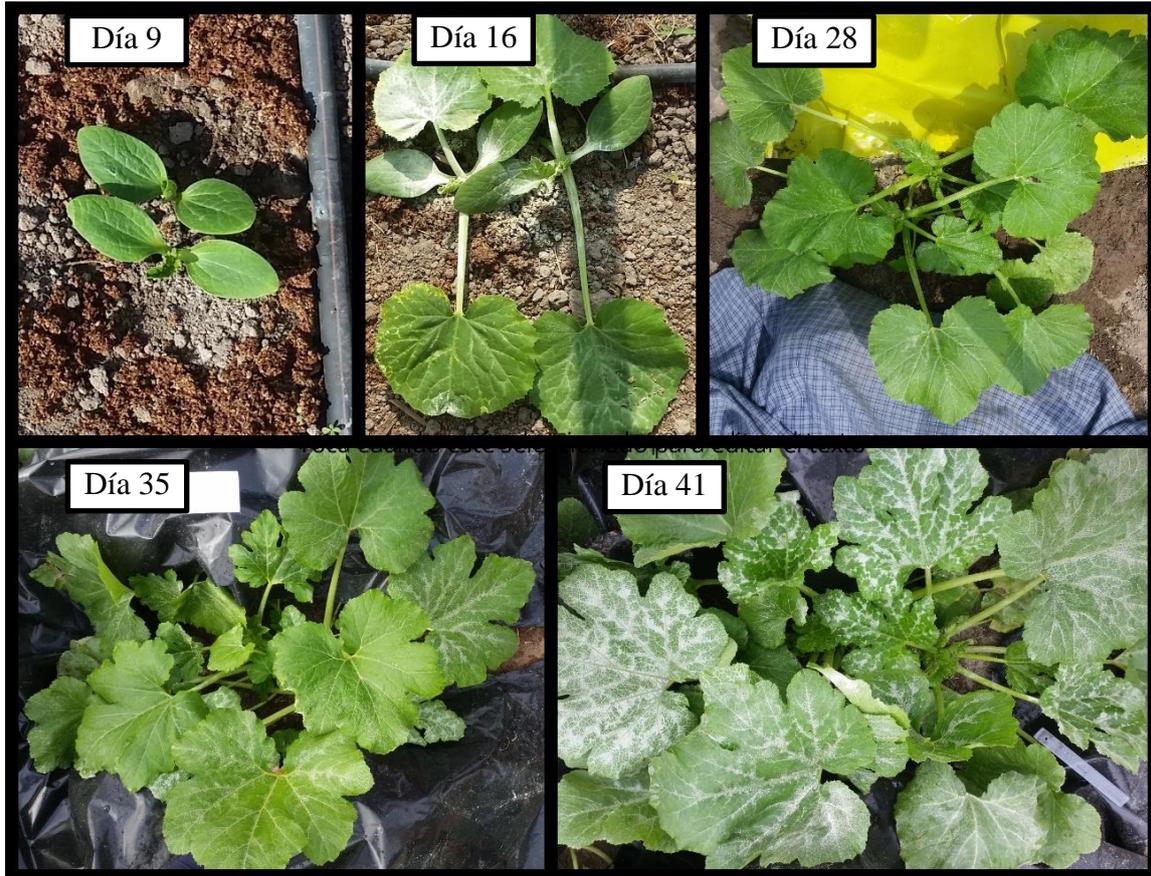


Figura 30: Collage de fotografías del crecimiento del dosel

Con los datos de cobertura y por medio de la siguiente formula, se elaboró la curva de Cobertura del dosel (%) vs Días después de la siembra.

$$CC = \frac{\text{Superficie del suelo cubierta por el dosel verde}}{\text{Unidad de superficie del terreno}} \quad (8)$$

Donde, el valor de la superficie de terreno será estimada a partir del marco de plantación, en este caso es 1 metro entre líneas y 0.4 metros entre plantas.

$$\text{Unidad de superficie del terreno} = 100 \text{ (cm)} * 40 \text{ (cm)} = 4000 \text{ cm}^2$$

Con estas fórmulas se elaboraron las curvas que fueron comparadas con lo simulado por el modelo AQUACROP.

d.3 Muestreo de la Raíz

Para medir la profundidad de la raíz fue necesario extraer plantas de zapallito italiano, debido a que no se contaba con la cantidad necesaria de plantas para extraer muestras de cada tratamiento de riego se optó por extraer 2 muestras del tratamiento de riego equivalente al 100% de la Eto por considerarse representativa a los demás tratamientos y se contaba con la cantidad necesaria de plantas en esa hilera de riego para extraer. Para realizar el muestreo se realizó un corte en el terreno de 0.3 x 1 m aproximadamente alrededor y se tuvo cuidado de no interferir con las raíces de la planta aledaña, se extrajo una planta el día 18 y el día 41 después de la siembra, una vez extraída se procedió a lavar el suelo hasta quedar solo la planta, luego se secó a temperatura ambiente y se procedió a medir todas las raíces principales de la planta para poder aproximar el valor de la profundidad de raíz efectiva mínima y máxima que se ingresará al modelo AQUACROP.



Figura 31: Collage de fotografías del muestreo de raíces

d.4 Muestreo del contenido de humedad

El contenido de humedad del suelo se muestreo a través de 8 sensores de humedad ubicados a profundidades de 10 y 30 cm en una línea de goteo correspondiente a cada tratamiento de riego. Los sensores y data logger fueron instalados previo a la siembra por lo cual se tiene registrado el contenido de humedad del suelo desde la siembra hasta la última cosecha, cabe resaltar que el contenido inicial del suelo al inicio del periodo vegetativo fue a capacidad de campo, ya que como se mencionó anteriormente se rego de 3 a 4 horas de forma diaria durante 1 semana antes de la siembra.

Periódicamente se llevó una laptop para verificar que el sensor funcione correctamente y verificar las lecturas tomadas, el día 05 de agosto del 2019 se dio la última cosecha, por lo cual se retiraron los sensores y los data logger. Luego estos fueron llevados al laboratorio y mediante un cable USB y el software Data trac se descargó la data almacenada de los 8 sensores para analizarlas y procesarlas.



Figura 32: Collage de fotografías del monitoreo de los sensores

Debido a que la data recopilada fue cada 2 horas y el modelo solo simula el contenido de humedad diario, por lo cual se optó por tomar el valor mayor de cada día, ya que representa la humedad del suelo luego del riego diario, con este criterio se generó las curvas de humedad para compararlas con las del modelo.

d.5 Cosecha

En cada planta de Zapallito italiano brotaron muchas flores a lo largo del periodo de floración el cual inicio el día 12 de junio del 2019 correspondiente al día 38 después de la siembra, debido a esto hubo 6 cosechas en las cuales se obtuvo frutos de zapallito italiano de diversos tamaños, en los cuales los pequeños miden de 0 a 10 cm, los medianos de 10 a 20 cm y los grandes mayores a 20 cm. Para el caso del modelo en AQUACROP se tomó solo la cosecha total sin diferenciación entre tamaños.

Para cosechar solo se necesitaron tijeras y varias bolsas para colocar los frutos y diferenciarlos por tratamientos y tamaños, ya que posteriormente se llevaron al laboratorio para pesarlos, las fechas en las que se cosecharon son las siguientes:

Tabla 11: Fechas de cosecha del zapallito italiano

N°	Fecha	Días después de la siembra
1	30/06/2019	56
2	07/07/2019	63
3	14/07/2019	70
4	20/07/2019	76
5	25/07/2019	81
6	05/08/2019	92



Figura 33: Collage de fotografías de las cosechas

3.3.2. Fase de calibración del modelo

Para calibrar el modelo realizado en AQUACROP fue necesario primero hacer un análisis de sensibilidad a todos los parámetros, segundo con el análisis de sensibilidad realizado se procedió a realizar la calibración, variando el valor de estas variables hasta obtener la mayor precisión entre los valores simulados y los muestreados en campo.

a. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad fue un paso muy importante para analizar los parámetros de AQUACROP y su influencia sobre los resultados de biomasa, rendimiento, cobertura del dosel y contenido de humedad del suelo. El análisis se realizó de la siguiente forma: Primero se identificó todas los parámetros que debían ajustarse en el modelo, segundo se anotó los valores iniciales de dichas variables, tercero se varió entre -30% y + 30 % su valor original y se fue analizando el impacto sobre los resultados, finalmente se realizó una gráfica en la cual se diferenció los parámetros de mayor sensibilidad del modelo, esto se realizó para los 4 modelos, correspondientes a cada tratamiento de riego, de forma independiente.

En la tabla 12 se muestra los valores iniciales de los parámetros de AQUACROP a los que se aplicó el análisis de sensibilidad:

Tabla 12: Valores iniciales o por defecto de los parámetros de AQUACROP a los cuales se realizará un análisis de sensibilidad

Parámetros	Descripción	Valor original	unidad
Parámetros de Cobertura del dosel y desarrollo fenológico			
Tb:	Temperatura base	10	°C
Tsup	Temperatura superior	32	°C
cc_0	Cobertura inicial del dosel	0.13	%
CGC	Coefficiente de crecimiento de cultivo	26.10	% dia ⁻¹
CDC	Coefficiente de disminución del dosel	16.6	% GDD ⁻¹
Desarrollo de raíces			
Rtx	Prof. Máxima de raíz	0.3	m
Rtn	Prof. Mínima de raíz	0.1	m
sf-rtx	Factor de forma de expansión de raíz	1	GDD
Transpiración de cultivo			
$K_{c_{tr}}$	Coefficiente de transpiración máxima del cultivo	1.10	-
F age	Coefficiente de disminución del dosel como efecto del envejecimiento	0.15	-
Ground Cover	Efecto de la cubierta del dosel en la reducción de la evaporación del suelo en la etapa final de la temporada	50.00	-
Producción de biomasa y rendimiento			
WP*	Producción del agua del cultivo	17	Gram m ⁻²
F yield	Coefficiente de reducción que describe el efecto de los productos sintéticos durante la formación del rendimiento	100	%
Hio	Índice de cosecha de referencia	50	%
Perfomance CO2	Concentración de CO2	50	%
Estrés hídrico y térmico			
Pex-P,upper	Umbral superior de agotamiento del agua del suelo que limita la expansión del dosel	0.20	-
Pex-p, Lower	Umbral inferior del agotamiento del agua del suelo que limita la expansión del dosel.	0.60	-
Sf-exp	Factor de forma para el coeficiente de estrés hídrico para la expansión del dosel	2.00	-
P(uppsto)	Umbral superior del agotamiento del agua del suelo que limita la conductancia estomática	0.50	-
Sf-psto	Factor de forma para el coeficiente del estrés hídrico para el control de la estoma.	3.00	-

<<Continuación>>

Psen	Umbral de agotamiento del agua del suelo para el control de la senescencia temprana del dosel -límite superior	0.70	-
Sf-psen	Factor de forma del coeficiente de estrés hídrico en la senescencia del dosel	3.00	-
K _{SAT}	porcentaje de agua por debajo de la saturación en la cual empieza el estrés por aireación	2.00	% VOL
Incremento de HI	Efecto positivo del estrés hídrico en HI antes de la floración	4.00	%
Ppol (upper)	Umbral superior para el agotamiento del agua de suelo por limitación de la polinización	0.90	-
a (Hi)	Factor de efecto positivo del estrés hídrico en HI durante la formación del rendimiento	1.00	
b (Hi)	Factor de efecto negativo del estrés hídrico en HI durante la formación del rendimiento	8.00	
Máximo incremento de HI	Porcentaje de crecimiento de HI	15.00	%
Kstr	Umbral inferior de temperatura para el estrés por frío en la transpiración del cultivo	6.00	GDD
Ks pol,c	Umbral superior de temperatura fría, debajo de la cual afecta la polinización	10.0	°C
Ks pol,h	Umbral inferior de temperatura caliente, por encima de la cual afecta la polinización	32.0	°C
Características del suelo			
Penetrability	Penetrabilidad de las raíces	100.0	
CN	El número de curva (CN) se requiere para la simulación de la escorrentía superficial	46.0	
REW	El agua fácilmente evaporable (REW) expresa la cantidad de agua que se puede evaporar de la capa superficial del suelo en la etapa de limitación de energía	8.0	mm

b. Calibración del modelo AQUACROP

Una vez terminada la fase de campo y realizado el análisis de sensibilidad se calibro el modelo ajustando los parámetros más sensibles hasta lograr la mayor precisión entre los resultados simulados por AQUACROP y la data recopilada en campo. Por lo cual, en base al manual de la FAO de AQUACROP tal como se muestra en la figura 34, se comenzó primero calibrando la cobertura del dosel, segundo la biomasa, tercero el rendimiento y por último el contenido de humedad.

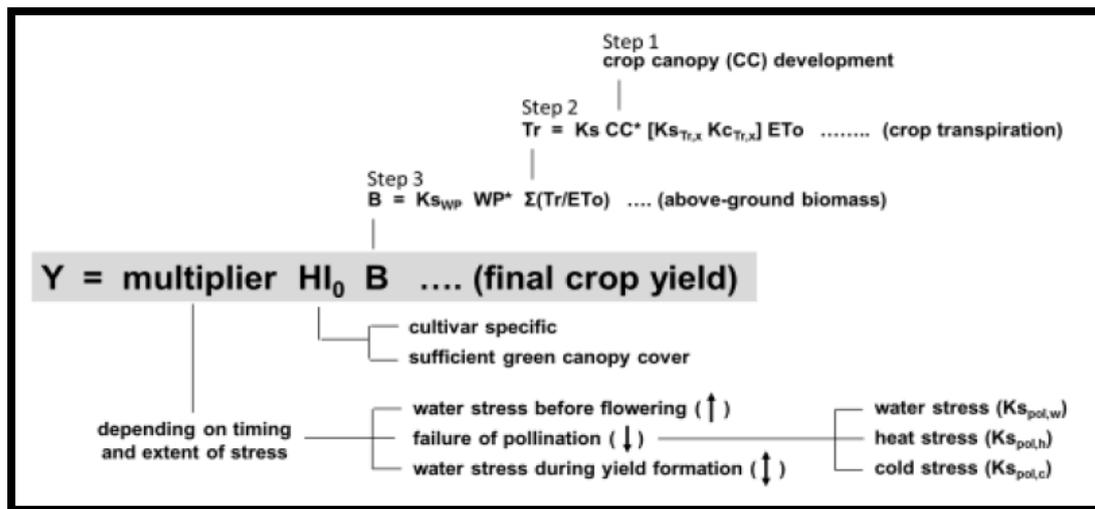


Figura 34: Proceso de simulación de la biomasa y rendimiento en AQUACROP

Fuente: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2017)

Los indicadores estadísticos que se usaron para analizar si la biomasa, rendimiento, cobertura del dosel y contenido de humedad fueron calibrados de forma precisa están establecidos en el manual de la FAO, los indicadores son los mostrados en la siguiente tabla, donde O_i es la data observada y P_i es la data simulada.

Tabla 13: Indicadores estadísticos para analizar la eficiencia del modelo calibrado

Indicador	Valores	Ajuste del modelo
Coeficiente de correlación de Pearson (r) $r = \frac{\sum (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum (O_i - \bar{O})^2 \sum (P_i - \bar{P})^2}}$	≥ 0.9 0.80 – 0.90 0.70 – 0.79 0.50 – 0.69 0 – 0.49 < 0	Muy bueno Bueno Moderadamente bueno Moderado Malo Muy malo
Raíz del error medio cuadrático normalizado (RMSE) $RMSE = \sqrt{\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{n}}$	$\leq 5\%$ 6 – 15% 16 – 25% 26 – 35% 36 – 45% > 46%	Muy bueno Bueno Moderadamente bueno Moderado Malo Muy malo
Coeficiente de eficiencia Nash - Sutcliffe $EF = 1 - \frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (O_i - \bar{O})^2}$	≥ 0.80 0.60 – 0.79 0.40 – 0.59 0 – 0.39 (-10) – 0 $< (-10)$	Muy bueno Bueno Moderadamente bueno Moderado Malo Muy malo
Índice de Willmott (d) $d = 1 - \frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (P_i - \bar{O} + O_i - \bar{O})^2}$	≥ 0.9 0.80 – 0.89 0.65 – 0.79 0.50 – 0.64 0.25 – 0.49 < 0.25	Muy bueno Bueno Moderadamente bueno Moderado Malo Muy malo

Fuente: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2017)

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Muestreo del cultivo

4.1.1. Biomasa aérea seca del zapallito italiano

La biomasa fue muestreada en 6 fechas diferentes y por tratamiento de riego (120%, 100%, 80% y 60% de la Evapotranspiración), el máximo crecimiento de biomasa fue observado entre los días 45 y 50, pero debido a problemas en campo mencionados anteriormente pudo muestrearse la biomasa el último día de la cosecha. Además, se optó por escoger el valor promedio de la biomasa aérea seca de cada fecha muestreada para evaluar la eficiencia del modelo, los valores de la biomasa son los siguientes:

a. Para el tratamiento de riego equivalente al 120% de la evapotranspiración:

Tabla 14: Biomasa aérea seca ($T \times ha^{-1}$) del tratamiento de riego equivalente al 120% de la Eto muestreada en los 3 bloques

Días después de la siembra	Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3	biomasa promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
16	0.018	0.018	0.015	0.017	0.001	8.66
22	0.178	0.159	0.176	0.171	0.010	5.99
27	0.979	0.936	0.964	0.960	0.022	2.25
34	3.178	3.256	3.293	3.242	0.058	1.80
40	4.389	4.359	4.423	4.390	0.032	0.73
92	4.853	4.810	4.923	4.862	0.057	1.17

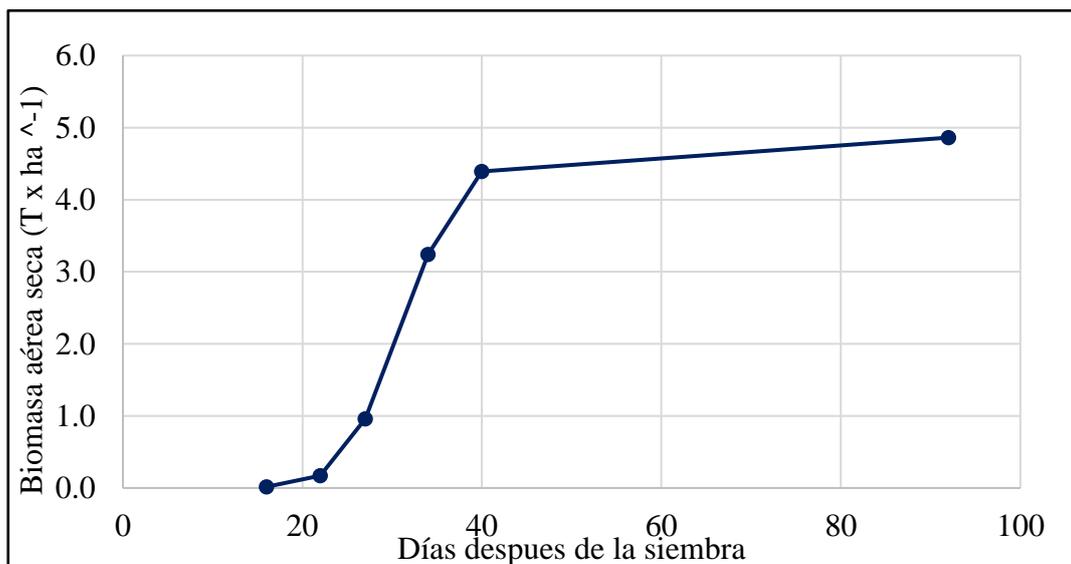


Figura 35: Biomasa aérea seca promedio del tratamiento de riego equivalente al 120% de la Eto en las fechas muestreadas

b. Para el tratamiento de riego equivalente al 100% de la evapotranspiración:

Tabla 15: Biomasa aérea seca ($T \times ha^{-1}$) del tratamiento de riego equivalente al 100% de la Eto muestreada en los 3 bloques

Días después de la siembra	Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3	biomasa promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
16	0.015	0.013	0.020	0.016	0.003	21.53
22	0.146	0.169	0.160	0.158	0.011	7.16
27	0.909	0.935	0.928	0.924	0.014	1.46
34	3.046	2.828	2.998	2.957	0.115	3.88
40	4.151	4.214	4.143	4.169	0.039	0.93
92	4.553	4.695	4.633	4.627	0.071	1.54

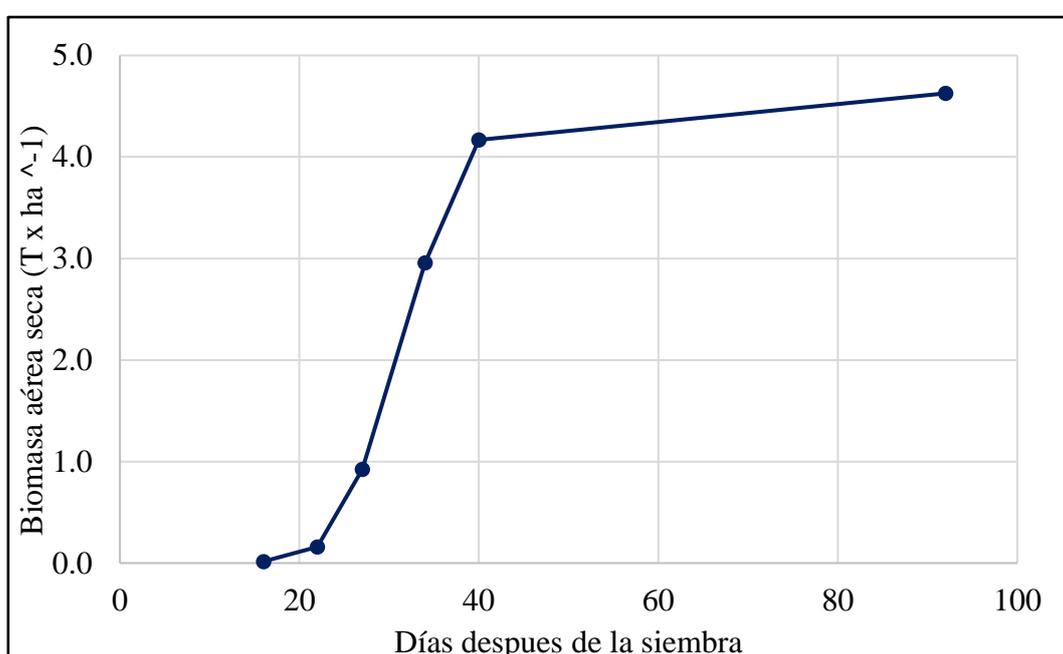


Figura 36: Biomasa aérea seca promedio del tratamiento de riego equivalente al 100% de la Eto en las fechas muestreadas

c. Para el tratamiento de riego equivalente al 80% de la evapotranspiración:

Tabla 16: Biomasa aérea seca ($T \times ha^{-1}$) del tratamiento de riego equivalente al 80% de la Eto muestreada en los 3 bloques

Días después de la siembra	Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3	biomasa promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
16	0.016	0.014	0.013	0.014	0.001	8.81
22	0.159	0.134	0.155	0.149	0.013	8.82
27	0.893	0.905	0.863	0.887	0.022	2.48
34	2.973	2.737	3.017	2.909	0.151	5.18
40	4.053	3.996	4.113	4.054	0.058	1.43
92	4.553	4.593	4.660	4.602	0.054	1.18

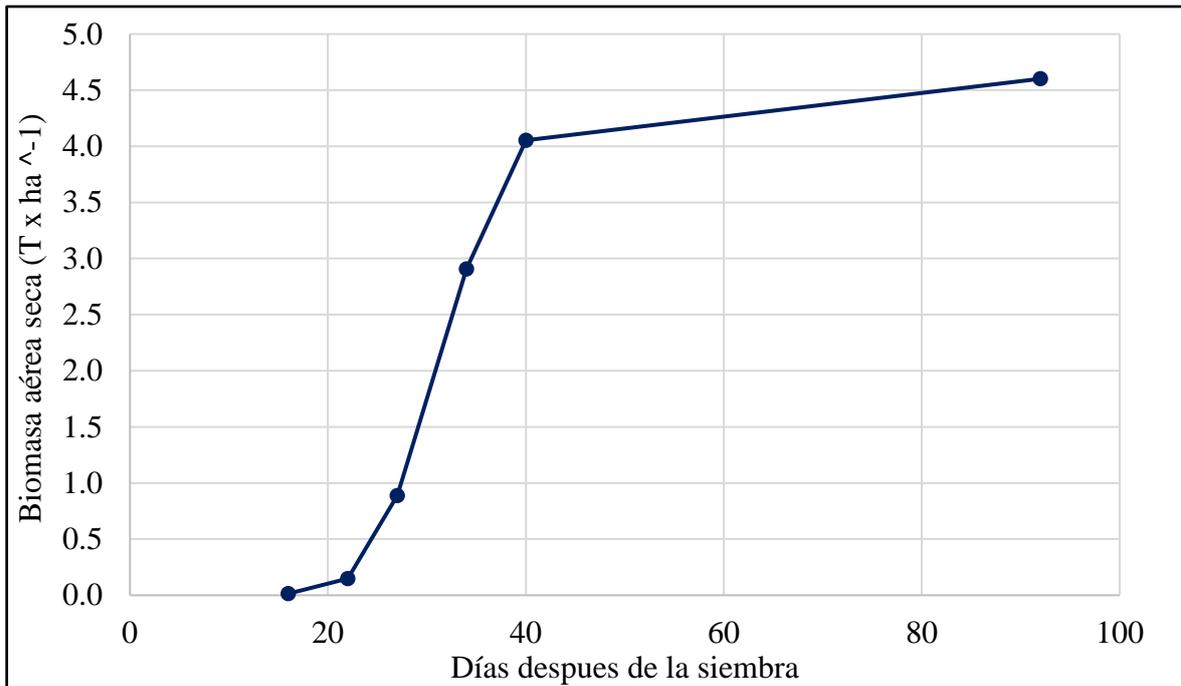


Figura 37: Biomasa aérea seca promedio del tratamiento de riego equivalente al 80% de la Eto en las fechas muestreadas

d. Para el tratamiento de riego equivalente al 60% de la evapotranspiración:

Tabla 17: Biomasa aérea seca (T x ha⁻¹) del tratamiento de riego equivalente al 60% de la Eto muestreada en los 3 bloques

Días después de la siembra	Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3	biomasa promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
16	0.015	0.017	0.013	0.015	0.002	14.24
22	0.154	0.149	0.138	0.147	0.008	5.71
27	0.849	0.858	0.823	0.843	0.018	2.16
34	2.824	2.858	2.921	2.868	0.050	1.73
40	4.003	3.935	4.049	3.995	0.057	1.43
92	4.518	4.408	4.473	4.466	0.055	1.24

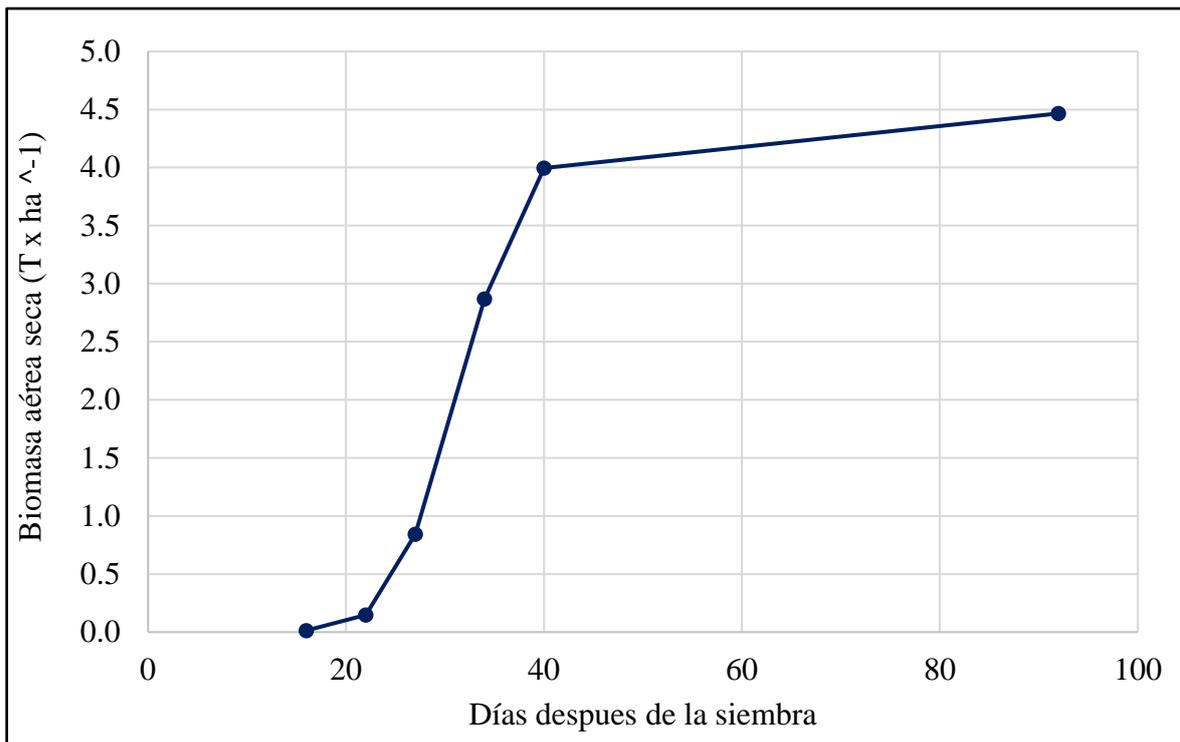


Figura 38: Biomasa aérea seca promedio del tratamiento de riego equivalente al 60% de la Eto en las fechas muestreadas

El diseño experimental basado en la aplicación de tratamientos de riego equivalentes al 120%, 100%, 80% y 60% afectó significativamente el valor final de la biomasa aérea seca $P < 0.05$ (Anexo 5). El tratamiento que tuvo mayor desarrollo para la biomasa aérea seca fue el de 120% de la evapotranspiración y según la prueba de Turkey los tratamientos de 100 y 80% obtuvieron desarrollos similares.

Los resultados finales de biomasa aérea seca de cada tratamiento de riego se encuentra en el rango de valores hallados por (Victoriano, 2015) y (Orozco et al., 2016) que son de 6.22 T x ha^{-1} y 2.98 T x ha^{-1} respectivamente. Cabe resaltar que el crecimiento del zapallito italiano depende de las condiciones climáticas, el tipo de suelo y la dosis de agua suministrada.

En la figura 39 se puede observar, una comparación gráfica entre los resultados promedios de biomasa aérea seca de todos los tratamientos de riego. En la cual se puede distinguir una diferencia entre las biomásas por tratamientos de riego, donde se observa una similitud entre la biomasa del tratamiento de riego equivalente al 100% y 80% de la Eto.

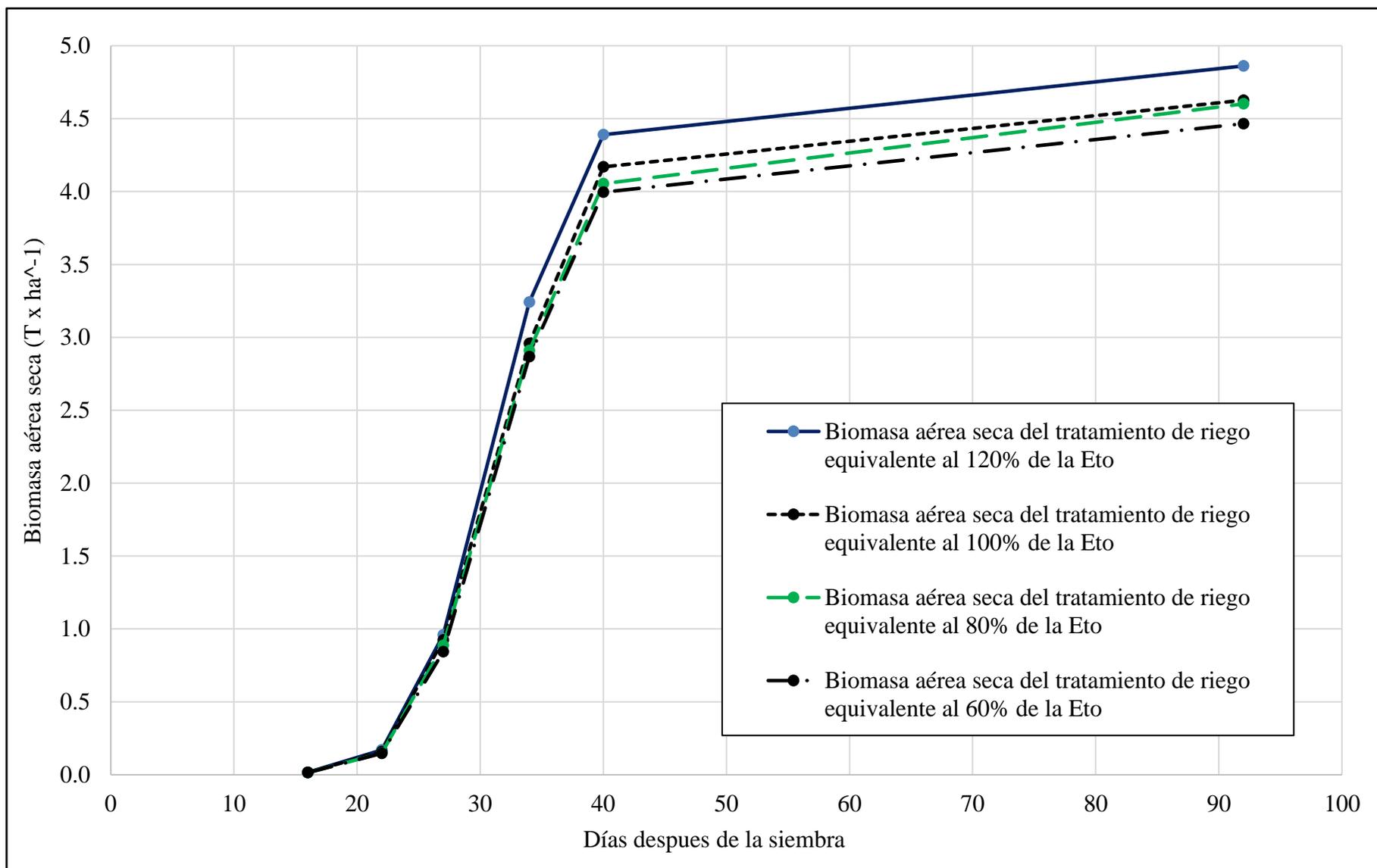


Figura 39: Comparación de la biomasa aérea seca promedio por tratamiento de riego

4.1.2. Cobertura del dosel del zapallito italiano

El crecimiento del dosel del zapallito italiano fue muestreado por cada tratamiento en 5 fechas diferentes, ocurriendo el máximo crecimiento del dosel aproximadamente el día 41 después de la siembra, no se pudo muestrear en días posteriores al 41 por los problemas mencionados en el punto 3.3, no se observó una senescencia significativa del dosel hasta la última cosecha realizada. Al igual que en el caso de la biomasa se tomó los valores promedio de cada muestreo para evaluar la eficiencia del modelo. Los valores con los cuales se trabajó son los siguientes:

a. Para el tratamiento de riego equivalente al 120% de la evapotranspiración:

Tabla 18: Cobertura del dosel (%) del tratamiento de riego equivalente al 120% de la Eto muestreada en los 3 bloques

Días después de la siembra	Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3	Cobertura del dosel promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
9	1.1	1.1	0.7	0.9	0.196	20.77
16	4.8	6.8	3.8	5.1	1.509	29.53
28	40.6	38.8	45.8	41.7	3.640	8.72
35	47.5	58.8	55.9	54.1	5.886	10.89
41	92.2	86.4	82.6	87.1	4.822	5.54

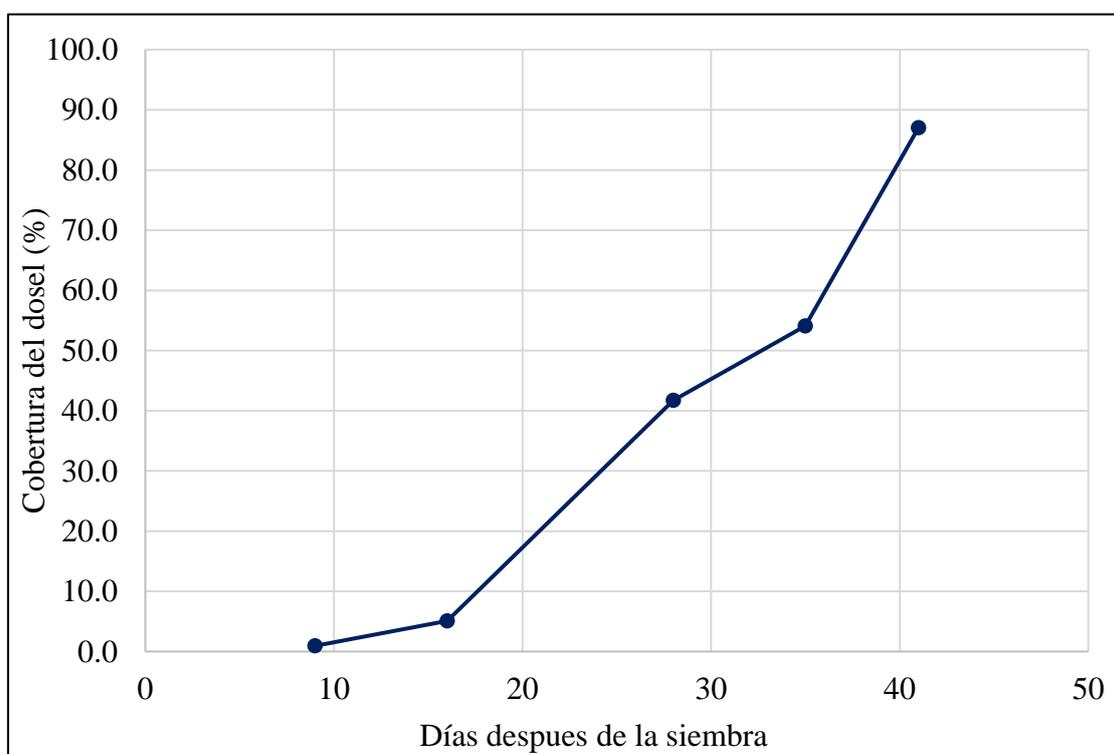


Figura 40: Cobertura del dosel promedio del tratamiento de riego equivalente al 120% de la Eto en las fechas muestreadas

b. Para el tratamiento de riego equivalente al 100% de la evapotranspiración:

Tabla 19: Cobertura del dosel (%) del tratamiento de riego equivalente al 100% de la Eto muestreada en los 3 bloques

Días después de la siembra	Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3	Cobertura del dosel promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
9	1.0	0.9	0.8	0.9	0.114	12.37
16	6.1	6.6	4.6	5.8	1.026	17.77
28	35.4	34.5	39.1	36.3	2.400	6.61
35	50.8	55.7	53.1	53.2	2.475	4.65
41	82.7	89.6	77.4	83.2	6.134	7.37

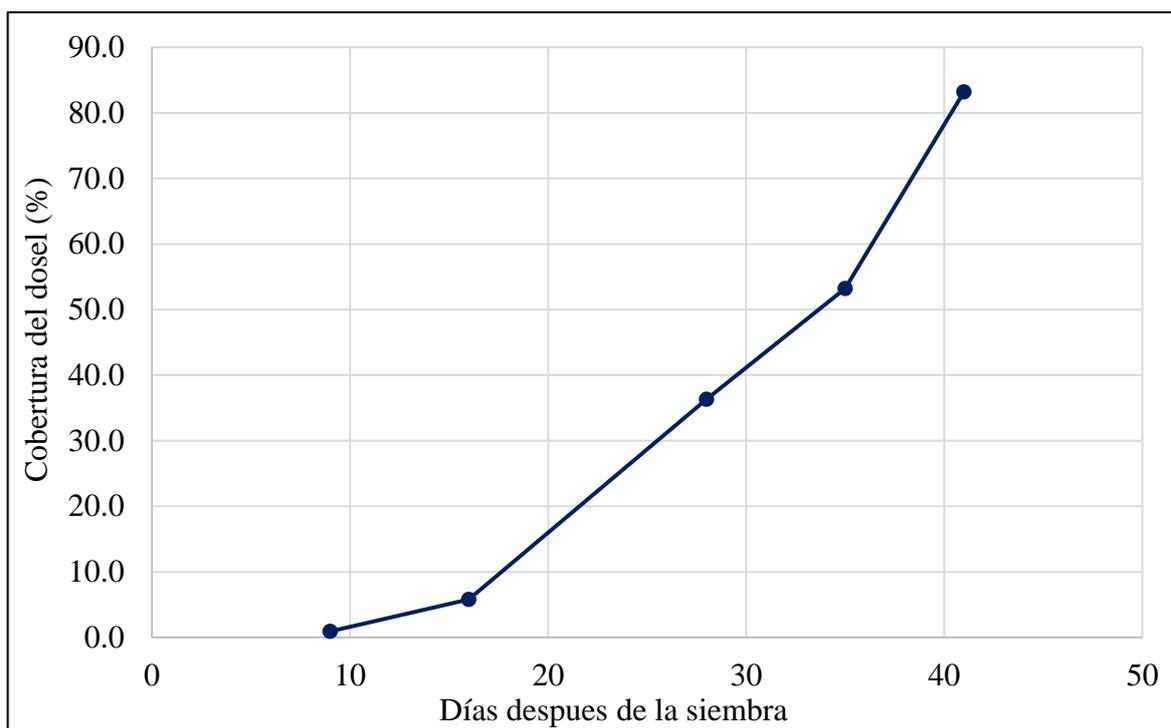


Figura 41: Cobertura del dosel promedio del tratamiento de riego equivalente al 100% de la Eto en las fechas muestreadas

c. Para el tratamiento de riego equivalente al 80% de la evapotranspiración:

Tabla 20: Cobertura del dosel (%) del tratamiento de riego equivalente al 80% de la Eto muestreada en los 3 bloques

Días después de la siembra	Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3	Cobertura del dosel promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
9	0.9	1.1	0.9	1.0	0.087	9.11
16	5.1	6.4	5.4	5.6	0.662	11.78
28	35.5	41.2	41.6	39.4	3.456	8.76
35	50.0	54.8	49.8	51.5	2.842	5.51
41	86.5	83.0	78.7	82.7	3.910	4.73

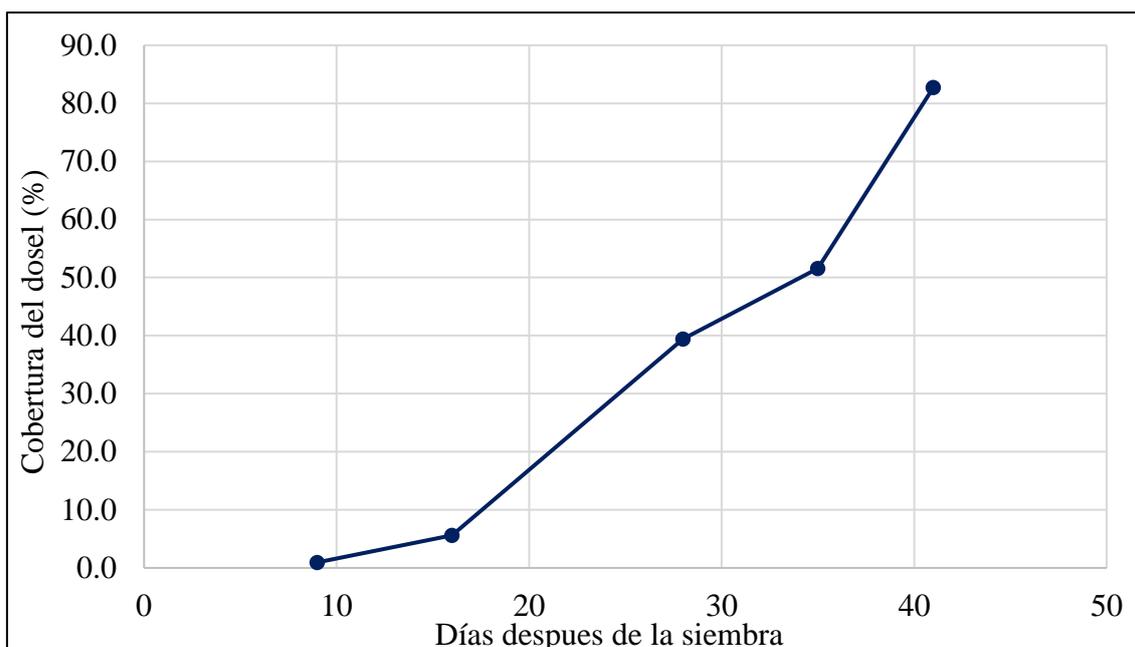


Figura 42: Cobertura del dosel promedio del tratamiento de riego equivalente al 80% de la Eto en las fechas muestreadas

d. Para el tratamiento de riego equivalente al 60% de la evapotranspiración:

Tabla 21: Cobertura del dosel (%) del tratamiento de riego equivalente al 60% de la Eto muestreada en los 3 bloques

Días después de la siembra	Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3	Cobertura del dosel promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
9	1.2	0.8	1.0	1.0	0.225	22.50
16	5.8	5.1	5.9	5.6	0.400	7.18
28	39.5	40.4	38.3	39.4	1.075	2.73
35	54.1	49.7	53.0	52.3	2.322	4.44
41	78.3	74.8	82.9	78.6	4.053	5.15

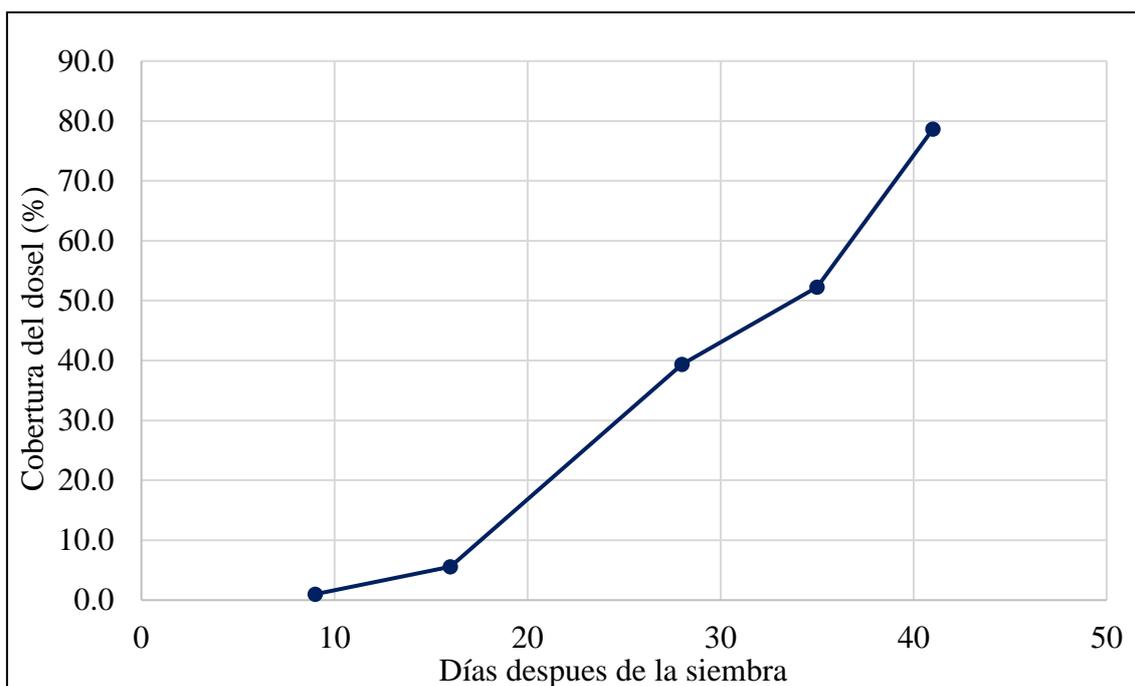


Figura 43: Cobertura del dosel promedio del tratamiento de riego equivalente al 60% de la Eto en las fechas muestreadas

El análisis de varianza indica que el diseño experimental de láminas de riego equivalentes al 120%, 100%, 80% y 60% no afectó significativamente al crecimiento final de la cobertura del dosel $P > 0.05$. (Anexo 5)

Según indica la prueba de Turkey (tabla 64), la cobertura del dosel tuvo un mayor crecimiento con una lámina equivalente al 120% de la Eto y un menor crecimiento con la prueba de 60% de la Eto, además indica que estadísticamente el crecimiento del dosel es similar. En la figura 44 se muestra el crecimiento de la cobertura del dosel por tratamiento de riego, en la cual se observa que el mayor crecimiento lo logra el tratamiento de riego equivalente al 120% de la Eto y el menor la equivalente al 60% de la Eto, mientras que las de 100% y 80% de la Eto logran un crecimiento final similar.

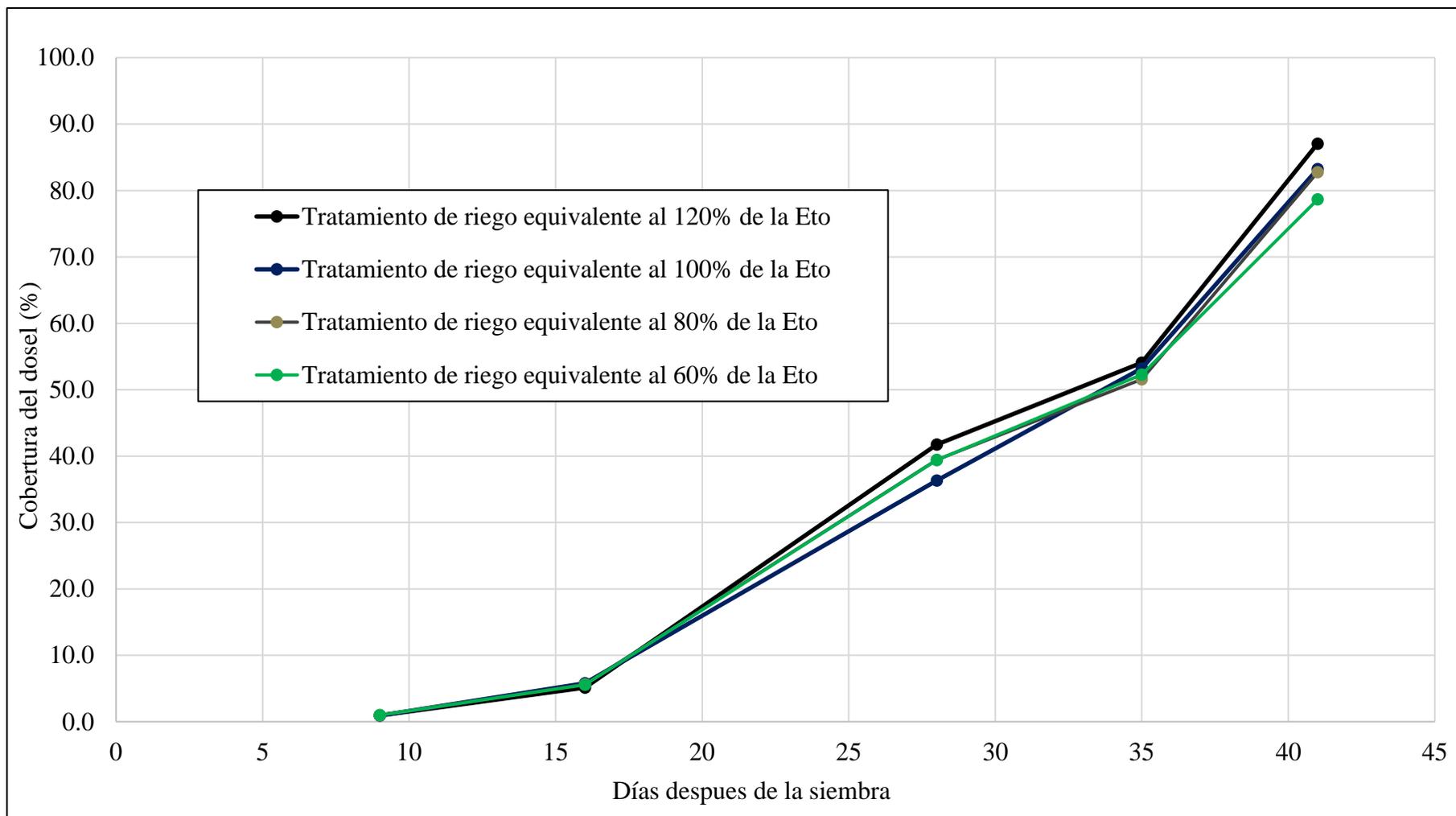


Figura 44: Cobertura del dosel promedio por tratamiento en las fechas muestreadas

4.1.3. Raíces del zapallito italiano

Durante el periodo de desarrollo del zapallito italiano se realizaron 2 muestreos a la raíz, en la cual el primer muestreo fue el día 18 después de la siembra, en el cual se observó que la raíz menor midió 13.5 cm y la mayor midió 29 cm, teniendo como un promedio una profundidad de raíz de 19.4 cm. El segundo muestreo se realizó el día 41 después de la siembra, en la cual se observó 10 raíces principales de las cuales la menor midió 38cm y el máximo 50 cm. Además, las investigaciones realizadas por (Mata, 2004) indican que la profundidad de raíz en etapas de desarrollo es de 0.19 a 0.30 m, mientras que la (Food and Agriculture Organization of the United Nations(FAO), 2006) indica que las máximas profundidades de raíz del zapallito italiano varían de 0.6 a 1.0 m. Lo que muestra que las profundidades de raíz registradas están dentro del rango de variación hallados en otras investigaciones. En la tabla 23 se muestra las profundidades mínimas y máximas que serán ingresadas al modelo AQUACROP.

Tabla 22: Medición de la profundidad de las raíces muestreadas

DDS	N° raíz medida	Longitud (cm)	Mínimo	Máximo	Promedio
18	1	14			
	2	13.5			
	3	14.5			
	4	23			
	5	29	13.50	29.00	19.44
	6	18			
	7	19.5			
	8	24			
41	1	42			
	2	45			
	3	47			
	4	43			
	5	50	38.00	50.00	44.20
	6	44			
	7	38			
	8	48			
	9	47			
	10	38			

Tabla 23: Profundidad mínima y máxima efectiva de raíz para el modelo AQUACROP

Medida de raíces para el modelo	
Profundidad mínima de raíz	10.00 cm
Profundidad máxima de raíz	50.00 cm

4.1.4. Rendimiento del zapallito italiano

Durante la etapa de floración se realizó un seguimiento frecuente a los frutos lo cual ayudo a elegir las fechas apropiadas para la cosecha. Se realizaron 6 cosechas en la cual el fruto fue diferenciado por tratamiento y tamaño, pero para evaluar los resultados con el modelo se optó por tomar el rendimiento total por tratamiento de los cuales se tomó el valor promedio.

Tabla 24: Rendimiento total ($T \times ha^{-1}$) del zapallito italiano

Tratamientos de riego	Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3	Rendimiento promedio	Desviación estándar $T \times ha^{-1}$	Coefficiente de variación (%)
120% Eto	24.259	23.891	24.184	24.112	0.194	0.806
100% Eto	18.970	19.573	19.361	19.301	0.306	1.585
80% Eto	18.666	19.127	19.335	19.043	0.343	1.799
60% Eto	17.683	16.947	18.447	17.692	0.750	4.242

En la tabla 24 se muestra los rendimientos obtenidos por tratamiento de riego y bloque de repetición, en el cual la desviación estándar varía de 0.194 a 0.75 $T \times ha^{-1}$ y el coeficiente de variación de 0.806 a 4.242 %. El análisis de varianza mostro que existe diferencia significativa en el rendimiento por tratamiento de riego $P < 0.05$ (Anexo 5). Además, la prueba de Turkey permitió identificar que el rendimiento del tratamiento de riego de 120% de la Eto fue mayor y que los rendimientos de los tratamientos de 100 y 80 % de la Eto son similares.

(Chipa Ramos, 2012) sostiene que el zapallito italiano requiere riegos abundantes que varían de 500 a 600 mm en riegos por surcos con el fin de obtener buenos rendimientos, esto permite entender que una lámina superior a la evapotranspiración potencial (120% Eto) haya registrado un mayor rendimiento, ya que la lámina total aplicada al tratamiento de mayor riego fue de 145 mm el cual transformado a una eficiencia de riego por surcos (30%) equivale a 500 mm aproximadamente. Es decir, basándose en lo que manifiesta (Chipa Ramos, 2012) la lámina aplicada al tratamiento de riego equivalente del 120% de la Eto fue la adecuada para obtener un buen rendimiento. Además el rendimiento promedio obtenido por tratamiento de riego se encuentra en el rango de variación de rendimientos hallado por (Montenegro Rojas, 2018) que varía de 22.736 $T \times ha^{-1}$ a 25.985 $T \times ha^{-1}$ y por (Ugás, 2000), el cual indica una variación de rendimiento de zapallitos por tamaños medianos y grandes de 14 $T \times ha^{-1}$ a 21 $T \times ha^{-1}$ respectivamente.

4.2. Muestreo del contenido de humedad

El contenido de humedad del suelo fue muestreado a profundidades de 10 y 30 cm mediante los sensores GS-3, para evaluar la eficiencia del modelo se usó la humedad registrada a la profundidad de 30 cm, ya que se consideró más representativa. El contenido de humedad registrado por los sensores se muestra en la figura 45.

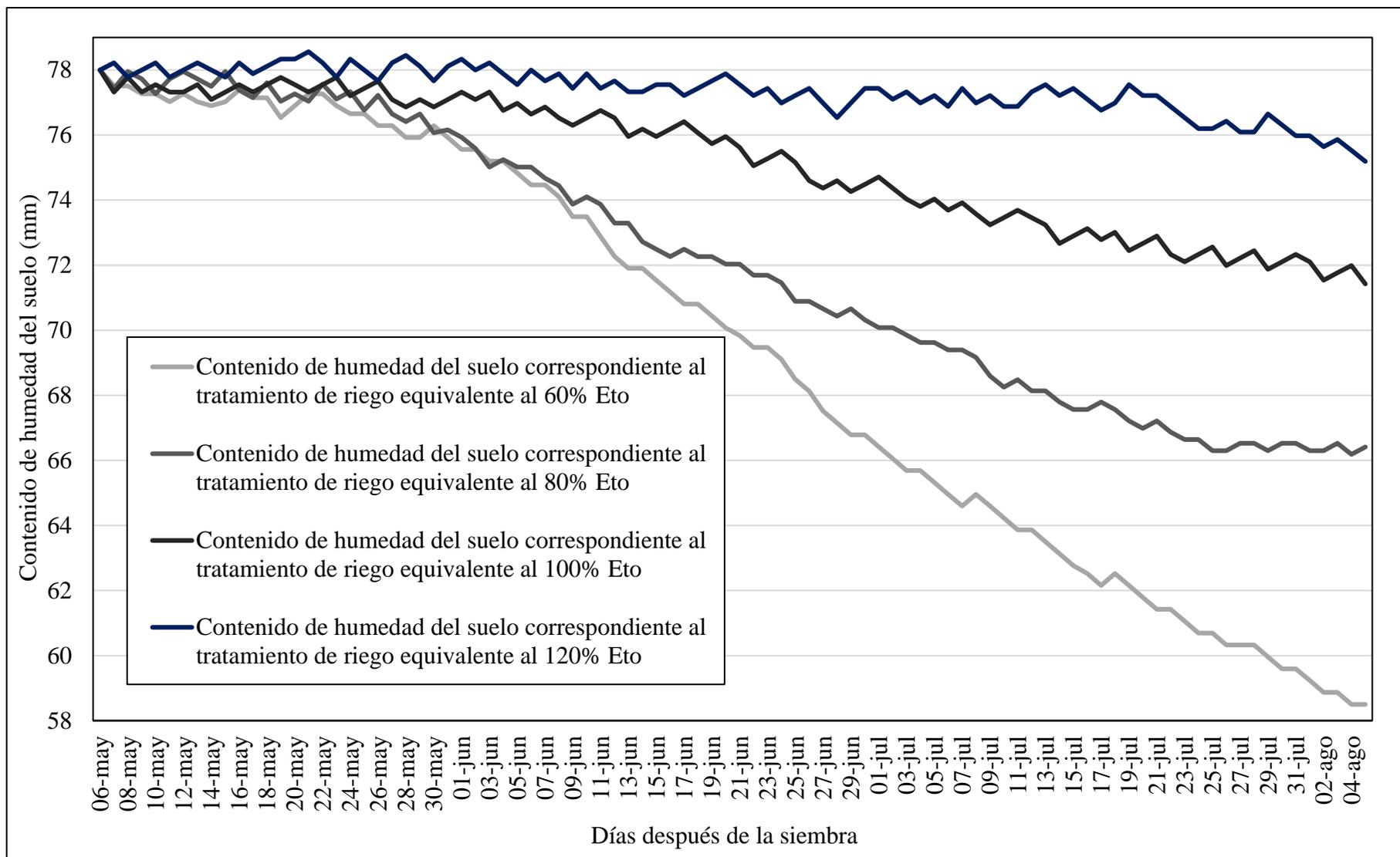


Figura 45: Contenido de humedad por tratamiento de riego desde la fecha de siembra hasta la última cosecha

4.3. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad fue realizado a todos los parámetros mostrados en la tabla 12, a los cuales se hizo una variación del -30 y +30 % de su valor para evaluar el efecto que tienen sobre los resultados de biomasa, rendimiento, cobertura del dosel y contenido de humedad del suelo a 30 cm de profundidad, fue necesario evaluar los parámetros de los 4 modelos los cuales corresponden, cada uno a un tratamiento de riego equivalente al 120%, 100%, 80% y 60% de la Eto. Este procedimiento permitió identificar que los parámetros que tienen un mayor efecto sobre los resultados son similares para los 4 modelos, estos son: Coeficiente de disminución del dosel (CDC), coeficiente de transpiración máxima del cultivo ($K_{c\ tr,x}$), coeficiente de disminución del dosel como efecto del envejecimiento (f_{age}), productividad del agua de la biomasa (Wp^*), Índice de cosecha de referencia (Hio), coeficiente de reducción que describe el efecto de los productos sintéticos durante la formación del rendimiento (f_{yield}) y el umbral inferior de temperatura para el estrés por frío en la transpiración del cultivo (K_{str}).

Los parámetros más sensibles identificados para el zapallito italiano, coinciden con los mostrados en la tabla 2, 3 y 4 que corresponden a modelos de tomate, cebolla y pimiento respectivamente, se realizó esta comparación porque los cultivos mencionados y el zapallito italiano son hortalizas. Dentro del grupo de parámetros que deben calibrarse y son más sensibles existe similitud con las hortalizas mencionadas estos parámetros más sensibles son: Wp^* y Hio .

En las figuras 46, 47, 48 y 49 se muestra la variación porcentual de los parámetros más sensibles, mencionados en el párrafo anterior, y su efecto sobre la biomasa aérea seca.

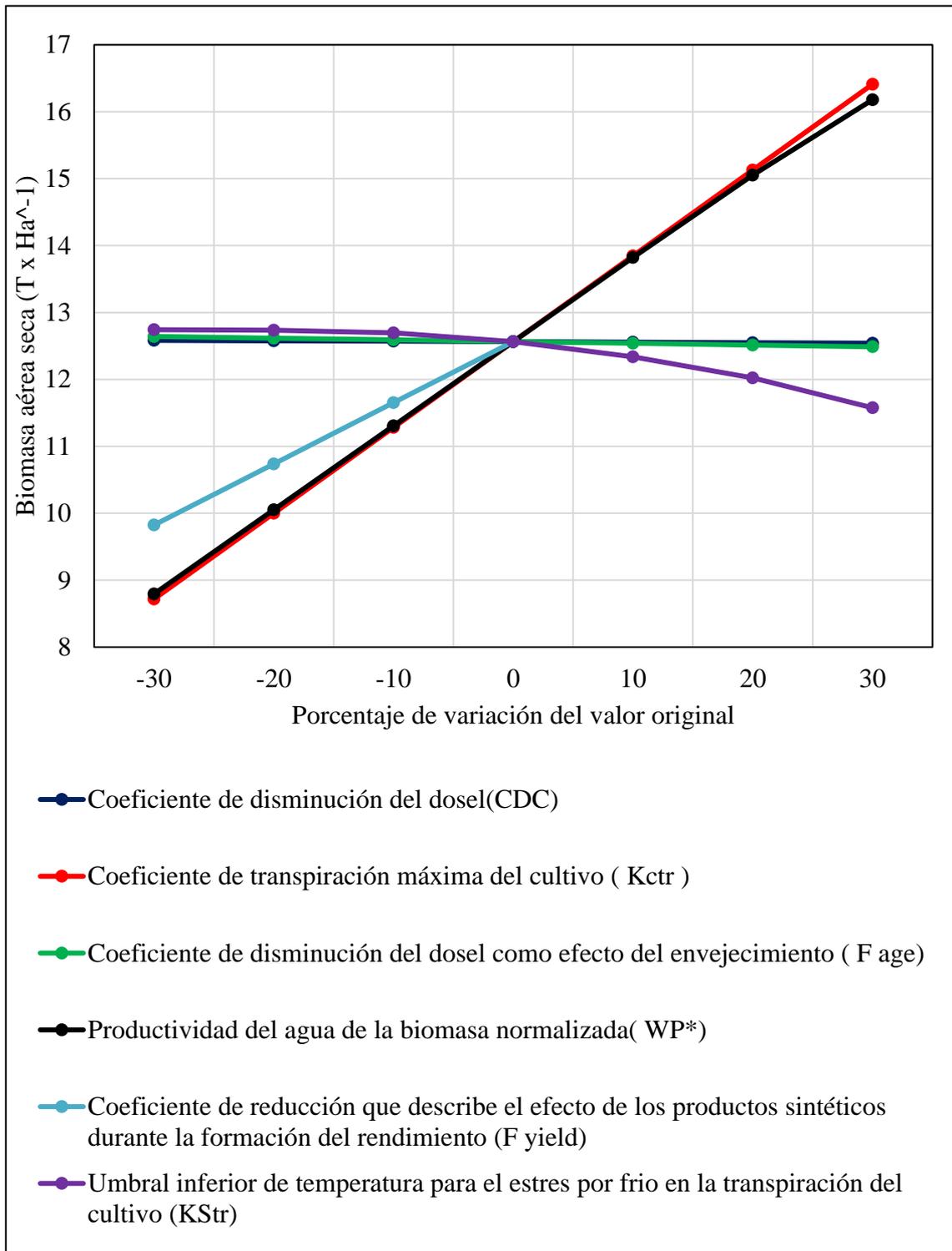


Figura 46: Análisis de sensibilidad para el modelo correspondiente al tratamiento de riego equivalente al 120% de la Evapotranspiración

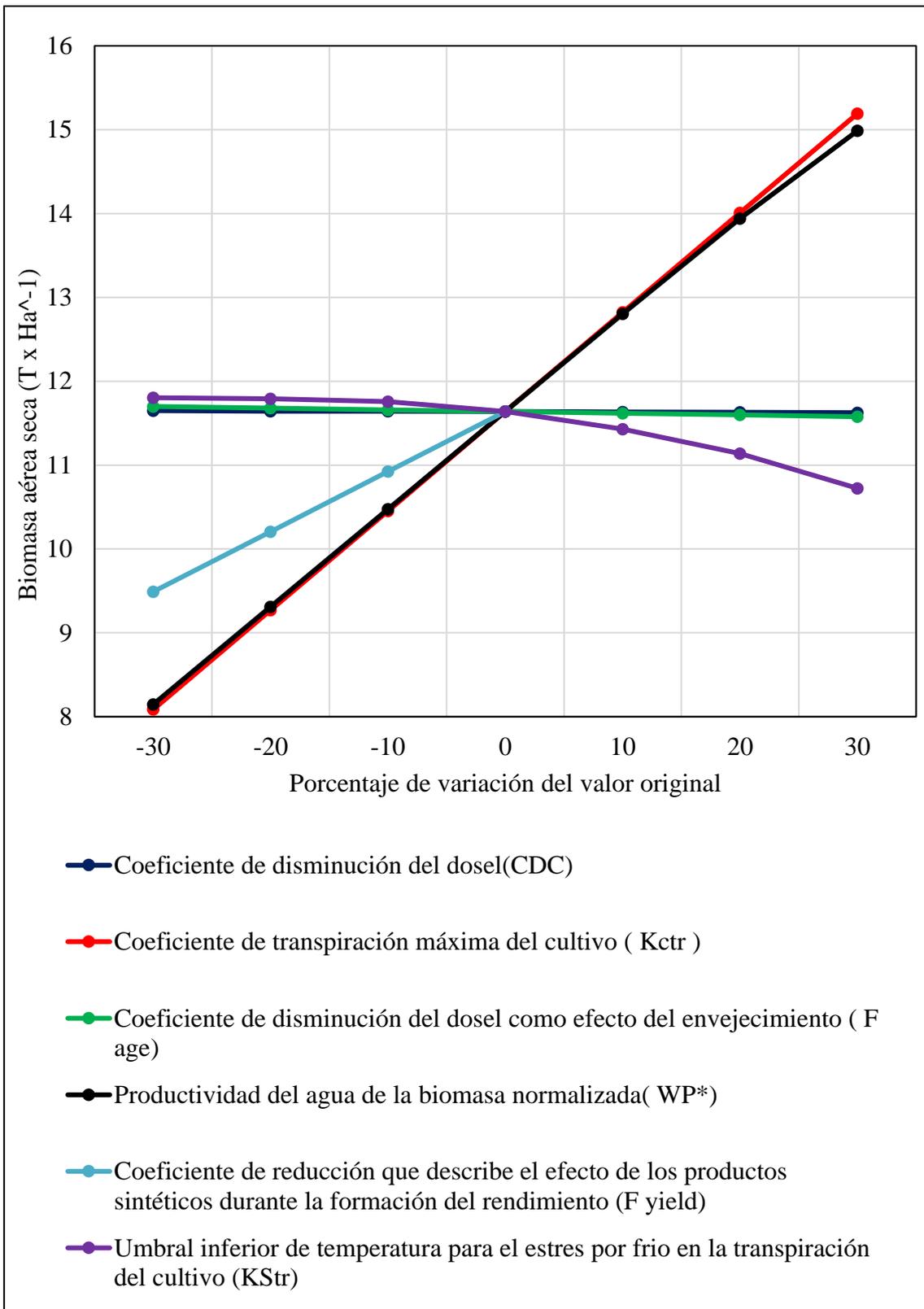


Figura 47: Análisis de sensibilidad para el modelo correspondiente al tratamiento de riego equivalente al 100% de la Evapotranspiración

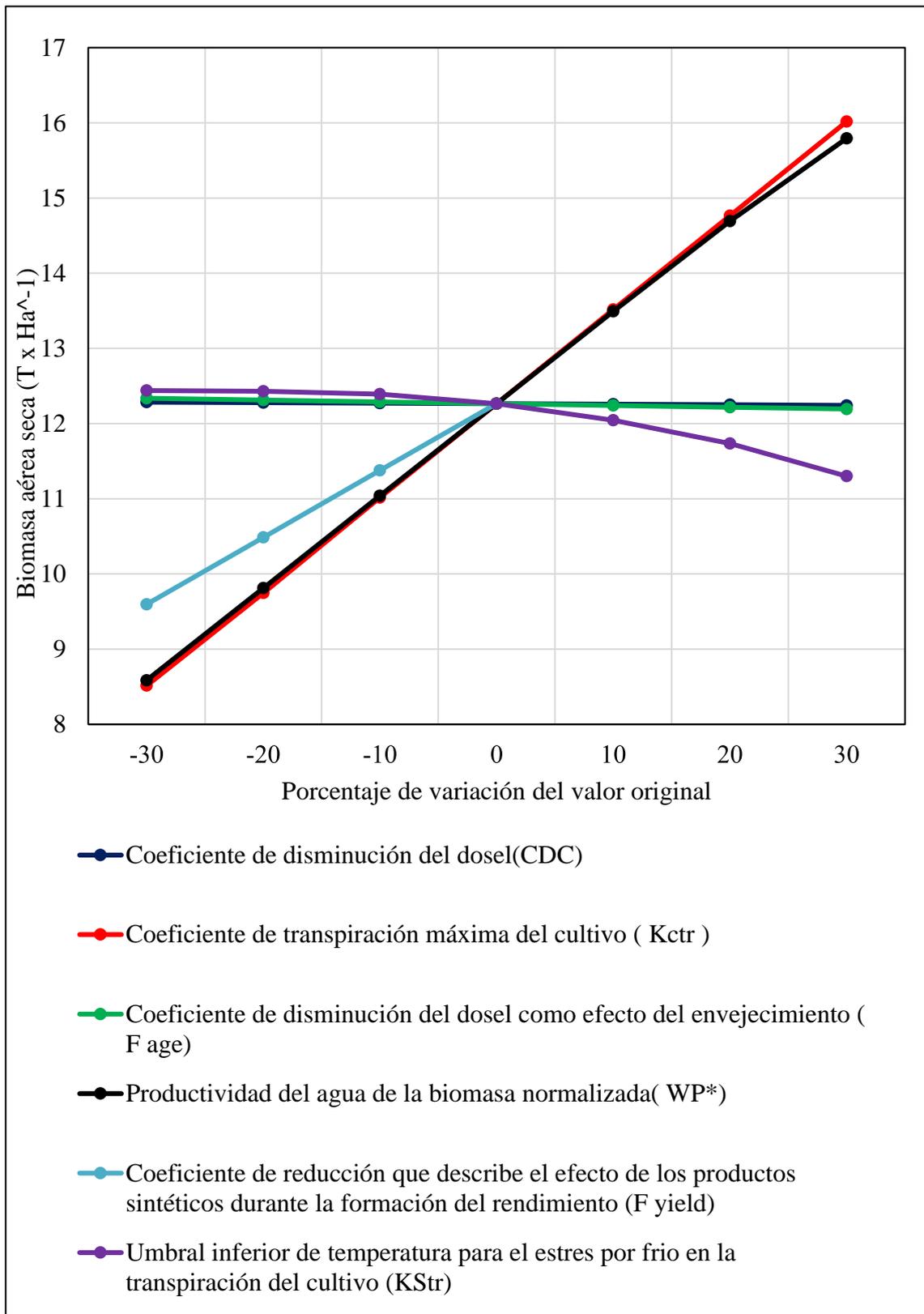


Figura 48: Análisis de sensibilidad para el modelo correspondiente al tratamiento de riego equivalente al 80% de la Evapotranspiración

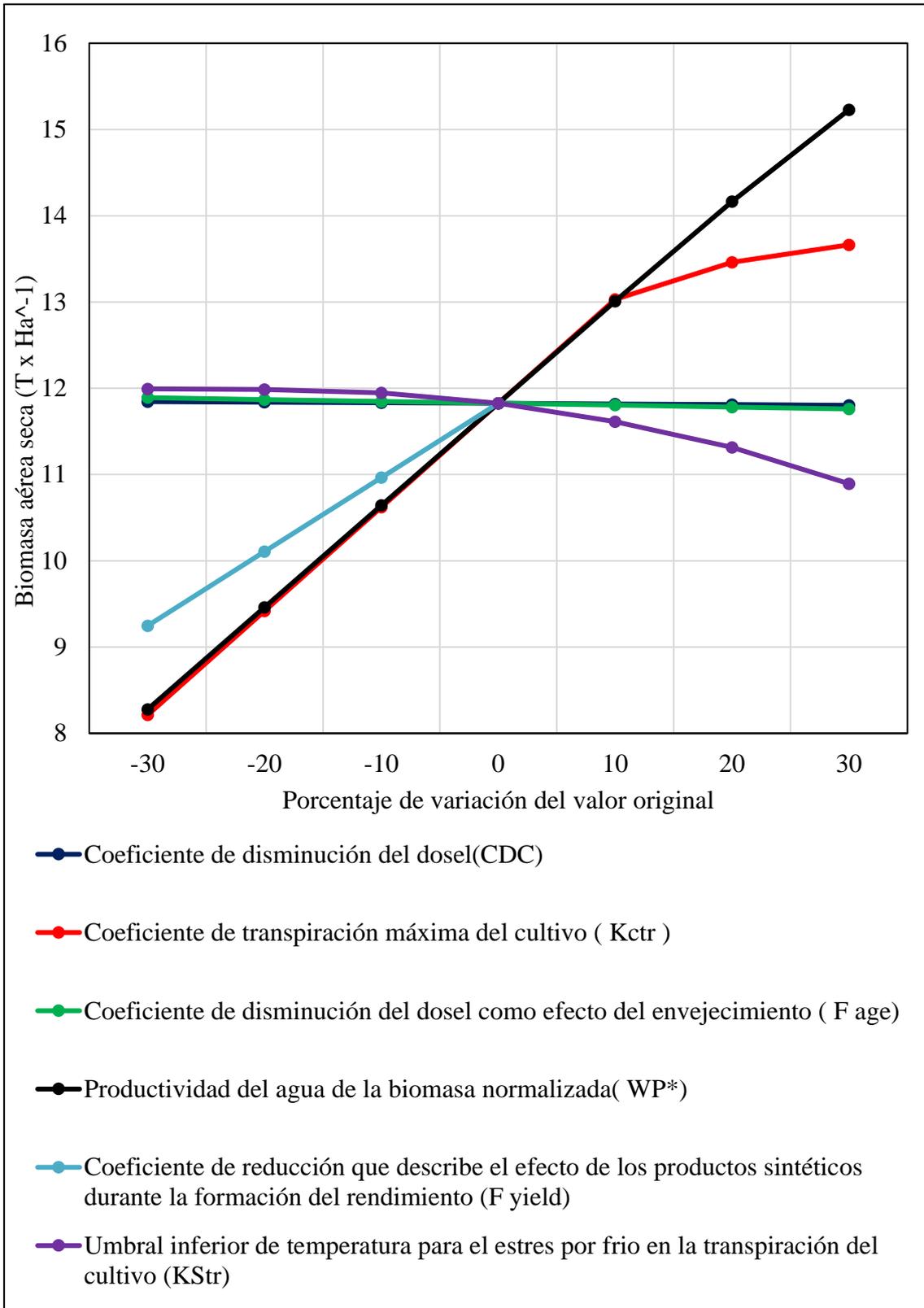


Figura 49: Análisis de sensibilidad para el modelo correspondiente al tratamiento de riego equivalente al 60% de la Evapotranspiración

Las gráficas realizadas incluyen todos los parámetros menos el índice de cosecha de referencia (Hio), ya que según el manual de AQUACROP de la FAO el modelo no utiliza este parámetro para calcular la biomasa, solo lo utiliza para ajustar el rendimiento por lo cual se ajustó su valor para calibrar el rendimiento.

4.4. Calibración del modelo AQUACROP

Para calibrar el modelo se ajustaron los parámetros que presentan una mayor sensibilidad, los valores finales de los parámetros se presentan en la tabla 25, en la cual se colocaron aquellos que tienen una mayor sensibilidad en los modelos, los parámetros de estrés quedaron por defecto al no tener efecto en los resultados para los 4 modelos.

Tabla 25: Valores finales de los principales parámetros de cada modelo en AQUACROP

Parámetros	120% Eto	100% Eto	80% Eto	60% Eto	Unidad
Máxima cobertura del dosel (Cx)	87	83	83	79	%
Cobertura del dosel al 90% de la emergencia (CCo)	0.13	0.13	0.13	0.13	%
Coefficiente de expansión del dosel (CGC)	25.2	25.1	25.1	24.9	% x día ⁻¹
Duración de la floración	42	42	42	42	días
Profundidad mínima efectiva de la raíz (Zr n)	0.1	0.1	0.1	0.1	m
Profundidad máxima efectiva de la raíz (Zr x)	0.5	0.5	0.5	0.5	m
Coefficiente de transpiración máxima (Kctr)	1.4	1.38	1.35	1.3	-
Productividad del agua de la biomasa normalizada (WP*)	19.1	18.9	19.3	20	g/m ²
Coefficiente de reducción que describe el efecto de los productos sintéticos durante la formación del rendimiento (Fyield)	2	2	2	2	%
Índice de cosecha de referencia (Hio)	49.5	41.8	41.3	39.6	%
Umbral inferior de temperatura para el estrés por frío en la transpiración del cultivo (Kstr)	5.4	5.4	5.4	5.4	°C/día

La calibración de la cobertura del dosel, biomasa aérea seca, rendimiento y contenido de humedad del suelo a una profundidad de 30 cm se hizo a través de la data muestreada que se presentó en el punto 4.1 y 4.2, la cual fue subida al modelo AQUACROP para ser comparada a la par que se ajustaban los parámetros y lograr un mejor proceso de calibración, finalmente se descargaron los resultados simulados de los modelos calibrados y se realizaron gráficas comparando los datos simulados y observados para analizarlas junto con los indicadores

estadísticos que da AQUACROP. La cobertura del dosel se muestreo en 5 fechas diferentes, la biomasa seca en 6 fechas y el contenido de humedad desde la siembra hasta la última cosecha, estas al ser plasmadas en una gráfica indicaron una tendencia similar que los resultados simulados hasta la última fecha muestreada de cada variable.

4.4.1. Modelo basado en el tratamiento de riego equivalente al 120% de la Eto

Los indicadores estadísticos y la gráfica que se obtuvo del modelo calibrado para la cobertura del dosel son: (Donde CCobs, es cobertura observada y CCsim la simulada)

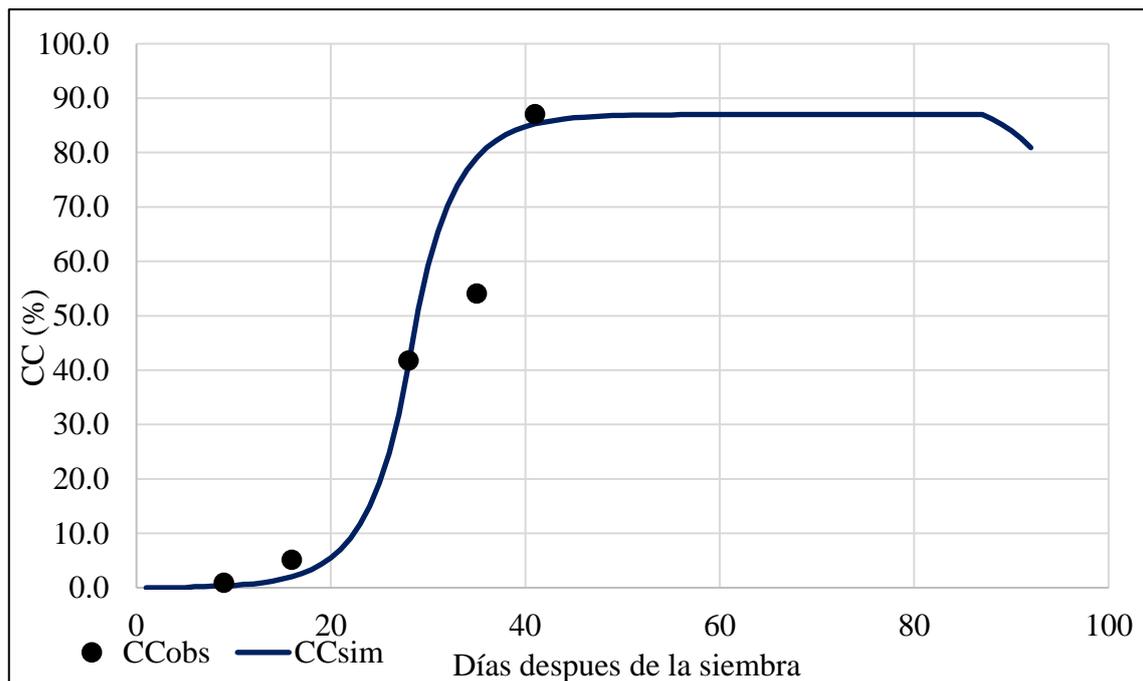


Figura 50: Comparación de la data observada y simulada de la cobertura del dosel para el tratamiento de riego equivalente al 120% de la Eto

Tabla 26: Información de la cobertura del dosel observada y simulada del tratamiento de riego equivalente al 120% de la Eto

Días después de la siembra	Cobertura del dosel simulada (%)	Cobertura del dosel observada (%)
9	0.3	0.9
16	2	5.1
28	41.1	41.7
35	79.1	54.1
41	85.3	87.1

Tabla 27: Indicadores estadísticos de la cobertura del dosel para el modelo con tratamiento de riego equivalente al 120% de la Eto

Indicador estadístico	Valor	Unidad
Coefficiente de correlación de Pearson (r)	0.96	-
Error medio cuadrático (RMSE)	11.3	% CC
Error medio cuadrático normalizado CV(RMSE)	29.9	%
Coefficiente de eficiencia del modelo NASH (EF)	0.88	-
Índice de Willmott (d)	0.97	-

Según se muestra en la tabla 27, primero el valor del coeficiente de correlación de Pearson es de 0.96, según el manual de la FAO de AQUACROP un valor de (r) mayor a 0.90 indica un ajuste muy bueno, segundo se obtuvo un error medio cuadrático (RMSE) de 11.3% y un error medio cuadrático normalizado (CV RMSE) de 29.9 %, para los cuales se indica un ajuste moderadamente bueno, tercero el valor del coeficiente de eficiencia del modelo NASH (EF) fue 0.88, el cual indica que hubo un ajuste muy bueno y finalmente el índice de Willmott dio un valor de 0.97 el cual indica un ajuste muy bueno. Como se puede observar en general la calibración de la cobertura del dosel para el modelo de riego equivalente al 120% de la Eto fue realizada de manera correcta.

Los indicadores estadísticos y la gráfica que resulto de la calibración de la biomasa aérea seca son los siguientes: (Donde Bobs, es biomasa observada y Bsim la simulada)

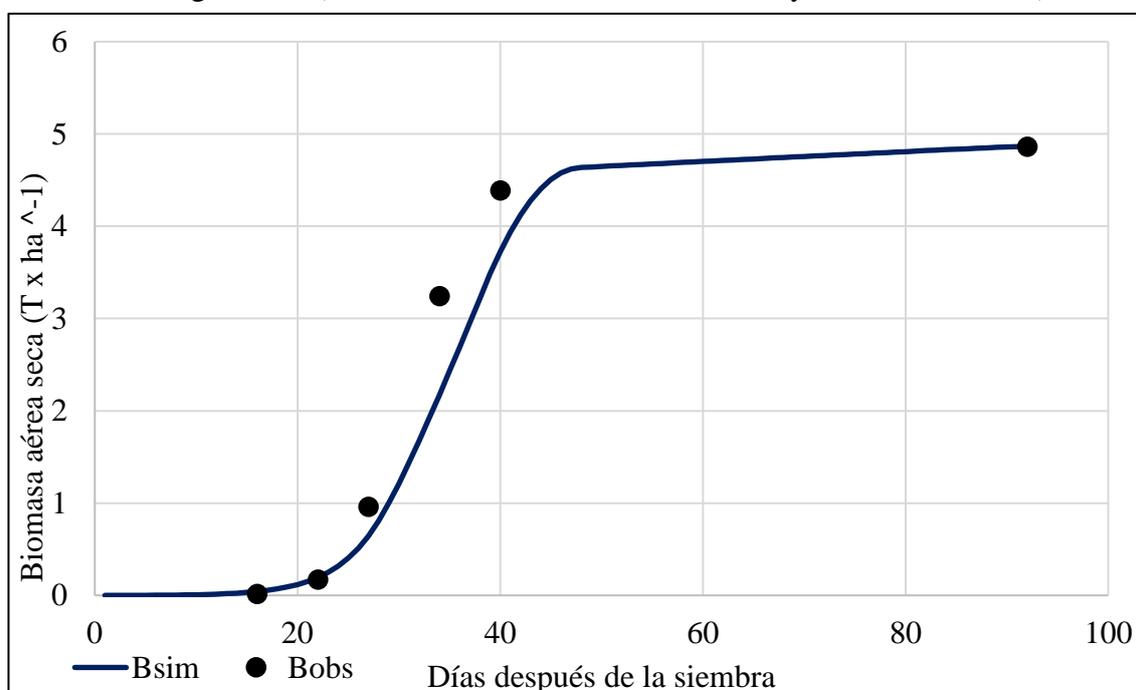


Figura 51: Comparación de la data observada y simulada de la biomasa aérea seca para el tratamiento de riego equivalente al 120% de la Eto

Tabla 28: Información de la biomasa aérea seca observada y simulada del tratamiento de riego equivalente al 120% de la Eto

Días después de la siembra	Biomasa aérea seca simulada (T x ha⁻¹)	Biomasa aérea seca observada (T x ha⁻¹)
16	0.042	0.017
22	0.195	0.171
27	0.644	0.960
34	2.173	3.242
40	3.724	4.390
92	4.869	4.862

Tabla 29: Indicadores estadísticos de la biomasa aérea seca para el modelo con tratamiento de riego equivalente al 120% de la Eto

Indicador estadístico	Valor	Unidad
Coefficiente de correlación de Pearson (r)	0.98	-
Error medio cuadrático (RMSE)	0.5	T x ha ⁻¹
Error medio cuadrático normalizado CV(RMSE)	23.3	%
Coefficiente de eficiencia del modelo Nash (EF)	0.93	-
Índice de Willmott (d)	0.98	-

El primer indicador estadístico es el coeficiente de correlación de Pearson (r), el cual tiene un valor de 0.98 que indica un ajuste muy bueno, segundo se tiene como indicadores al error medio cuadrático (RMSE) y error medio cuadrático normalizado (CVRMSE) los cuales tienen un valor de 0.5 T x ha⁻¹ y 23.3% respectivamente, que indican un ajuste moderadamente bueno según los rangos mencionados en el manual de la FAO para AQUACROP, el tercer y cuarto indicador son el coeficiente de eficiencia del modelo Nash (EF) y el índice de Willmott (d) que tienen un valor de 0.93 y 0.98 respectivamente lo que representa, al igual que la mayoría de indicadores, una calibración muy buena del modelo para la biomasa aérea seca.

Como resultado de la calibración del contenido de humedad a una profundidad de 30cm, se obtuvo la siguiente gráfica e indicadores estadísticos: (Donde SWobs, es el contenido de humedad observado y SWsim el simulada)

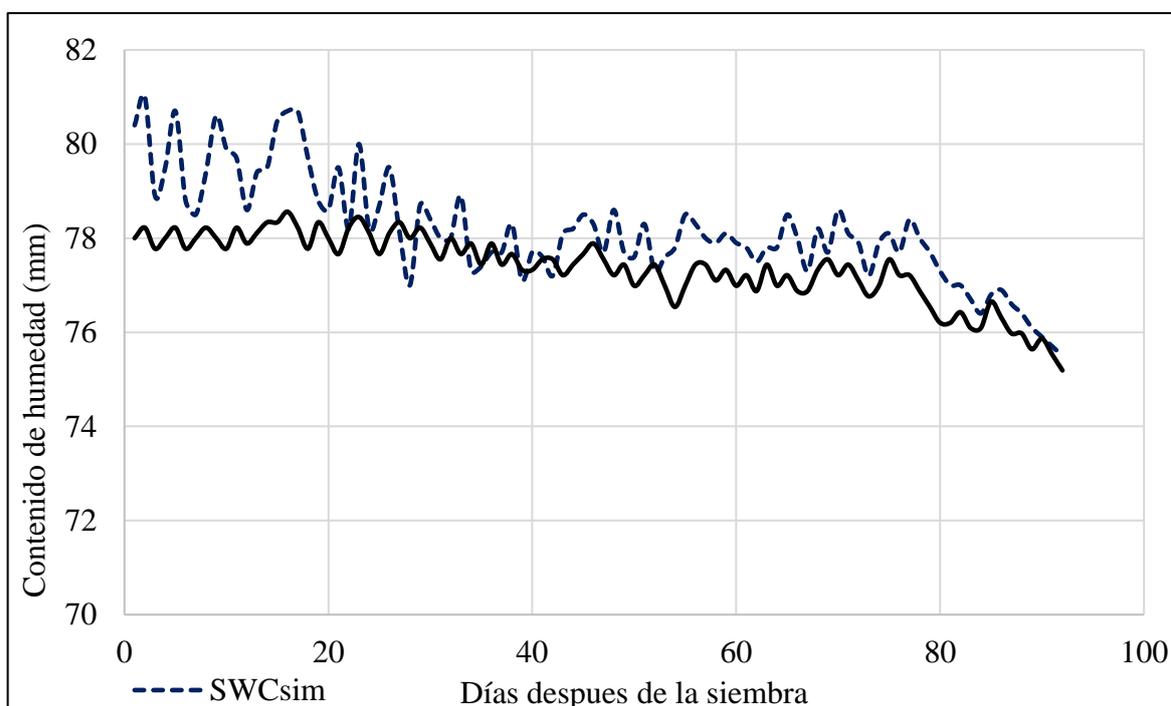


Figura 52: Comparación de la información observada y simulada del contenido de humedad a una profundidad de 30cm

Tabla 30: Indicadores estadísticos del contenido de humedad para el modelo con tratamiento de riego equivalente al 120% de la Eto

Indicador estadístico	Valor	Unidad
Coefficiente de correlación de Pearson (r)	0.80	-
Error medio cuadrático (RMSE)	1.1	mm
Error medio cuadrático normalizado CV(RMSE)	1.4	%
Coefficiente de eficiencia del modelo NASH (EF)	-1.25	-
Índice de Willmott (d)	0.71	-

Como indica la tabla 30, el primer indicador estadístico para el contenido de humedad a una profundidad de 30 cm es el coeficiente de correlación de Pearson (r) cuyo valor es de 0.80, el cual indica un ajuste moderadamente bueno del modelo, segundo se tiene a los coeficientes error medio cuadrático y error medio cuadrático normalizado (CVRMSE) que tienen valores de 1.1 mm y 1.4 % respectivamente, que indican un ajuste muy bueno, tercero se tiene el coeficiente de eficiencia del modelo Nash (EF) cuyo valor es de -1.25 el cual indica un ajuste malo del modelo, se intentó variar los diversos parámetros para mejorar este indicador, pero como máximo se pudo lograr el valor indicado, finalmente se tiene el índice

de Willmott (d) que tiene un valor de 0.71 el cual indica un ajuste moderadamente bueno. Como se pudo observar, en general se logró un correcto ajuste del modelo.

4.4.2. Modelo basado en el tratamiento de riego equivalente al 100% de la Eto

Los indicadores estadísticos y la gráfica que se obtuvo del modelo calibrado para la cobertura del dosel son: (Donde CCobs, es cobertura observada y CCsim la simulada)

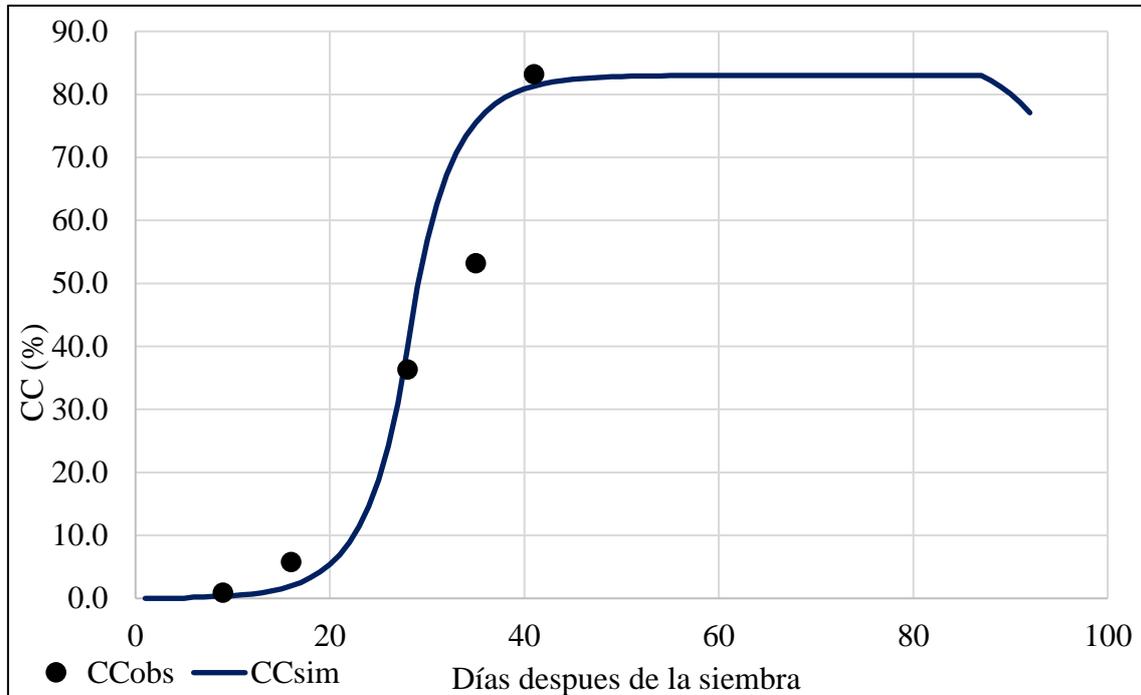


Figura 53: Gráfica de comparación de la data observada y simulada de la cobertura del dosel para el tratamiento de riego equivalente al 100% de la Eto

Tabla 31: Información de la cobertura del dosel observada y simulada del tratamiento de riego equivalente al 100% de la Eto

Días después de la siembra	Cobertura del dosel simulada (%)	Cobertura del dosel observada (%)
9	0.3	0.9
16	2.0	5.8
28	39.9	36.3
35	75.5	53.2
41	81.3	83.2

Tabla 32: Indicadores estadísticos de la cobertura del dosel para el modelo con tratamiento de riego equivalente al 100% de la Eto

Indicador estadístico	Valor	Unidad
Coefficiente de correlación de Pearson (r)	0.97	-
Error medio cuadrático (RMSE)	10.3	%
Error medio cuadrático normalizado CV(RMSE)	28.7	%
Coefficiente de eficiencia del modelo Nash (EF)	0.89	-
Índice de Willmott (d)	0.97	-

Según la tabla 32 de indicadores estadísticos, el primero es el coeficiente de correlación de Pearson (r) dio un valor de 0.97 el cual indica un ajuste muy bueno tal como dice la información brindada por el manual de la FAO de AQUACROP, segundo tenemos al error medio cuadrático (RMSE) y error medio cuadrático normalizado (CV RMSE) los cuales tienen un valor de 10.3% y 28.7 % respectivamente los cuales indican un ajuste moderado, el cuarto indicador estadístico es el coeficiente de eficiencia del modelo Nash (EF) el cual tiene un valor de 0.89 que indica un ajuste muy bueno, finalmente se tiene el índice de Willmott (d) el cual tiene un valor de 0.97 que indica un ajuste muy bueno. Como se puede observar, en general para el modelo de riego equivalente al 100% de la Eto, se realizó la calibración de la cobertura del dosel de forma correcta.

Como parte de la calibración del modelo para la biomasa seca aérea se obtuvo la siguiente gráfica de comparación entre la biomasa simulada (Bsim) y biomasa observada (Bobs) y los indicadores estadísticos:

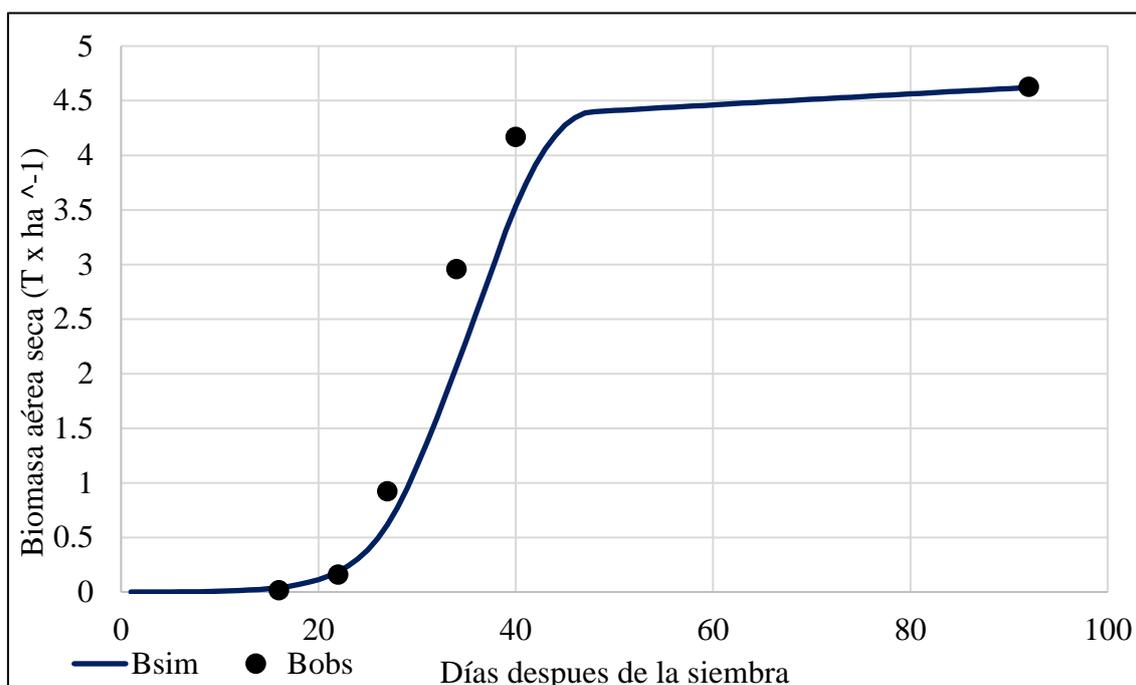


Figura 54: Gráfica de comparación de la data observada y simulada de la biomasa aérea seca para el tratamiento de riego equivalente al 100% de la Eto

Tabla 33: Información de la biomasa aérea seca observada y simulada del tratamiento de riego equivalente al 100% de la Eto

Días después de la siembra	Biomasa aérea seca simulada (T x ha⁻¹)	Biomasa aérea seca observada (T x ha⁻¹)
16	0.040	0.016
22	0.187	0.158
27	0.615	0.924
34	2.065	2.957
40	3.535	4.169
92	4.619	4.627

Tabla 34: Indicadores estadísticos de la biomasa aérea seca para el modelo con tratamiento de riego equivalente al 100% de la Eto

Indicador estadístico	Valor	Unidad
Coeficiente de correlación de Pearson (r)	0.98	-
Error medio cuadrático (RMSE)	0.5	T x ha ⁻¹
Error medio cuadrático normalizado CV(RMSE)	21.7	%
Coeficiente de eficiencia del modelo Nash (EF)	0.94	-
Índice de Willmott (d)	0.98	-

Como se muestra en la tabla 34, el primer indicador estadístico de la calibración de la biomasa aérea seca para el tratamiento de riego del 100% de la Eto, es el coeficiente de correlación de Pearson (r) que tiene un valor de 0.98 el cual indica un ajuste muy bueno del modelo, segundo se tienen los indicadores error medio cuadrático (RMSE) y error medio cuadrático normalizado (CVRMSE) cuyos valores son 0.5 T x ha⁻¹ y 21.7 % respectivamente que indican un ajuste moderadamente bueno del modelo, tercero se tiene el coeficiente de eficiencia del modelo Nash (EF) que tiene un valor de 0.94 que indica un ajuste muy bueno del modelo, finalmente se tiene el índice de Willmott (d) que tiene un valor de 0.98 que indica un ajuste muy bueno, como se puede observar en general, según el manual de la FAO para AQUACROP se tiene un ajuste bueno del modelo según los indicadores estadísticos.

Como resultado de la calibración del modelo para el contenido de humedad a una profundidad de 30cm, se obtuvo la siguiente gráfica comparando el contenido de humedad simulado (SWsim) y observado (SWobs) y los indicadores estadísticos:

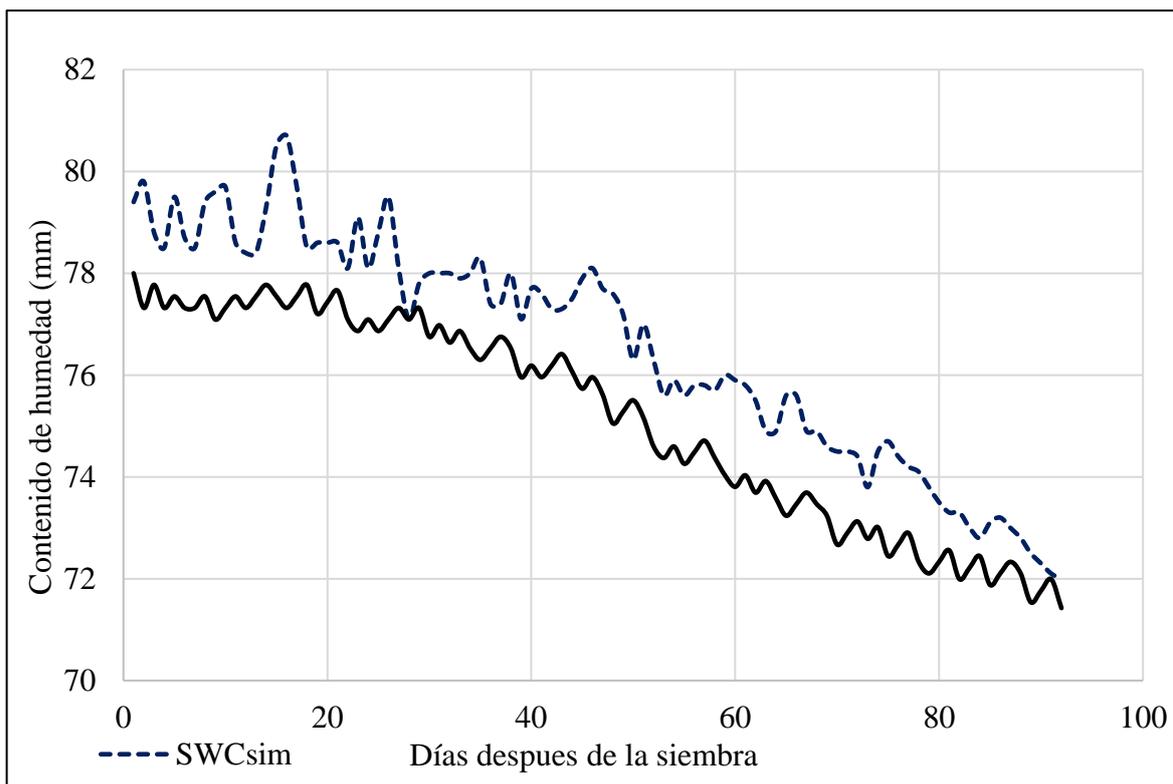


Figura 55: Comparación de la data observada y simulada del contenido de humedad a una profundidad de 30cm

Tabla 35: Indicadores estadísticos del contenido de humedad para el modelo con tratamiento de riego equivalente al 100% de la Eto

Indicador estadístico	Valor	Unidad
Coefficiente de correlación de Pearson (r)	0.96	-
Error medio cuadrático (RMSE)	1.6	mm
Error medio cuadrático normalizado CV(RMSE)	2.1	%
Coefficiente de eficiencia del modelo NASH (EF)	0.43	-
Índice de Willmott (d)	0.88	-

Como indica la tabla 35, el primer indicador estadístico es el coeficiente de correlación de Pearson (r) que tiene un valor de 0.96 lo cual indica un ajuste muy bueno del modelo, los siguientes indicadores son el error medio cuadrático (RMSE) y el error medio cuadrático normalizado (CVRMSE) que tienen valores de 1.6 mm y 2.1 % respectivamente lo cual indica un ajuste muy bueno del modelo según la clasificación del manual de la FAO para AQUACROP, tercero se tiene el coeficiente de eficiencia del modelo Nash (EF) cuyo valor es de 0.43 el cual indica un ajuste moderadamente bueno del modelo, finalmente se tiene el índice de Willmott (d) que tiene un valor de 0.88 que indica un ajuste moderadamente bueno.

Se logró mejorar el índice de Nash hasta el valor indicado, logrando así, en general, un buen ajuste de la calibración del modelo.

4.4.3. Modelo basado en el tratamiento de riego equivalente al 80% de la Eto

La gráfica y los indicadores estadísticos de la calibración de la cobertura del dosel para el modelo con tratamiento de riego equivalente al 80% de la Eto son los siguientes: (Donde CCobs, es cobertura observada y CCsim la simulada)

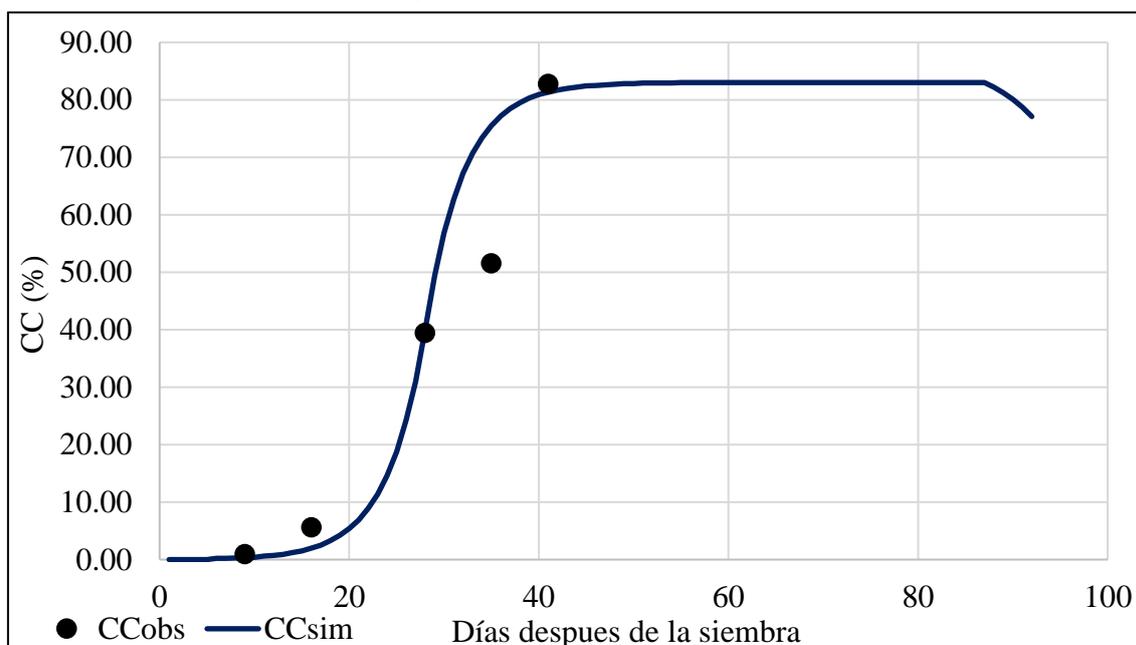


Figura 56: Comparación de la data observada y simulada de la cobertura del dosel para el tratamiento de riego equivalente al 80% de la Eto

Tabla 36: Información de cobertura del dosel observada y simulada del tratamiento de riego equivalente al 80% de la Eto

Días después de la siembra	Cobertura del dosel simulada (%)	Cobertura del dosel observada (%)
9	0.3	1.0
16	2.0	5.6
28	39.9	39.4
35	75.5	51.5
41	81.3	82.7

Tabla 37: Indicadores estadísticos de la cobertura del dosel para el modelo con tratamiento de riego equivalente al 80% de la Eto

Indicador estadístico	Valor	Unidad
Coefficiente de correlación de Pearson (r)	0.96	-
Error medio cuadrático (RMSE)	10.9	%
Error medio cuadrático normalizado CV(RMSE)	30.2	%
Coefficiente de eficiencia del modelo Nash (EF)	0.87	-
Índice de Willmott (d)	0.97	-

Tal como indica la tabla 37, el primer indicador estadístico para el modelo de riego equivalente al 60% de la Eto es el coeficiente de correlación de Pearson (r) el cual tiene un valor de 0.96 que indica un ajuste muy bueno del modelo según el manual de la FAO de AQUACROP, segundo se tienen los indicadores error medio cuadrático (RMSE) y error medio cuadrático normalizado (CVRMSE) los cuales tienen valores de 10.9 % y 30.2 % respectivamente que indican un ajuste moderado del modelo, tercero se tiene el coeficiente de eficiencia del modelo Nash (EF) que tiene un valor de 0.87 que indica un ajuste muy bueno del modelo, finalmente se tiene el índice de Willmott (d) que tiene un valor de 0.97 que indica un ajuste muy bueno del modelo. Como se puede observar en general se logró una calibración correcta del modelo según los indicadores estadísticos.

Los indicadores estadísticos y la gráfica de comparación entre biomasa simulada (Bsim) y biomasa observada (Bobs) que se obtuvieron como resultado de la calibración de la biomasa aérea seca son:

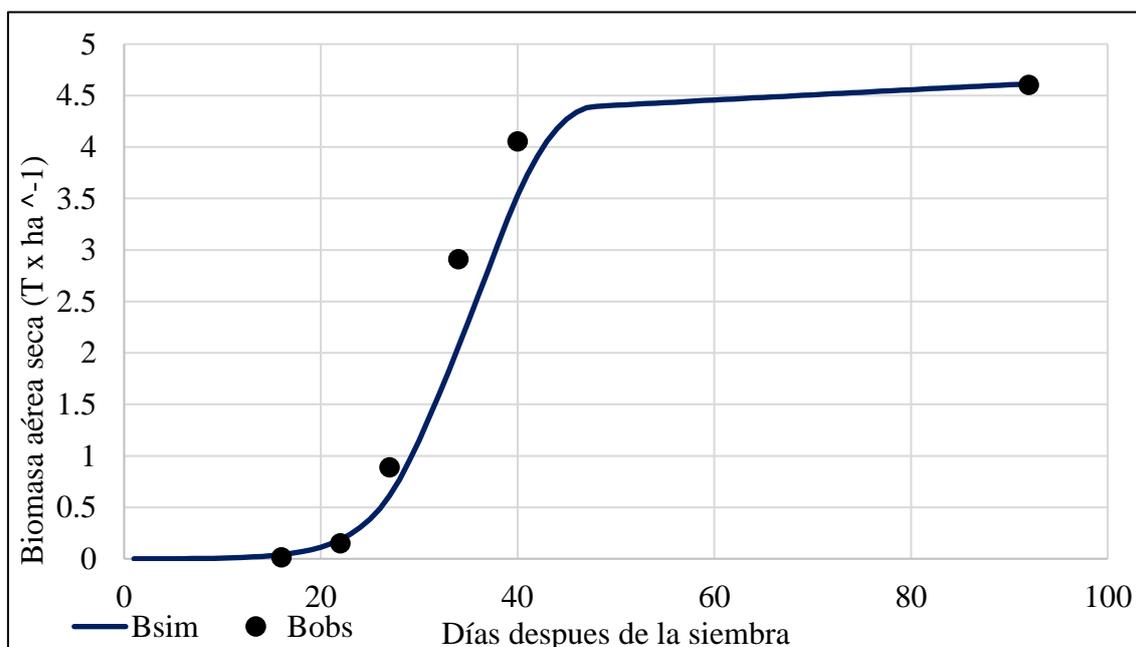


Figura 57: Comparación de la data observada y simulada de la biomasa aérea seca para el tratamiento de riego equivalente al 80% de la Eto

Tabla 38: Información de biomasa aérea seca observada y simulada del tratamiento de riego equivalente al 80% de la Eto

Días después de la siembra	Biomasa aérea seca simulada (T x ha⁻¹)	Biomasa aérea seca observada (T x ha⁻¹)
16	0.040	0.014
22	0.186	0.149
27	0.615	0.887
34	2.063	2.909
40	3.531	4.054
92	4.614	4.602

Tabla 39: Indicadores estadísticos de la biomasa aérea seca para el modelo con tratamiento de riego equivalente al 80% de la Eto

Indicador estadístico	Valor	Unidad
Coeficiente de correlación de Pearson (r)	0.98	-
Error medio cuadrático (RMSE)	0.4	T x ha ⁻¹
Error medio cuadrático normalizado CV(RMSE)	20.0	%
Coeficiente de eficiencia del modelo NASH (EF)	0.95	-
Índice de Willmott (d)	0.99	-

El primer indicador estadísticos que se puede observar en la tabla 39 es el coeficiente de correlación de Pearson (r) cuyo valor es de 0.98 que indica un ajuste muy bueno de la calibración de la biomasa aérea seca, como segundo indicador se tiene al error medio cuadrático (RMSE) y el error medio cuadrático normalizado (CVRMSE) que tienen valores de 0.4 T x ha⁻¹ y 20.0 % respectivamente que indican un ajuste moderadamente bueno del modelo, tercero se tiene el coeficiente de eficiencia del modelo Nash (EF) cuyo valor es de 0.95 y el último es el índice de Willmott (d) que tiene un valor de 0.99, estos últimos indican un ajuste muy bueno del modelo según el manual de referencia de la FAO para el uso de AQUACROP, como se puede observar en general se realizó una buena calibración de la biomasa para el modelo de riego equivalente al 80% de la Eto.

Como resultado de la calibración del contenido de humedad a una profundidad de 30 cm se obtuvo 5 indicadores estadísticos y la siguiente gráfica de comparación del contenido de humedad observado (SWobs) y simulado (SWsim):

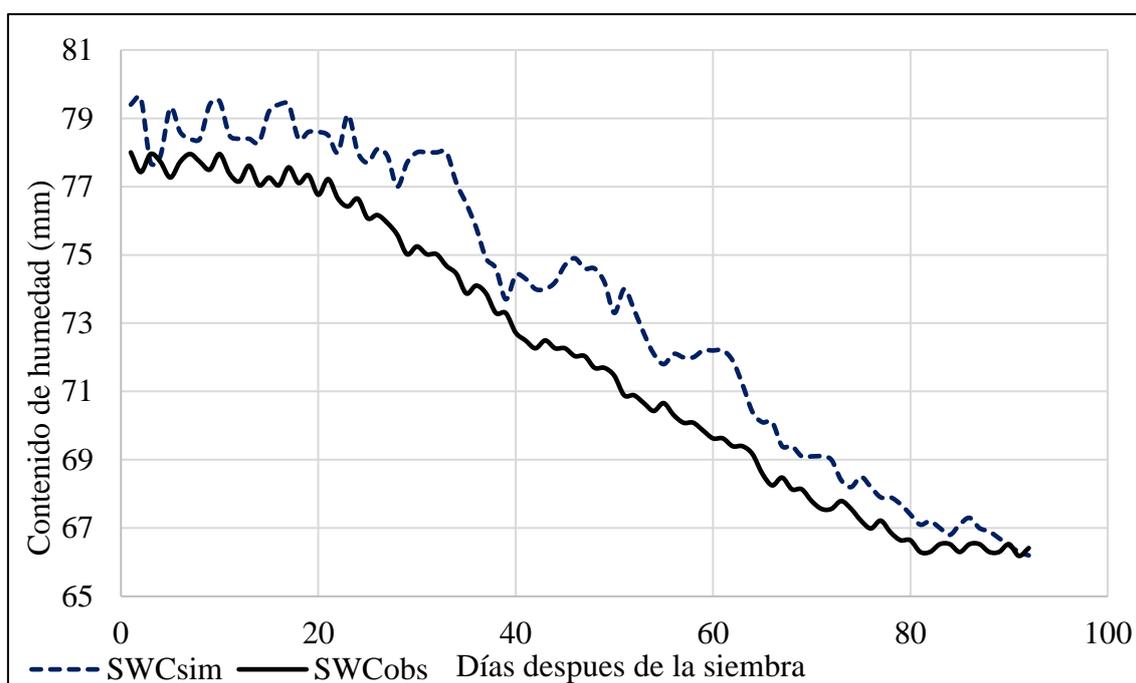


Figura 58: Comparación de la data observada y simulada del contenido de humedad a una profundidad de 30cm

Tabla 40: Indicadores estadísticos del contenido de humedad para el modelo con tratamiento de riego equivalente al 80% de la Eto

Indicador estadístico	Valor	Unidad
Coefficiente de correlación de Pearson (r)	0.98	-
Error medio cuadrático (RMSE)	1.7	mm
Error medio cuadrático normalizado CV(RMSE)	2.4	%
Coefficiente de eficiencia del modelo NASH (EF)	0.82	-
Índice de Willmott (d)	0.96	-

El primer indicador mostrado en la tabla 40 es el coeficiente de correlación de Pearson (r) que tiene un valor de 0.98 el cual indica un ajuste muy bueno del modelo, los siguientes indicadores son el error medio cuadrático (RMSE) y el error medio normalizado (CVRMSE) cuyos valores son 1.7 mm y 2.4 % respectivamente, que indican un ajuste muy bueno del modelo, como tercer indicador se tiene el índice de eficiencia de Nash (EF) cuyo valor es de 0.82 el cual indica un ajuste bueno del modelo, finalmente se tiene el índice de Willmott (d) que tiene un valor de 0.96 el cual indica un ajuste muy bueno del modelo. Como se observa en general la calibración para el contenido de humedad a una profundidad de 30cm del modelo con riego equivalente al 80% de la Eto tuvo un ajuste muy bueno.

4.4.4. Modelo basado en el tratamiento de riego equivalente al 60% de la Eto

Para la cobertura del dosel del modelo con tratamiento de riego equivalente al 60% de la Eto se obtuvo la siguiente gráfica e indicadores estadísticos: (Donde CCobs, es cobertura observada y CCsim la simulada)

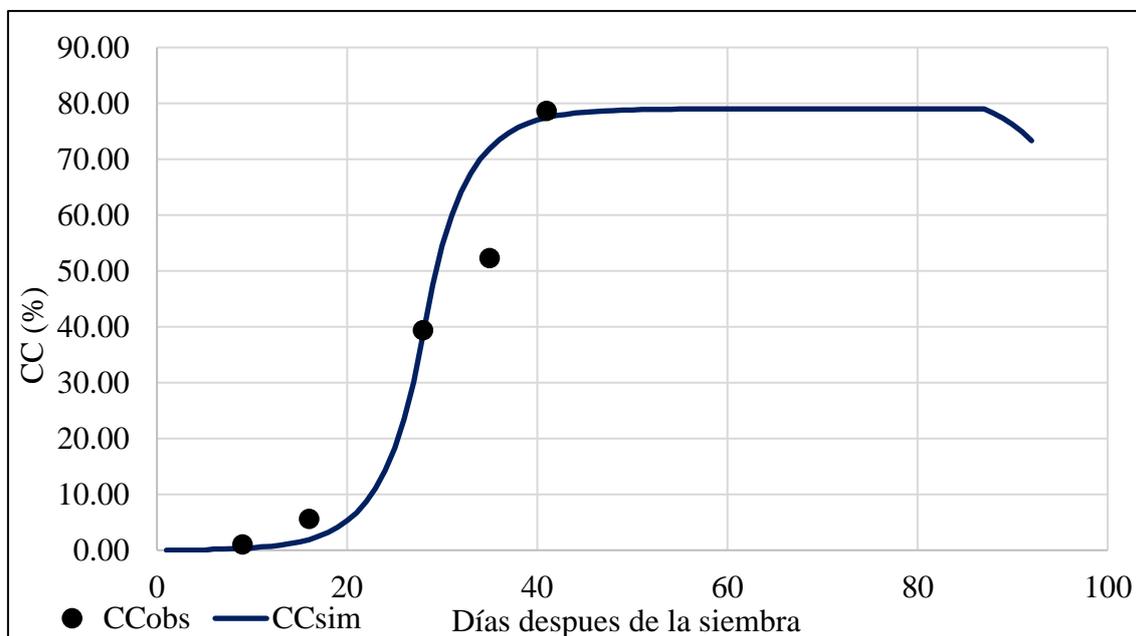


Figura 59: Comparación de la data observada y simulada de la cobertura del dosel para el tratamiento de riego equivalente al 60% de la Eto

Tabla 41: Información de cobertura del dosel observada y simulada del tratamiento de riego equivalente al 60% de la Eto

Días después de la siembra	Cobertura del dosel simulada (%)	Cobertura del dosel observada (%)
9	0.3	1.00
16	1.9	5.6
28	38.6	39.4
35	71.9	52.3
41	77.4	78.6

Tabla 42: Indicadores estadísticos de la cobertura del dosel para el modelo con tratamiento de riego equivalente al 60% de la Eto

Indicador estadístico	Valor	Unidad
Coefficiente de correlación de Pearson (r)	0.97	-
Error medio cuadrático (RMSE)	8.9	%
Error medio cuadrático normalizado CV(RMSE)	25.3	%
Coefficiente de eficiencia del modelo Nash (EF)	0.91	-
Índice de Willmott (d)	0.98	-

Como se muestra en la tabla 42, el primer indicador estadístico de la calibración de la cobertura del dosel es el coeficiente de correlación de Pearson (r) el cual tiene un valor de 0.97, lo cual según el manual de la FAO para AQUACROP indica un ajuste muy bueno del modelo, los siguientes indicadores estadísticos son el error medio cuadrático (RMSE) y el error medio cuadrático normalizado (CVRMSE) los cuales tienen un valor de 8.9 % y 25.3 % respectivamente, que indican un ajuste moderado del modelo, tercero se tiene el coeficiente de eficiencia del modelo Nash (EF) que tiene un valor de 0.91 que indica un ajuste muy bueno, finalmente se tiene el índice de Willmott (d) el cual tiene un valor de 0.98 indicando un ajuste muy bueno para el modelo. En general según los indicadores estadísticos se realizó una buena calibración del modelo para la cobertura del dosel.

Como resultado de la calibración de la biomasa aérea seca se obtuvo los siguientes 5 indicadores estadísticos y la gráfica de comparación entre la biomasa observada (Bobs) y la simulada (Bsim):

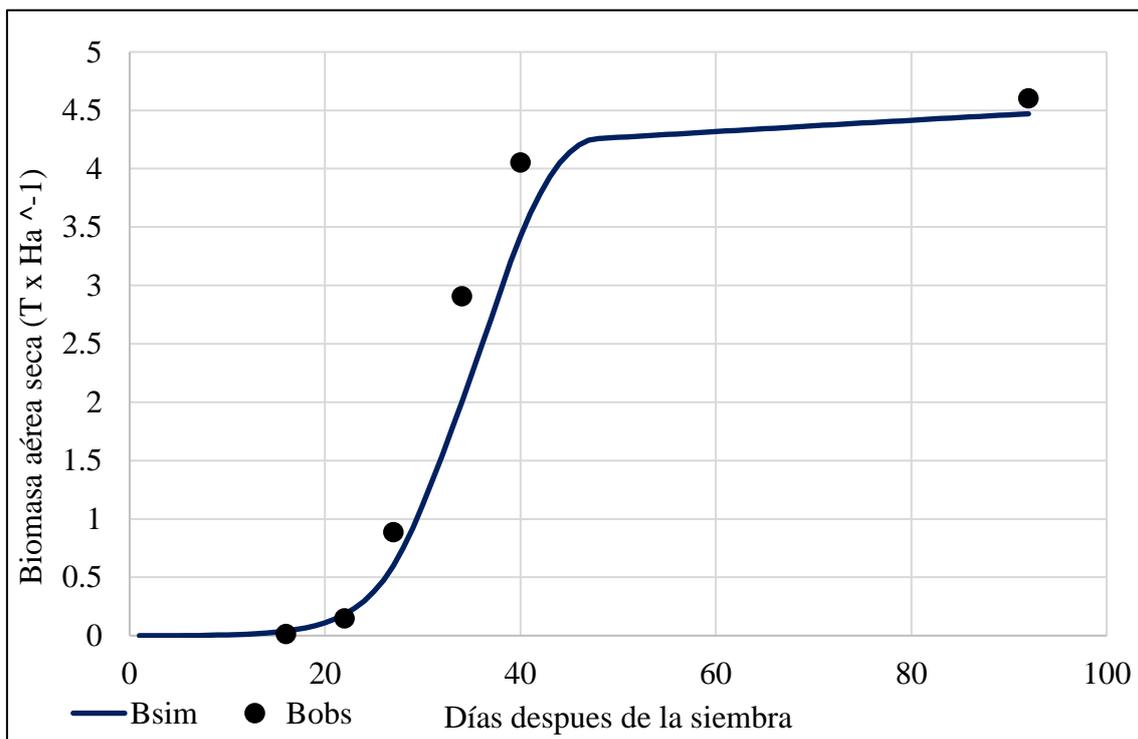


Figura 60: Comparación de la data observada y simulada de la biomasa aérea seca para el tratamiento de riego equivalente al 60% de la Eto

Tabla 43: Información de la biomasa aérea seca observada y simulada del tratamiento de riego equivalente al 60% de la Eto

Días después de la siembra	Biomasa aérea seca simulada (T x ha⁻¹)	Biomasa aérea seca observada (T x ha⁻¹)
16	0.040	0.014
22	0.183	0.147
27	0.600	0.843
34	2.002	2.868
40	3.422	3.995
92	4.470	4.466

Tabla 44: Indicadores estadísticos de la biomasa aérea seca para el modelo con tratamiento de riego equivalente al 60% de la Eto

Indicador estadístico	Valor	Unidad
Coeficiente de correlación de Pearson (r)	0.98	-
Error medio cuadrático (RMSE)	0.4	T x ha ⁻¹
Error medio cuadrático normalizado CV(RMSE)	21.2	%
Coeficiente de eficiencia del modelo NASH (EF)	0.94	-
Índice de Willmott (d)	0.98	-

Como indica la tabla 44, el primer indicador estadístico es el coeficiente de correlación de Pearson (r) el cual tiene un valor de 0.98 que indica un ajuste muy bueno del modelo, segundo se tiene al error medio cuadrático (RMSE) y el error medio cuadrático normalizado (CVRMSE) cuyos valores son 0.4 T x ha⁻¹ y 21.2 % que indican un ajuste moderadamente bueno del modelo, el tercer indicador es el coeficiente de eficiencia del modelo Nash (EF) el cual tiene un valor de 0.94 que indica un ajuste muy bueno del modelo, finalmente se tiene el índice de Willmott (d) el cual tiene un valor de 0.98 que indica un ajuste muy bueno según el manual de referencia de la FAO para AQUACROP, como se puede observar en general se logró un ajuste muy bueno del modelo.

La calibración del contenido de humedad a una profundidad de 30 cm se obtuvo los siguientes 5 indicadores estadísticos y la gráfica de comparación entre humedad observada (SWobs) y simulada (SWsim):

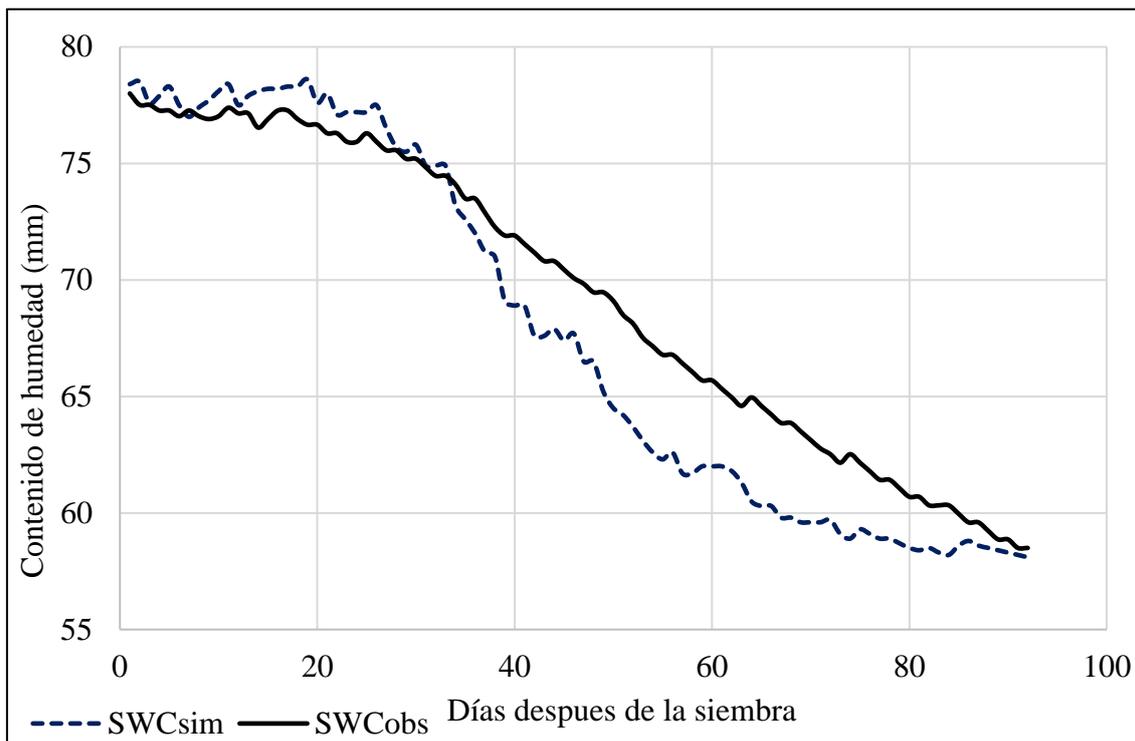


Figura 61: Comparación de la data observada y simulada del contenido de humedad a una profundidad de 30cm

Tabla 45: Indicadores estadísticos del contenido de humedad para el modelo con tratamiento de riego equivalente al 60% de la Eto

Indicador estadístico	Valor	Unidad
Coefficiente de correlación de Pearson (r)	0.98	-
Error medio cuadrático (RMSE)	2.6	mm
Error medio cuadrático normalizado CV(RMSE)	3.7	%
Coefficiente de eficiencia del modelo NASH (EF)	0.84	-
Índice de Willmott (d)	0.97	-

El primer indicador estadístico es el coeficiente de correlación de Pearson (r) el cual tiene un valor de 0.98 que indica un ajuste muy bueno delo modelo, los segundos indicadores son el error medio cuadrático (RMSE) y el error medio cuadrático normalizado (CVRMSE) los cuales tienen un valor de 2.6 mm y 3.7 % respectivamente que indican un ajuste muy bueno del modelo, el tercer indicador es el coeficiente de eficiencia del modelo Nash que tiene un valor de 0.84 , lo cual indica un ajuste muy bueno del modelo, el último indicador es el índice de Willmott (d) el cual tiene un valor de 0.97, que según la clasificación del manual de referencia de la FAO de AQUACROP indica un ajuste muy bueno, en general todos los valores estadísticos indican una buena calibración del contenido de humedad a una profundidad de 30 cm.

4.4.5. Calibración del rendimiento del Zapallito italiano

El rendimiento del Zapallito italiano fue calibrado al final, ya que como indica el manual de referencia de la FAO para AQUACROP el rendimiento, para un modelo sin efecto de estrés hídrico, solo depende del índice de cosecha de referencia (Hio) y la biomasa aérea seca (B), al estar la biomasa ya calibrada solo depende de Hio, por lo que se varió este parámetro hasta lograr ajustar el rendimiento, en la tabla 46 se muestra el rendimiento observado y simulado por tratamiento.

Tabla 46: Rendimiento (T x ha⁻¹) observado y simulado por tratamiento de riego

Rendimiento	120% Eto	100% Eto	80% Eto	60% Eto
Observado	24.112	19.301	19.043	17.692
Simulado	24.102	19.308	19.056	17.700

4.4.6. Eficiencia del uso del agua

Como resultado de la simulación y calibración del modelo AQUACROP para cuatro tratamientos de riego, se obtuvo la evaporación, transpiración y rendimiento simulado los cuales a través de la formula (5) permitieron calcular la eficiencia en el uso del agua, la cual fue comparada también con la eficiencia del uso del agua aplicada que se muestran en la tabla 47.

Tabla 47: Eficiencia del uso del agua por tratamiento de riego simulado en AQUACROP

Definición	120% de la Eto	100% de la Eto	80% de la Eto	60% de la Eto
Evaporación simulada(E)	23.4	24.8	24.7	24.4
Transpiración simulada(T)	85.4	81.7	79.9	74.5
Evapotranspiración simulada (Eto) (mm)	108.8	106.5	104.6	98.9
Volumen aplicado (mm)	145.0	120.8	96.7	72.5
Rendimiento simulado (T x ha ⁻¹)	24.102	19.308	19.056	17.700
Rendimiento obtenido (T x ha ⁻¹)	24.112	19.301	19.043	17.692
Eficiencia del uso del agua simulada (kg x m⁻³)	22.153	18.130	18.218	17.897
Eficiencia del uso del agua aplicada (kg x m⁻³)	16.630	15.975	19.701	24.405

La eficiencia de uso del agua aplicada mide el rendimiento obtenido (kg) por (m³) de agua irrigada o aplicada, mientras que la eficiencia del uso del agua simulado (WPET) mide el rendimiento simulado (Kg) por (m³) de agua evapotranspirada, por lo que se considera que una vez validado el modelo, el “WPET” o eficiencia del uso del agua sería más representativo por considerar solamente lo evaporado del suelo y transpirado del cultivo.

V. CONCLUSIONES

1. Se simuló con éxito el rendimiento y biomasa del cultivo Zapallito Italiano (Cucurbita pepo) para cuatro láminas de riego mediante el programa AQUACROP para condiciones de clima y suelo de la Universidad Nacional Agraria La Molina.
2. El análisis de sensibilidad y calibración permitieron conocer los parámetros que generan un mayor efecto en los resultados de biomasa aérea seca, cobertura del dosel, rendimiento y contenido de humedad del modelo AQUACROP, estos son: coeficiente de transpiración máxima (K_{Ctr}), productividad del agua de biomasa normalizada (WP^*), índice de cosecha de referencia (H_{io}), máxima cobertura del dosel (C_x) y umbral inferior de temperatura para el estrés por frío en la transpiración del cultivo (K_{str}).
3. El diseño experimental con tratamientos de riego equivalentes al 120%, 100%, 80% y 60% de la evapotranspiración, permitió identificar que el rendimiento, biomasa aérea seca y cobertura del dosel fue mayor en el tratamiento del 120% de la evapotranspiración, mientras que se encontró crecimientos y rendimientos similares en los tratamientos de riego equivalentes del 100% y 80% de la evapotranspiración, siendo el de menor producción y crecimiento el de equivalencia de riego del 60 % de la evapotranspiración.
4. El diseño experimental con tratamiento de riego equivalente al 120% de la evapotranspiración (E_{to}) tiene una eficiencia en el uso de agua mayor a comparación de los otros diseños experimentales, además el diseño experimental con tratamiento de riego equivalente al 80% de la evapotranspiración tuvo una mayor eficiencia en el uso de agua que el diseño experimental con tratamiento de riego equivalente al 100% de la E_{to} , ya que uso una menor cantidad de agua y tuvo un rendimiento similar.

VI. RECOMENDACIONES

1. Por no estar el zapallito italiano en la base de datos de cultivos de AQUACROP, se recomienda realizar otro experimento similar en otra época del año para validar los parámetros del modelo encontrados en la presente investigación.
2. Para tener un mayor control en el registro del contenido de humedad, se recomienda muestrear periódicamente mediante el método gravimétrico, para comparar los valores con lo registrado por los sensores.
3. Con el fin de evaluar mejor la respuesta del cultivo a diferentes láminas de riego, se recomienda evaluar el uso del coeficiente del cultivo (K_c).
4. Con el fin de mejorar futuras investigaciones, se recomienda usar tratamientos de riego mayores al 120% de la evapotranspiración para evaluar el punto de inflexión en el cual el rendimiento empieza a disminuir, de igual forma para evaluar la respuesta del cultivo al estrés hídrico se recomienda usar tratamientos de riego menores al 60% de la E_{to} .
5. Para tener una mayor precisión en la validación del modelo, se recomienda muestrear la biomasa aérea seca y la cobertura del dosel en fechas representativas a las etapas fenológicas del zapallito italiano.
6. El marco de plantación que se utilizó (0.4 m entre goteros y 1 metro entre líneas de riego) generó problemas en el muestreo del cultivo en la parcela, por lo que se recomienda usar un marco de plantación mayor.
7. Se recomienda monitorear constantemente la presión y caudal del sistema de riego, para verificar que esté acorde al diseño planteado.
8. Los resultados encontrados en la investigación, pueden ser utilizados como insumos para determinar los porcentajes de evaporación y transpiración de la lámina evapotranspirada, mediante la aplicación de técnicas isotópicas.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agbem Abiese, Y. K. (2015). MODELLING BIOMASS AND BULB YIELD OF ONION (*Allium cepa*) UNDER DIFFERENT IRRIGATION REGIMES USING THE AQUACROP MODEL (UNIVERSITY FOR DEVELOPMENT STUDIES; Vol. 107). <https://doi.org/10.1145/3132847.3132886>

Andrés Ruiz, I. (2012). E STUDIO P RELIMINAR PARA EL (*Cucurbita pepo*) Universidad de Almería. 11–96.

Astorquizaga, R. E. (2009). Cultivo de zapallo (*Cucurbita sp*) en el Noroeste de Chubut. 61–64.

Atocsa Gomez, R. B. (2015). APLICACIÓN DE RIEGO DEFICITARIO DE SECADO PARCIAL DE LA ZONA DE RAICES EN EL CULTIVO DE DURAZNO, MEDIANTE EL RIEGO POR GOTEIO. (Tesis de pre grado, Universidad Nacional Agraria La Molina.)

Badii, M., & Castillo, J. (2007). Disenos experimentales e investigacion cientifica (Experimental designs and scientific research). *Innovaciones de Negocios*, 4(8), 283–330. Recuperada de: http://www.web.facpya.uanl.mx/rev_in/Revistas/4.2/A5.pdf

Flores, L., & Alcalá, J. (2010). Manual de Procedimientos Analíticos Física de Suelos. Instituto de Geología (UNAM), 56. <https://doi.org/10.1007/s00431-003-1251-6>

Food and Agriculture Organization of the United Nations(FAO). (2006). Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Serie Didactica, Facultad de Agronomía y Zootecnia, Universidad Nacional de Tucuman, 45.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2017). Book I, Understanding AquaCrop. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-i6051e.pdf>

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2017). Manual de referencia AquaCrop.

- Huacac Trujillo, M. R. (2014). Universidad Nacional Jorge Basadre Grobmann-Tacna. 171. Recuperado de: <http://repositorio.unjbg.edu.pe/bitstream/handle/UNJBG/345/TG0185.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Katerji, N., & Campi, P. (2013). Productivity, evapotranspiration, and water use efficiency of corn and tomato crops simulated by AquaCrop under contrasting water stress conditions in the Mediterranean region. *Agricultural Water Management*, 130, 14–26. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.08.005>
- Mata, M. (2004). Efecto de N, P, K, Ca y Mg en etapas iniciales de crecimiento de Calabaza (Cucurbita pepo), Chile (Capsicum annum), Melón (Cucumis melo), Pepino (Cucumis sativus) y Sandía (Citrullus lannatus). (Tesis de pregrado, Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias División de Ciencias Agronómicas). Recuperada de: http://repositorio.cucba.udg.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/2335/Mata_Garcia_Maria_Guadalupe.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Montenegro Rojas, H. (2018). EL AZUFRE Y SU INFLUENCIA EN EL DESARROLLO DE *Golovinomyces cichoracearum* EN ZAPALLITO ITALIANO (Cucurbita pepo L.) cv. GREY ZUCCHINI. (Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina).
- Orozco, V. J. A., Galindo, E. P., Segura, M. A. C., Fortis, M. H., Preciado, P. R., Yescas, P. C., & Montemayor, J. A. T. (2016). Dinámica de crecimiento de calabacita (Cucurbita pepo L.) en un sustrato a base de vermicomposta en invernadero. *Phyton*, 85, 117–124.
- Raes, D., & van Gaelen, H. (2017). AquaCrop Training Handbook - Book II.
- Rodas-Gaitán, H. A. (2012). Macronutrients absorption curves in italian squash (Cucurbita pepo L.). *Revista Fitotecnia Mexicana*, 35(spe5), 57–60.
- Sam-Amoah, L., & Darko, R. (2013). Calibration and Validation of Aqua Crop for Full and Deficit Irrigation of Hot Pepper. *Development*, 8(2), 175–178. Retrieved from http://www.arpnjournals.com/jabs/research_papers/rp_2013/jabs_0213_532.pdf
- Ugás R., S. Siura, F. D. de la F. (2000). Programa de Hortalizas, UNA La Molina, 2000. Datos Básicos de Hortalizas, (3), 96–110.

Victoriano, M. F. (2015). Respuestas morfofisiológicas y rendimiento del cultivo de Cucurbita pepo var. Zucchini grey por efecto de zeolita y acolchado plástico (Tesis de maestri, CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA). Recuperada de:<https://doi.org/10.1145/3132847.3132886>

Zamora, E. (1986). EL cultivo del. Universidad de Sonora, 1–8.

Zegarra Hinojosa, H. B. (2012). INFLUENCIA DE AMINOÁCIDOS EN EL RENDIMIENTO DEL CULTIVO DE ZAPALLITO ITALIANO (Cucurbita pepo L.) (Tesis de pregrado, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann - Tacna). Recuperada de: <http://repositorio.unjbg.edu.pe/bitstream/handle/UNJBG/687/TG0540.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Chipa Ramos, L. (2012). Evaluación de niveles de fertilización y densidad de siembra en tres variedades de zapallito italiano (cucurbita pepo L.) en Santa Ana - La convención (Tesis de pregrado, Universidad Nacional De San Antonio Abad Del Cusco). Recuperada de: <http://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/UNSAAC/1125>

VIII. ANEXOS

ANEXO 1: INFORMACIÓN CLIMÁTICA

Tabla 48: Información de temperatura máxima recopilada de la estación meteorológica “ClimateMinder”

Fecha	T° Máxima diaria (°C)	Fecha	T° Máxima diaria (°C)	Fecha	T° Máxima diaria (°C)
06-may	26.22	06-jun	19.74	07-jul	20.18
07-may	21.16	07-jun	17.8	08-jul	19.96
08-may	23.77	08-jun	20.13	09-jul	19.16
09-may	24.32	09-jun	19.3	10-jul	18.04
10-may	21.73	10-jun	19.68	11-jul	19.5
11-may	22.91	11-jun	19.8	12-jul	17.33
12-may	23.29	12-jun	18.75	13-jul	17.51
13-may	26.74	13-jun	20.61	14-jul	17.05
14-may	25.26	14-jun	18.98	15-jul	16.87
15-may	20.37	15-jun	17.87	16-jul	17.04
16-may	18.39	16-jun	18.86	17-jul	19.82
17-may	22.1	17-jun	17.43	18-jul	17.67
18-may	21.98	18-jun	16.57	19-jul	16.67
19-may	24.85	19-jun	17.41	20-jul	18.67
20-may	24.21	20-jun	16.84	21-jul	18.27
21-may	24.04	21-jun	17.82	22-jul	16.76
22-may	22.28	22-jun	17.4	23-jul	17.52
23-may	19.05	23-jun	19.81	24-jul	17.7
24-may	17.94	24-jun	20.35	25-jul	18.46
25-may	19.13	25-jun	17.81	26-jul	18.9
26-may	19.76	26-jun	20.42	27-jul	17.37
27-may	21.48	27-jun	20.14	28-jul	17.22
28-may	18.82	28-jun	19.64	29-jul	15.73
29-may	19.86	29-jun	18.86	30-jul	16.68
30-may	21.14	30-jun	18.4	31-jul	16.79
31-may	19.04	01-jul	18	01-ago	16.25
01-jun	17.92	02-jul	18.23	02-ago	19.89
02-jun	21.82	03-jul	17.58	03-ago	17.63
03-jun	19.89	04-jul	17.16	04-ago	17.68
04-jun	17.22	05-jul	17.75	05-ago	17.96
05-jun	17.44	06-jul	19.42		

Tabla 49: Información de temperatura mínima recopilada de la estación meteorológica “ClimateMinder”

Fecha	T° Mínima diaria (°C)	Fecha	T° Mínima diaria (°C)	Fecha	T° Mínima diaria (°C)
06-may	18.34	11-jun	15.41	17-jul	14.53
07-may	17.83	12-jun	15.27	18-jul	14.19
08-may	18.04	13-jun	15.7	19-jul	14.15
09-may	17.44	14-jun	15.98	20-jul	14.64
10-may	17.75	15-jun	15.91	21-jul	14.41
11-may	17.92	16-jun	15.47	22-jul	14.63
12-may	16.82	17-jun	15.34	23-jul	14.2
13-may	18.19	18-jun	14.98	24-jul	14.52
14-may	17.7	19-jun	14.86	25-jul	14.24
15-may	17.12	20-jun	14.89	26-jul	13.32
16-may	16.82	21-jun	14.85	27-jul	13.12
17-may	15.72	22-jun	14.57	28-jul	13.06
18-may	15.49	23-jun	14.92	29-jul	12.78
19-may	16.71	24-jun	14.39	30-jul	12.9
20-may	16.95	25-jun	13.64	31-jul	13.61
21-may	16.14	26-jun	14.27	01-ago	13.95
22-may	17.15	27-jun	15.14	02-ago	13.37
23-may	16.74	28-jun	15.41	03-ago	13.45
24-may	16.23	29-jun	15.4	04-ago	13.5
25-may	16.16	30-jun	15.64	05-ago	13.42
26-may	16.4	01-jul	15.9		
27-may	16.72	02-jul	15.46		
28-may	15.56	03-jul	14.57		
29-may	15.47	04-jul	14.28		
30-may	15.32	05-jul	15.14		
31-may	16.13	06-jul	15.25		
01-jun	16.14	07-jul	15.02		
02-jun	15.96	08-jul	14.99		
03-jun	16.03	09-jul	14.58		
04-jun	15.22	10-jul	14.64		
05-jun	15.29	11-jul	15.61		
06-jun	15.17	12-jul	14.9		
07-jun	15.31	13-jul	14		
08-jun	15.69	14-jul	13.98		
09-jun	15.17	15-jul	14.26		
10-jun	15.39	16-jul	14.91		

Tabla 50: Información de precipitación recopilada de la estación meteorológica “ClimateMinder”

Fecha	Precipitación diaria (mm/día)	Fecha	Precipitación diaria (mm/día)	Fecha	Precipitación diaria (mm/día)
06-may	0	11-jun	0	17-jul	0
07-may	0	12-jun	0	18-jul	0
08-may	0	13-jun	0	19-jul	0.25
09-may	0	14-jun	0	20-jul	0
10-may	0	15-jun	0	21-jul	0
11-may	0	16-jun	0	22-jul	0
12-may	0	17-jun	0	23-jul	0
13-may	0	18-jun	0.25	24-jul	0
14-may	0	19-jun	0.5	25-jul	0
15-may	0	20-jun	0.25	26-jul	0.25
16-may	0	21-jun	0	27-jul	0
17-may	0	22-jun	0	28-jul	0
18-may	0	23-jun	0.25	29-jul	0.25
19-may	0	24-jun	0	30-jul	0.25
20-may	0	25-jun	0	31-jul	0
21-may	0	26-jun	0	01-ago	0
22-may	0	27-jun	0	02-ago	0
23-may	0	28-jun	0	03-ago	0
24-may	0.25	29-jun	0	04-ago	0
25-may	0.25	30-jun	0.25	05-ago	0
26-may	0.25	01-jul	0		
27-may	0	02-jul	0		
28-may	0	03-jul	0.25		
29-may	0	04-jul	0		
30-may	0	05-jul	0		
31-may	0.25	06-jul	0		
01-jun	0	07-jul	0		
02-jun	0	08-jul	0		
03-jun	0	09-jul	0		
04-jun	0.25	10-jul	0		
05-jun	0	11-jul	0		
06-jun	0.25	12-jul	0		
07-jun	0	13-jul	0		
08-jun	0	14-jul	0		
09-jun	0	15-jul	0		
10-jun	0	16-jul	0		

Tabla 51: Información de evapotranspiración de referencia (Eto) recopilada de la estación meteorológica “ClimateMinder”

Fecha	Eto (mm/día)	Fecha	Eto (mm/día)	Fecha	Eto (mm/día)
06-may	1.9	11-jun	1.524	17-jul	1.27
07-may	0.5	12-jun	1.016	18-jul	1.016
08-may	1.1	13-jun	1.524	19-jul	0.762
09-may	1.9	14-jun	1.016	20-jul	1.016
10-may	0.7	15-jun	0.762	21-jul	1.016
11-may	0.6	16-jun	1.016	22-jul	0.762
12-may	1.5	17-jun	0.762	23-jul	1.016
13-may	2	18-jun	0.762	24-jul	1.016
14-may	1.6	19-jun	0.762	25-jul	1.016
15-may	1.27	20-jun	0.762	26-jul	1.016
16-may	1.016	21-jun	1.016	27-jul	1.016
17-may	1.27	22-jun	0.762	28-jul	1.016
18-may	1.524	23-jun	1.27	29-jul	0.762
19-may	2.286	24-jun	1.524	30-jul	1.016
20-may	2.286	25-jun	1.016	31-jul	1.016
21-may	2.032	26-jun	1.27	01-ago	1.016
22-may	1.27	27-jun	1.27	02-ago	1.016
23-may	1.016	28-jun	1.27	03-ago	1.016
24-may	0.762	29-jun	1.016	04-ago	1.016
25-may	1.016	30-jun	0.762	05-ago	1.016
26-may	1.016	01-jul	0.762		
27-may	1.778	02-jul	0.762		
28-may	1.016	03-jul	0.762		
29-may	1.524	04-jul	0.762		
30-may	1.27	05-jul	0.762		
31-may	0.762	06-jul	1.016		
01-jun	1.016	07-jul	1.27		
02-jun	1.778	08-jul	1.524		
03-jun	1.016	09-jul	1.016		
04-jun	0.762	10-jul	0.762		
05-jun	0.762	11-jul	1.27		
06-jun	1.016	12-jul	0.762		
07-jun	0.762	13-jul	1.016		
08-jun	1.524	14-jul	0.762		
09-jun	1.27	15-jul	0.762		
10-jun	1.27	16-jul	0.762		

ANEXO 2: PROTOCOLO DE RIEGO

Tabla 52: Protocolo de riego usado para la operación del sistema de riego

Fecha	Hora Inicio	Eto (mm)	T (min) 120% Eto	T (min) 100% Eto	T (min) 80% Eto	T (min) 60% Eto	Hora Final 120Eto	Hora Final 100Eto	Hora Final 80Eto	Hora Final 60Eto
06/05/2019	01:22 p.m.	2	45	38	30	23	02:07 p.m.	02:00 p.m.	01:52 p.m.	01:45 p.m.
07/05/2019	11:06 a.m.	1.9	43	36	29	21	11:49 a.m.	11:42 a.m.	11:35 a.m.	11:27 a.m.
08/05/2019	11:08 a.m.	0.5	11	9	8	6	11:19 a.m.	11:17 a.m.	11:16 a.m.	11:14 a.m.
09/05/2019	12:19 p.m.	1.1	25	21	17	12	12:44 p.m.	12:40 p.m.	12:36 p.m.	12:31 p.m.
10/05/2019	10:22 a.m.	1.9	43	36	29	21	11:05 a.m.	10:58 a.m.	10:51 a.m.	10:43 a.m.
11/05/2019	10:10 a.m.	0.7	16	13	11	8	10:26 a.m.	10:23 a.m.	10:21 a.m.	10:18 a.m.
12/05/2019	10:30 a.m.	0.6	14	11	9	7	10:44 a.m.	10:41 a.m.	10:39 a.m.	10:37 a.m.
13/05/2019	12:26 p.m.	1.5	34	28	23	17	01:00 p.m.	12:54 p.m.	12:49 p.m.	12:44 p.m.
14/05/2019	11:00 a.m.	2	45	38	30	23	11:45 a.m.	11:38 a.m.	11:30 a.m.	11:23 a.m.
15/05/2019	10:47 a.m.	1.6	36	30	24	18	11:23 a.m.	11:17 a.m.	11:11 a.m.	11:05 a.m.
16/05/2019	11:09 a.m.	1.27	29	24	19	14	11:38 a.m.	11:33 a.m.	11:28 a.m.	11:23 a.m.
17/05/2019	09:26 a.m.	1.02	23	19	15	12	09:49 a.m.	09:45 a.m.	09:41 a.m.	09:38 a.m.
18/05/2019	09:08 a.m.	1.27	29	24	19	14	09:37 a.m.	09:32 a.m.	09:28 a.m.	09:23 a.m.
19/05/2019	11:40 a.m.	1.524	34	29	23	17	12:14 p.m.	12:09 p.m.	12:03 p.m.	11:57 p.m.
20/05/2019	12:26 p.m.	2.286	52	43	34	26	01:18 p.m.	01:09 p.m.	01:00 p.m.	12:52 p.m.
21/05/2019	10:58 a.m.	2.286	52	43	34	26	11:50 a.m.	11:41 a.m.	11:32 a.m.	11:24 a.m.
22/05/2019	12:42 p.m.	2.032	46	38	31	23	01:28 p.m.	01:20 p.m.	01:13 p.m.	01:05 p.m.
23/05/2019	12:34 p.m.	1.27	29	24	20	15	01:03 p.m.	12:58 p.m.	12:54 p.m.	12:49 p.m.
24/05/2019	11:00 a.m.	1.016	23	19	15	11	11:23 a.m.	11:19 a.m.	11:15 a.m.	11:11 a.m.
25/05/2019	03:46 p.m.	0.762	17	14	11	9	04:03 p.m.	04:00 p.m.	03:57 p.m.	03:55 p.m.
26/05/2019	01:00 p.m.	1.016	17	14	11	9	01:17 p.m.	01:14 p.m.	01:11 p.m.	01:09 p.m.

<<Continuación>>

27/05/2019	01:17 p.m.	1.016	17	14	11	9	01:34 p.m.	01:31 p.m.	01:28 p.m.	01:26 p.m.
28/05/2019	10:51 a.m.	1.778	40	33	27	20	11:31 a.m.	11:24 a.m.	11:18 a.m.	11:11 a.m.
29/05/2019	11:12 a.m.	1.016	23	19	15	11	11:35 a.m.	11:31 a.m.	11:27 a.m.	11:23 a.m.
30/05/2019	09:28 a.m.	1.524	34	29	23	17	10:01 a.m.	09:57 a.m.	09:51 a.m.	09:45 a.m.
31/05/2019	12:29 p.m.	1.27	29	24	20	15	12:58 p.m.	12:53 p.m.	12:49 p.m.	12:44 p.m.
01/06/2019	03:19 p.m.	0.762	17	14	11	9	03:36 p.m.	03:33 p.m.	03:30 p.m.	03:28 p.m.
02/06/2019	10:50 a.m.	1.016	23	19	15	11	11:13 a.m.	11:09 a.m.	11:05 a.m.	11:01 a.m.
03/06/2019	11:45 a.m.	1.778	40	33	27	20	12:25 p.m.	12:18 p.m.	12:12 p.m.	12:05 p.m.
04/06/2019	07:15 p.m.	1.016	23	19	15	11	07:38 p.m.	07:34 p.m.	07:30 p.m.	07:26 p.m.
05/06/2019	02:35 p.m.	0.762	17	14	11	9	02:52 p.m.	02:49 p.m.	02:46 p.m.	02:44 p.m.
06/06/2019	02:17 p.m.	0.762	17	14	11	9	02:34 p.m.	02:31 p.m.	02:28 p.m.	02:26 p.m.
07/06/2019	11:21 a.m.	1.016	23	19	15	11	11:43 a.m.	11:40 a.m.	11:36 a.m.	11:32 a.m.
08/06/2019	04:55 p.m.	0.762	13	11	9	6	05:08 p.m.	05:06 p.m.	05:04 p.m.	05:01 p.m.
09/06/2019	12:00 p.m.	1.524	34	29	23	17	12:34 p.m.	12:29 p.m.	12:23 p.m.	12:17 p.m.
10/06/2019	12:53 p.m.	1.27	29	24	20	15	01:22 p.m.	01:17 p.m.	01:13 p.m.	01:08 p.m.
11/06/2019	12:15 p.m.	1.27	29	24	20	15	12:37 p.m.	12:33 p.m.	12:29 p.m.	12:26 p.m.
12/06/2019	09:28 a.m.	1.524	34	29	23	17	10:01 a.m.	09:57 a.m.	09:51 a.m.	09:45 a.m.
13/06/2019	11:12 a.m.	1.016	23	19	15	11	11:35 a.m.	11:31 a.m.	11:27 a.m.	11:23 a.m.
14/06/2019	12:03 p.m.	1.524	34	29	23	17	12:37 p.m.	12:32 p.m.	12:26 p.m.	12:20 p.m.
15/06/2019	11:30 a.m.	1.016	23	19	15	11	11:53 a.m.	11:49 a.m.	11:45 a.m.	11:41 a.m.
16/06/2019	11:15 a.m.	0.762	13	11	9	6	11:28 a.m.	11:26 a.m.	11:24 a.m.	11:21 a.m.
17/06/2019	11:45 a.m.	1.016	23	19	15	11	12:08 a.m.	12:04 a.m.	12:00 a.m.	11:56 a.m.
18/06/2019	02:55 p.m.	0.762	13	11	9	6	03:08 p.m.	03:06 p.m.	03:04 p.m.	03:01 p.m.
19/06/2019	04:46 p.m.	0.762	13	11	9	6	05:03 p.m.	05:00 p.m.	04:57 p.m.	04:55 p.m.

<<Continuación>>

20/06/2019	01:19 p.m.	0.762	13	11	9	6	01:36 p.m.	01:33 p.m.	01:30 p.m.	01:28 p.m.
21/06/2019	01:21 p.m.	0.762	13	11	9	6	01:38 p.m.	01:35 p.m.	01:32 p.m.	01:30 p.m.
22/06/2019	03:15 p.m.	1.016	23	19	15	11	03:38 p.m.	03:34 p.m.	03:30 p.m.	03:26 p.m.
23/06/2019	02:20 p.m.	0.762	23	19	15	11	02:43 p.m.	02:39 p.m.	02:35 p.m.	02:31 p.m.
24/06/2019	10:45 a.m.	1.27	29	24	20	15	11:14 p.m.	11:09 p.m.	11:05 p.m.	11:00 p.m.
25/06/2019	02:28 a.m.	1.524	34	29	23	17	03:01 a.m.	02:57 a.m.	02:51 a.m.	02:45 a.m.
26/06/2019	02:15 p.m.	1.016	23	19	15	11	02:38 p.m.	02:34 p.m.	02:30 p.m.	02:26 p.m.
27/06/2019	11:15 p.m.	1.27	29	24	20	15	11:37 p.m.	11:33 p.m.	11:29 p.m.	11:26 p.m.
28/06/2019	12:20 p.m.	1.27	29	24	20	15	12:42 p.m.	12:38 p.m.	12:36 p.m.	12:31 p.m.
29/06/2019	10:10 p.m.	1.27	29	24	20	15	10:32 p.m.	10:28 p.m.	10:24 p.m.	10:21 p.m.
30/06/2019	11:35 a.m.	1.016	23	19	15	11	11:58 a.m.	11:54 a.m.	11:50 a.m.	11:46 a.m.
01/07/2019	07:45 p.m.	0.762	13	11	9	6	07:58 p.m.	07:56 p.m.	07:54 p.m.	07:51 p.m.
02/07/2019	07:21 p.m.	0.762	13	11	9	6	07:38 p.m.	07:35 p.m.	07:32 p.m.	07:30 p.m.
03/07/2019	08:01 p.m.	0.762	13	11	9	6	08:14 p.m.	08:12 p.m.	08:10 p.m.	08:07 p.m.
04/07/2019	07:00 p.m.	0.762	13	11	9	6	07:13 p.m.	07:11 p.m.	07:09 p.m.	07:06 p.m.
05/07/2019	07:30 p.m.	0.762	13	11	9	6	07:43 p.m.	07:41 p.m.	07:39 p.m.	07:36 p.m.
06/07/2019	12:00 p.m.	0.762	13	11	9	6	12:13 p.m.	12:11 p.m.	12:09 p.m.	12:06 p.m.
07/07/2019	01:30 p.m.	1.016	23	19	15	11	01:43 p.m.	01:41 p.m.	01:39 p.m.	01:36 p.m.
08/07/2019	07:10 p.m.	1.27	29	24	20	15	07:39 p.m.	07:34 p.m.	07:30 p.m.	07:25 p.m.
09/07/2019	04:30 p.m.	1.524	34	29	23	17	05:04 p.m.	04:59 p.m.	04:53 p.m.	04:47 p.m.
10/07/2019	05:15 p.m.	1.016	23	19	15	11	05:38 p.m.	05:34 p.m.	05:30 p.m.	05:26 p.m.
11/07/2019	08:00 p.m.	0.762	13	11	9	6	08:13 p.m.	08:11 p.m.	08:09 p.m.	08:06 p.m.
12/07/2019	02:15 p.m.	1.27	29	24	20	15	02:44 p.m.	02:39 p.m.	02:35 p.m.	02:30 p.m.
13/07/2019	11:30 a.m.	0.762	13	11	9	6	11:43 a.m.	11:41 a.m.	11:39 a.m.	11:36 a.m.

<<Continuación>>

14/07/2019	12:45 p.m.	1.016	23	19	15	11	01:08 p.m.	01:04 p.m.	01:00 p.m.	12:56 p.m.
15/07/2019	01:22 p.m.	0.762	13	11	9	6	01:35 p.m.	01:33 p.m.	01:31 p.m.	01:28 p.m.
16/07/2019	11:06 a.m.	0.762	13	11	9	6	11:19 a.m.	11:17 a.m.	11:15 a.m.	11:12 a.m.
17/07/2019	11:08 a.m.	0.762	13	11	9	6	11:21 a.m.	11:19 a.m.	11:17 a.m.	11:14 a.m.
18/07/2019	12:19 p.m.	1.27	29	24	20	15	12:48 p.m.	12:43 p.m.	12:39 p.m.	12:34 p.m.
19/07/2019	10:22 a.m.	1.016	23	19	15	11	10:45 a.m.	10:41 a.m.	10:37 a.m.	10:33 a.m.
20/07/2019	10:10 a.m.	0.762	13	11	9	6	10:33 a.m.	10:29 a.m.	10:25 a.m.	10:21 a.m.
21/07/2019	11:35 a.m.	1.016	23	19	15	11	11:58 a.m.	11:54 a.m.	11:50 a.m.	11:46 a.m.
22/07/2019	12:53 p.m.	1.016	23	19	15	11	01:16 p.m.	01:12 p.m.	01:08 p.m.	01:04 p.m.
23/07/2019	12:15 p.m.	0.762	13	11	9	6	12:38 p.m.	12:34 p.m.	12:30 p.m.	12:26 p.m.
24/07/2019	09:28 a.m.	1.016	23	19	15	11	09:51 a.m.	09:47 a.m.	09:43 a.m.	09:39 a.m.
25/07/2019	11:12 a.m.	1.016	23	19	15	11	11:35 a.m.	11:31 a.m.	11:27 a.m.	11:23 a.m.
26/07/2019	12:03 p.m.	1.016	23	19	15	11	12:26 p.m.	12:22 p.m.	12:18 p.m.	12:14 p.m.
27/07/2019	11:12 a.m.	1.016	23	19	15	11	11:35 a.m.	11:31 a.m.	11:27 a.m.	11:23 a.m.
28/07/2019	01:15 p.m.	1.016	23	19	15	11	01:38 p.m.	01:34 p.m.	01:30 p.m.	01:26 p.m.
29/07/2019	11:45 a.m.	1.016	23	19	15	11	12:08 p.m.	12:04 p.m.	12:00 p.m.	11:56 p.m.
30/07/2019	07:15 p.m.	0.762	13	11	9	6	07:28 p.m.	07:26 p.m.	07:24 p.m.	07:21 p.m.
31/07/2019	02:35 p.m.	1.016	23	19	15	11	02:58 p.m.	02:54 p.m.	02:50 p.m.	02:46 p.m.
01/08/2019	02:17 p.m.	1.016	23	19	15	11	02:40 p.m.	02:36 p.m.	02:32 p.m.	02:28 p.m.
02/08/2019	11:21 a.m.	1.016	23	19	15	11	11:44 a.m.	11:40 a.m.	11:36 a.m.	11:32 a.m.
03/08/2019	04:55 p.m.	1.016	23	19	15	11	05:18 p.m.	05:14 p.m.	05:10 p.m.	05:06 p.m.
04/08/2019	03:15 p.m.	1.016	23	19	15	11	03:38 p.m.	03:34 p.m.	03:30 p.m.	03:26 p.m.
05/08/2019	02:20 p.m.	1.016	23	19	15	11	02:43 p.m.	02:39 p.m.	02:35 p.m.	02:31 p.m.

ANEXO 3: LAMINAS DE RIEGO APLICADAS EN CAMPO

Tabla 53: Lamina de riego aplicada al tratamiento de riego equivalente al 120% de la Eto

Días después de la siembra (DDS)	Lamina de riego aplicado al tratamiento de riego equivalente al 120% Eto	Días después de la siembra (DDS)	Lamina de riego aplicado al tratamiento de riego equivalente al 120% Eto	Días después de la siembra (DDS)	Lamina de riego aplicado al tratamiento de riego equivalente al 120% Eto
1	2.82	37	1.79	73	1.08
2	2.68	38	2.15	74	1.79
3	0.71	39	1.43	75	1.43
4	1.55	40	2.15	76	1.08
5	2.68	41	1.43	77	1.43
6	0.99	42	1.08	78	1.43
7	0.85	43	1.43	79	1.08
8	2.12	44	1.08	80	1.43
9	2.82	45	1.08	81	1.43
10	2.26	46	1.08	82	1.43
11	1.79	47	1.08	83	1.43
12	1.43	48	1.43	84	1.43
13	1.79	49	1.08	85	1.43
14	2.15	50	1.79	86	1.08
15	3.23	51	2.15	87	1.43
16	3.23	52	1.43	88	1.43
17	2.87	53	1.79	89	1.43
18	1.79	54	1.79	90	1.43
19	1.43	55	1.79	91	1.43
20	1.08	56	1.43	92	1.43
21	1.43	57	1.08		
22	1.43	58	1.08		
23	2.51	59	1.08		
24	1.43	60	1.08		
25	2.15	61	1.08		
26	1.79	62	1.08		
27	1.08	63	1.43		
28	1.43	64	1.79		
29	2.51	65	2.15		
30	1.43	66	1.43		
31	1.08	67	1.08		
32	1.08	68	1.79		
33	1.43	69	1.08		
34	1.08	70	1.43		
35	2.15	71	1.08		
36	1.79	72	1.08		

Tabla 54: Lamina de riego aplicada al tratamiento de riego equivalente al 100% de la Eto

Días después de la siembra (DDS)	Lamina de riego aplicado al tratamiento de riego equivalente al 100% Eto	Días después de la siembra (DDS)	Lamina de riego aplicado al tratamiento de riego equivalente al 100% Eto	Días después de la siembra (DDS)	Lamina de riego aplicado al tratamiento de riego equivalente al 100% Eto
1	2.35	37	1.49	73	0.90
2	2.24	38	1.79	74	1.49
3	0.59	39	1.20	75	1.20
4	1.29	40	1.79	76	0.90
5	2.24	41	1.20	77	1.20
6	0.82	42	0.90	78	1.20
7	0.71	43	1.20	79	0.90
8	1.76	44	0.90	80	1.20
9	2.35	45	0.90	81	1.20
10	1.88	46	0.90	82	1.20
11	1.49	47	0.90	83	1.20
12	1.20	48	1.20	84	1.20
13	1.49	49	0.90	85	1.20
14	1.79	50	1.49	86	0.90
15	2.69	51	1.79	87	1.20
16	2.69	52	1.20	88	1.20
17	2.39	53	1.49	89	1.20
18	1.49	54	1.49	90	1.20
19	1.20	55	1.49	91	1.20
20	0.90	56	1.20	92	1.20
21	1.20	57	0.90		
22	1.20	58	0.90		
23	2.09	59	0.90		
24	1.20	60	0.90		
25	1.79	61	0.90		
26	1.49	62	0.90		
27	0.90	63	1.20		
28	1.20	64	1.49		
29	2.09	65	1.79		
30	1.20	66	1.20		
31	0.90	67	0.90		
32	0.90	68	1.49		
33	1.20	69	0.90		
34	0.90	70	1.20		
35	1.79	71	0.90		
36	1.49	72	0.90		

Tabla 55: Lamina de riego aplicada al tratamiento de riego equivalente al 80% de la Eto

Días después de la siembra (DDS)	Lamina de riego aplicado al tratamiento de riego equivalente al 80% Eto	Días después de la siembra (DDS)	Lamina de riego aplicado al tratamiento de riego equivalente al 80% Eto	Días después de la siembra (DDS)	Lamina de riego aplicado al tratamiento de riego equivalente al 80% Eto
1	1.88	37	1.20	73	0.72
2	1.79	38	1.43	74	1.20
3	0.47	39	0.96	75	0.96
4	1.04	40	1.43	76	0.72
5	1.79	41	0.96	77	0.96
6	0.66	42	0.72	78	0.96
7	0.56	43	0.96	79	0.72
8	1.41	44	0.72	80	0.96
9	1.88	45	0.72	81	0.96
10	1.51	46	0.72	82	0.96
11	1.20	47	0.72	83	0.96
12	0.96	48	0.96	84	0.96
13	1.20	49	0.72	85	0.96
14	1.43	50	1.20	86	0.72
15	2.15	51	1.43	87	0.96
16	2.15	52	0.96	88	0.96
17	1.91	53	1.20	89	0.96
18	1.20	54	1.20	90	0.96
19	0.96	55	1.20	91	0.96
20	0.72	56	0.96	92	0.96
21	0.96	57	0.72		
22	0.96	58	0.72		
23	1.67	59	0.72		
24	0.96	60	0.72		
25	1.43	61	0.72		
26	1.20	62	0.72		
27	0.72	63	0.96		
28	0.96	64	1.20		
29	1.67	65	1.43		
30	0.96	66	0.96		
31	0.72	67	0.72		
32	0.72	68	1.20		
33	0.96	69	0.72		
34	0.72	70	0.96		
35	1.43	71	0.72		
36	1.20	72	0.72		

Tabla 56: Lamina de riego aplicada al tratamiento de riego equivalente al 60% de la Eto

Días después de la siembra (DDS)	Lamina de riego aplicado al tratamiento de riego equivalente al 60% Eto	Días después de la siembra (DDS)	Lamina de riego aplicado al tratamiento de riego equivalente al 60% Eto	Días después de la siembra (DDS)	Lamina de riego aplicado al tratamiento de riego equivalente al 60% Eto
1	1.41	37	0.90	73	0.54
2	1.34	38	1.08	74	0.90
3	0.35	39	0.72	75	0.72
4	0.78	40	1.08	76	0.54
5	1.34	41	0.72	77	0.72
6	0.49	42	0.54	78	0.72
7	0.42	43	0.72	79	0.54
8	1.06	44	0.54	80	0.72
9	1.41	45	0.54	81	0.72
10	1.13	46	0.54	82	0.72
11	0.90	47	0.54	83	0.72
12	0.72	48	0.72	84	0.72
13	0.90	49	0.54	85	0.72
14	1.08	50	0.90	86	0.54
15	1.61	51	1.08	87	0.72
16	1.61	52	0.72	88	0.72
17	1.43	53	0.90	89	0.72
18	0.90	54	0.90	90	0.72
19	0.72	55	0.90	91	0.72
20	0.54	56	0.72	92	0.72
21	0.72	57	0.54		
22	0.72	58	0.54		
23	1.26	59	0.54		
24	0.72	60	0.54		
25	1.08	61	0.54		
26	0.90	62	0.54		
27	0.54	63	0.72		
28	0.72	64	0.90		
29	1.26	65	1.08		
30	0.72	66	0.72		
31	0.54	67	0.54		
32	0.54	68	0.90		
33	0.72	69	0.54		
34	0.54	70	0.72		
35	1.08	71	0.54		
36	0.90	72	0.54		

**ANEXO 4: INFORMACIÓN DE HUMEDAD A 30 CM DE PROFUNDIDAD
REGISTRADA POR LOS DATA LOGGERS**

Tabla 57: Contenido de humedad del tratamiento de riego equivalente al 120% de la Eto.

Fecha	Contenido		Fecha	Contenido		Fecha	Contenido	
	DDS	humedad (mm)		DDS	humedad (mm)		DDS	humedad (mm)
06-may	1	78.00	11-jun	37	77.44	17-jul	73	76.76
07-may	2	78.22	12-jun	38	77.66	18-jul	74	76.99
08-may	3	77.78	13-jun	39	77.33	19-jul	75	77.55
09-may	4	78.00	14-jun	40	77.33	20-jul	76	77.21
10-may	5	78.22	15-jun	41	77.55	21-jul	77	77.21
11-may	6	77.78	16-jun	42	77.55	22-jul	78	76.88
12-may	7	78.00	17-jun	43	77.21	23-jul	79	76.54
13-may	8	78.22	18-jun	44	77.44	24-jul	80	76.20
14-may	9	78.00	19-jun	45	77.66	25-jul	81	76.20
15-may	10	77.78	20-jun	46	77.89	26-jul	82	76.43
16-may	11	78.22	21-jun	47	77.55	27-jul	83	76.09
17-may	12	77.89	22-jun	48	77.21	28-jul	84	76.09
18-may	13	78.11	23-jun	49	77.44	29-jul	85	76.65
19-may	14	78.34	24-jun	50	76.99	30-jul	86	76.31
20-may	15	78.34	25-jun	51	77.21	31-jul	87	75.98
21-may	16	78.56	26-jun	52	77.44	01-ago	88	75.98
22-may	17	78.22	27-jun	53	76.99	02-ago	89	75.64
23-may	18	77.78	28-jun	54	76.54	03-ago	90	75.86
24-may	19	78.34	29-jun	55	76.99	04-ago	91	75.53
25-may	20	78.00	30-jun	56	77.44	05-ago	92	75.19
26-may	21	77.66	01-jul	57	77.44			
27-may	22	78.22	02-jul	58	77.10			
28-may	23	78.45	03-jul	59	77.33			
29-may	24	78.11	04-jul	60	76.99			
30-may	25	77.66	05-jul	61	77.21			
31-may	26	78.11	06-jul	62	76.88			
01-jun	27	78.34	07-jul	63	77.44			
02-jun	28	78.00	08-jul	64	76.99			
03-jun	29	78.22	09-jul	65	77.21			
04-jun	30	77.89	10-jul	66	76.88			
05-jun	31	77.55	11-jul	67	76.88			
06-jun	32	78.00	12-jul	68	77.33			
07-jun	33	77.66	13-jul	69	77.55			
08-jun	34	77.89	14-jul	70	77.21			
09-jun	35	77.44	15-jul	71	77.44			
10-jun	36	77.89	16-jul	72	77.10			

Tabla 58: Contenido de humedad del tratamiento de riego equivalente al 100% de la Eto.

Fecha	DDS	Contenido humedad (mm)	Fecha	DDS	Contenido humedad (mm)	Fecha	DDS	Contenido humedad (mm)
06-may	1	78.00	11-jun	37	76.75	17-jul	73	72.78
07-may	2	77.32	12-jun	38	76.53	18-jul	74	73.01
08-may	3	77.77	13-jun	39	75.96	19-jul	75	72.44
09-may	4	77.32	14-jun	40	76.19	20-jul	76	72.67
10-may	5	77.55	15-jun	41	75.96	21-jul	77	72.90
11-may	6	77.32	16-jun	42	76.19	22-jul	78	72.33
12-may	7	77.32	17-jun	43	76.41	23-jul	79	72.10
13-may	8	77.55	18-jun	44	76.07	24-jul	80	72.33
14-may	9	77.09	19-jun	45	75.73	25-jul	81	72.56
15-may	10	77.32	20-jun	46	75.96	26-jul	82	71.99
16-may	11	77.55	21-jun	47	75.62	27-jul	83	72.22
17-may	12	77.32	22-jun	48	75.05	28-jul	84	72.44
18-may	13	77.55	23-jun	49	75.28	29-jul	85	71.88
19-may	14	77.77	24-jun	50	75.51	30-jul	86	72.10
20-may	15	77.55	25-jun	51	75.17	31-jul	87	72.33
21-may	16	77.32	26-jun	52	74.60	01-ago	88	72.10
22-may	17	77.55	27-jun	53	74.37	02-ago	89	71.54
23-may	18	77.77	28-jun	54	74.60	03-ago	90	71.76
24-may	19	77.21	29-jun	55	74.26	04-ago	91	71.99
25-may	20	77.43	30-jun	56	74.49	05-ago	92	71.42
26-may	21	77.66	01-jul	57	74.71			
27-may	22	77.09	02-jul	58	74.37			
28-may	23	76.87	03-jul	59	74.03			
29-may	24	77.09	04-jul	60	73.81			
30-may	25	76.87	05-jul	61	74.03			
31-may	26	77.09	06-jul	62	73.69			
01-jun	27	77.32	07-jul	63	73.92			
02-jun	28	77.09	08-jul	64	73.58			
03-jun	29	77.32	09-jul	65	73.24			
04-jun	30	76.75	10-jul	66	73.47			
05-jun	31	76.98	11-jul	67	73.69			
06-jun	32	76.64	12-jul	68	73.47			
07-jun	33	76.87	13-jul	69	73.24			
08-jun	34	76.53	14-jul	70	72.67			
09-jun	35	76.30	15-jul	71	72.90			
10-jun	36	76.53	16-jul	72	73.13			

Tabla 59: Contenido de humedad del tratamiento de riego equivalente al 80% de la Eto.

Fecha	DDS	Contenido humedad (mm)	Fecha	DDS	Contenido humedad (mm)	Fecha	DDS	Contenido humedad (mm)
06-may	1	78.00	11-jun	37	73.87	17-jul	73	67.79
07-may	2	77.43	12-jun	38	73.30	18-jul	74	67.56
08-may	3	77.95	13-jun	39	73.30	19-jul	75	67.22
09-may	4	77.72	14-jun	40	72.72	20-jul	76	66.99
10-may	5	77.27	15-jun	41	72.49	21-jul	77	67.22
11-may	6	77.72	16-jun	42	72.26	22-jul	78	66.87
12-may	7	77.95	17-jun	43	72.49	23-jul	79	66.64
13-may	8	77.72	18-jun	44	72.26	24-jul	80	66.64
14-may	9	77.50	19-jun	45	72.26	25-jul	81	66.30
15-may	10	77.95	20-jun	46	72.04	26-jul	82	66.30
16-may	11	77.38	21-jun	47	72.04	27-jul	83	66.53
17-may	12	77.15	22-jun	48	71.69	28-jul	84	66.53
18-may	13	77.61	23-jun	49	71.69	29-jul	85	66.30
19-may	14	77.04	24-jun	50	71.46	30-jul	86	66.53
20-may	15	77.27	25-jun	51	70.89	31-jul	87	66.53
21-may	16	77.04	26-jun	52	70.89	01-ago	88	66.30
22-may	17	77.56	27-jun	53	70.66	02-ago	89	66.30
23-may	18	77.11	28-jun	54	70.43	03-ago	90	66.53
24-may	19	77.33	29-jun	55	70.66	04-ago	91	66.19
25-may	20	76.76	30-jun	56	70.31	05-ago	92	66.41
26-may	21	77.22	01-jul	57	70.09			
27-may	22	76.65	02-jul	58	70.09			
28-may	23	76.42	03-jul	59	69.86			
29-may	24	76.65	04-jul	60	69.63			
30-may	25	76.07	05-jul	61	69.63			
31-may	26	76.16	06-jul	62	69.40			
01-jun	27	75.94	07-jul	63	69.40			
02-jun	28	75.59	08-jul	64	69.17			
03-jun	29	75.02	09-jul	65	68.59			
04-jun	30	75.25	10-jul	66	68.25			
05-jun	31	75.02	11-jul	67	68.48			
06-jun	32	75.02	12-jul	68	68.14			
07-jun	33	74.67	13-jul	69	68.14			
08-jun	34	74.44	14-jul	70	67.79			
09-jun	35	73.87	15-jul	71	67.56			
10-jun	36	74.10	16-jul	72	67.56			

Tabla 60: Contenido de humedad del tratamiento de riego equivalente al 60% de la Eto.

Fecha	DDS	Contenido humedad (mm)	Fecha	DDS	Contenido humedad (mm)	Fecha	DDS	Contenido humedad (mm)
06-may	1	78.00	11-jun	37	72.88	17-jul	73	62.16
07-may	2	77.51	12-jun	38	72.27	18-jul	74	62.52
08-may	3	77.51	13-jun	39	71.91	19-jul	75	62.16
09-may	4	77.27	14-jun	40	71.91	20-jul	76	61.79
10-may	5	77.27	15-jun	41	71.54	21-jul	77	61.43
11-may	6	77.03	16-jun	42	71.18	22-jul	78	61.43
12-may	7	77.27	17-jun	43	70.81	23-jul	79	61.06
13-may	8	77.03	18-jun	44	70.81	24-jul	80	60.69
14-may	9	76.90	19-jun	45	70.44	25-jul	81	60.69
15-may	10	77.03	20-jun	46	70.08	26-jul	82	60.33
16-may	11	77.39	21-jun	47	69.83	27-jul	83	60.33
17-may	12	77.15	22-jun	48	69.47	28-jul	84	60.33
18-may	13	77.15	23-jun	49	69.47	29-jul	85	59.96
19-may	14	76.54	24-jun	50	69.10	30-jul	86	59.60
20-may	15	76.90	25-jun	51	68.49	31-jul	87	59.60
21-may	16	77.27	26-jun	52	68.13	01-ago	88	59.23
22-may	17	77.27	27-jun	53	67.52	02-ago	89	58.87
23-may	18	76.90	28-jun	54	67.15	03-ago	90	58.87
24-may	19	76.66	29-jun	55	66.79	04-ago	91	58.50
25-may	20	76.66	30-jun	56	66.79	05-ago	92	58.50
26-may	21	76.29	01-jul	57	66.42			
27-may	22	76.29	02-jul	58	66.06			
28-may	23	75.93	03-jul	59	65.69			
29-may	24	75.93	04-jul	60	65.69			
30-may	25	76.29	05-jul	61	65.33			
31-may	26	75.93	06-jul	62	64.96			
01-jun	27	75.56	07-jul	63	64.59			
02-jun	28	75.56	08-jul	64	64.96			
03-jun	29	75.20	09-jul	65	64.59			
04-jun	30	75.20	10-jul	66	64.23			
05-jun	31	74.83	11-jul	67	63.86			
06-jun	32	74.47	12-jul	68	63.86			
07-jun	33	74.47	13-jul	69	63.50			
08-jun	34	74.10	14-jul	70	63.13			
09-jun	35	73.49	15-jul	71	62.77			
10-jun	36	73.49	16-jul	72	62.52			

ANEXO 5: ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Tabla 61: Análisis de varianza para la biomasa aérea seca final T x ha⁻¹

Fuente de variación	S.C	G. L	C.M	F calc	p-valor
Modelo	0.24	3	0.08	22.63	0.0003
Tratamiento de riego	0.24	3	0.08	22.63	0.0003
Error	0.03	8	0.0036		
Total	0.27	11			
Coefficiente de variación (%)	1.29				

Tabla 62: Prueba de Turkey para la biomasa aérea seca final con un nivel de significancia de 5%

Tratamiento de riego	Biomasa aérea seca promedio T x ha ⁻¹	n	E.E.	
60% Eto	4.47	3	0.03	A
80% Eto	4.6	3	0.03	A B
100% Eto	4.63	3	0.03	B
120% Eto	4.86	3	0.03	C

Tabla 63: Análisis de varianza para la cobertura del dosel final (%)

Fuente de variación	S.C	G. L	C.M	F calc	p-valor
Modelo	106.65	3	35.55	1.54	0.2785
Tratamiento de riego	106.65	3	35.55	1.54	0.2785
Error	185.17	8	23.15		
Total	291.82	11			
Coefficiente de variación (%)	5.80				

Tabla 64: Prueba de Turkey para la cobertura del dosel final con un nivel de significancia de 5%

Tratamiento de riego	Cobertura del dosel promedio (%)	n	E.E.	
60% Eto	78.64	3	2.78	A
80% Eto	82.73	3	2.78	A
100% Eto	83.22	3	2.78	A
120% Eto	87.06	3	2.78	A

Tabla 65: Análisis de varianza para el rendimiento del cultivo T x ha⁻¹

Fuente de variación	S.C	G. L	C.M	F calc	p-valor
Modelo	70.89	3	23.63	116.43	<0.0001
Tratamiento de riego	70.89	3	23.63	116.43	<0.0001
Error	1.62	8	0.2		
Total	72.51	11			
Coefficiente de variación (%)	2.25				

Tabla 66: Prueba de Turkey para el rendimiento del cultivo con un nivel de significancia de 5%

Tratamiento de riego	Medias	n	E.E.	
60%Eto	17.69	3	0.26	A
80%Eto	19.04	3	0.26	B
100%Eto	19.3	3	0.26	B
120%Eto	24.11	3	0.26	C

ANEXO 6: RESULTADO DE LA SIMULACIÓN EN AQUACROP

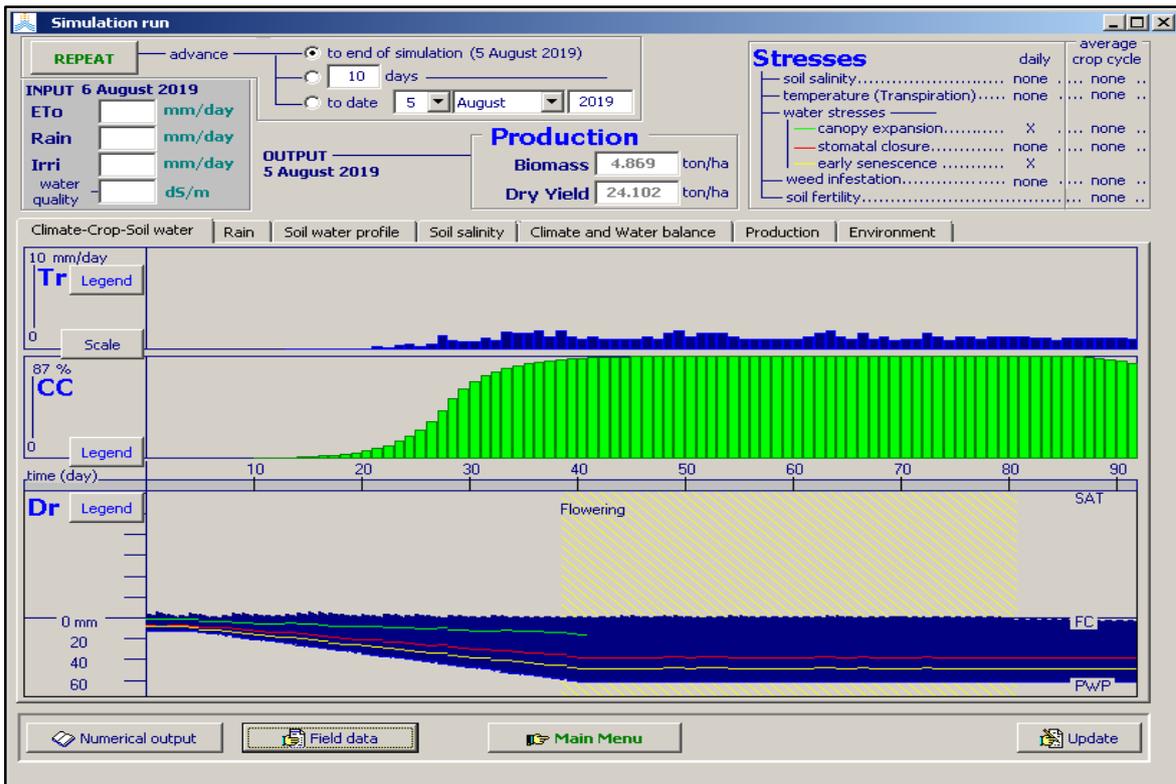


Figura 62: Resultado de la simulación en AQUACROP del tratamiento de riego equivalente al 120% de la Eto

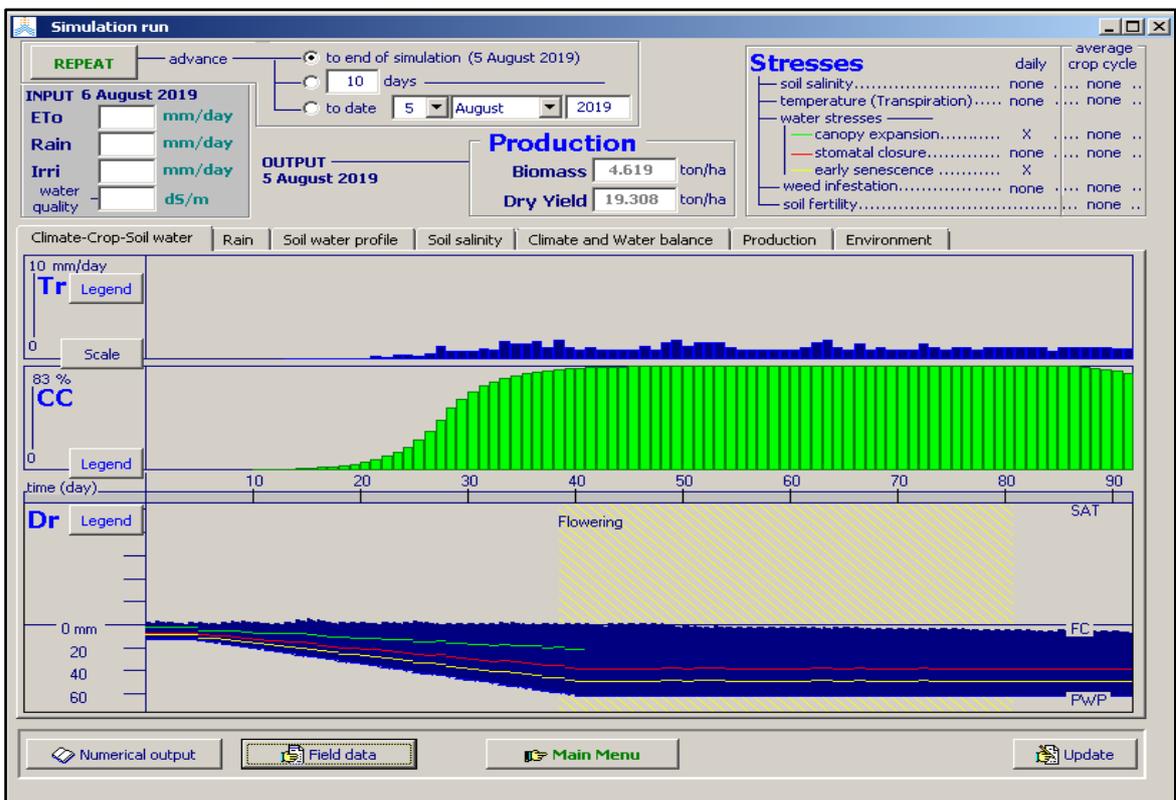


Figura 63: Resultado de la simulación en AQUACROP del tratamiento de riego equivalente al 100% de la Eto.

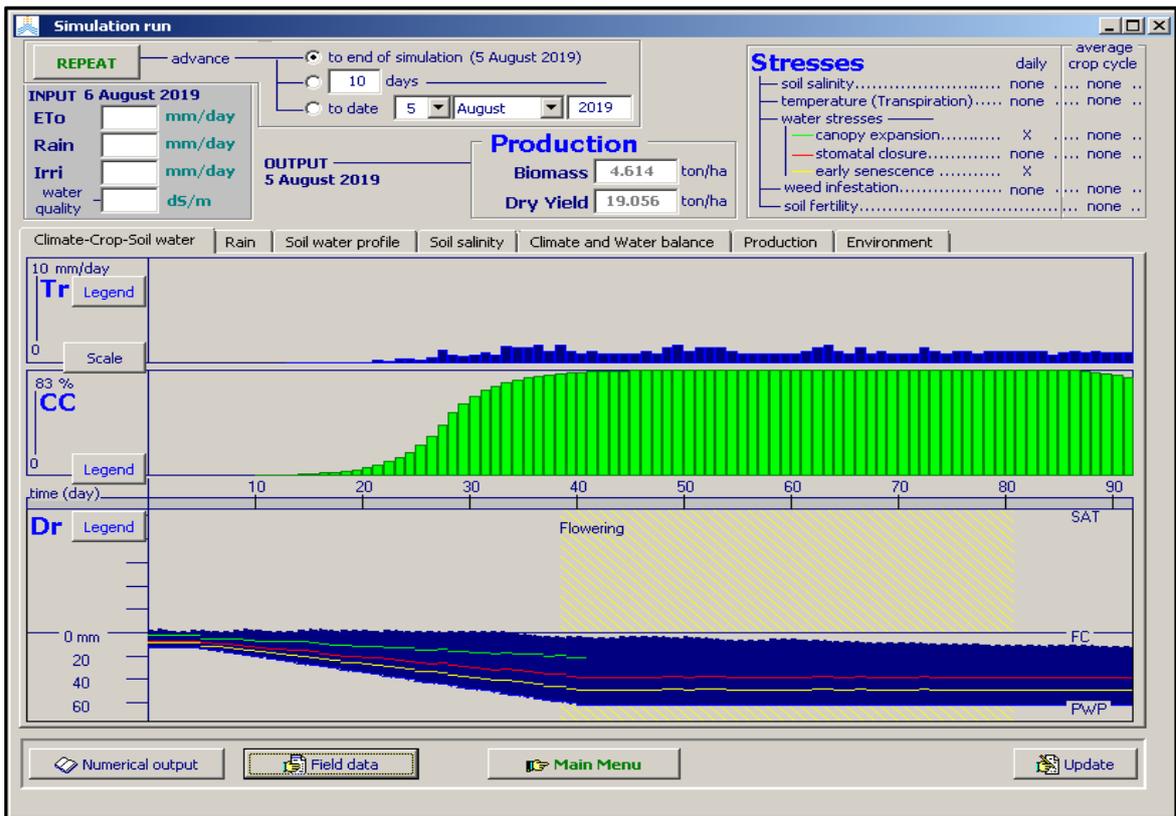


Figura 64: Resultado de la simulación en AQUACROP del tratamiento de riego equivalente al 80% de la Eto.

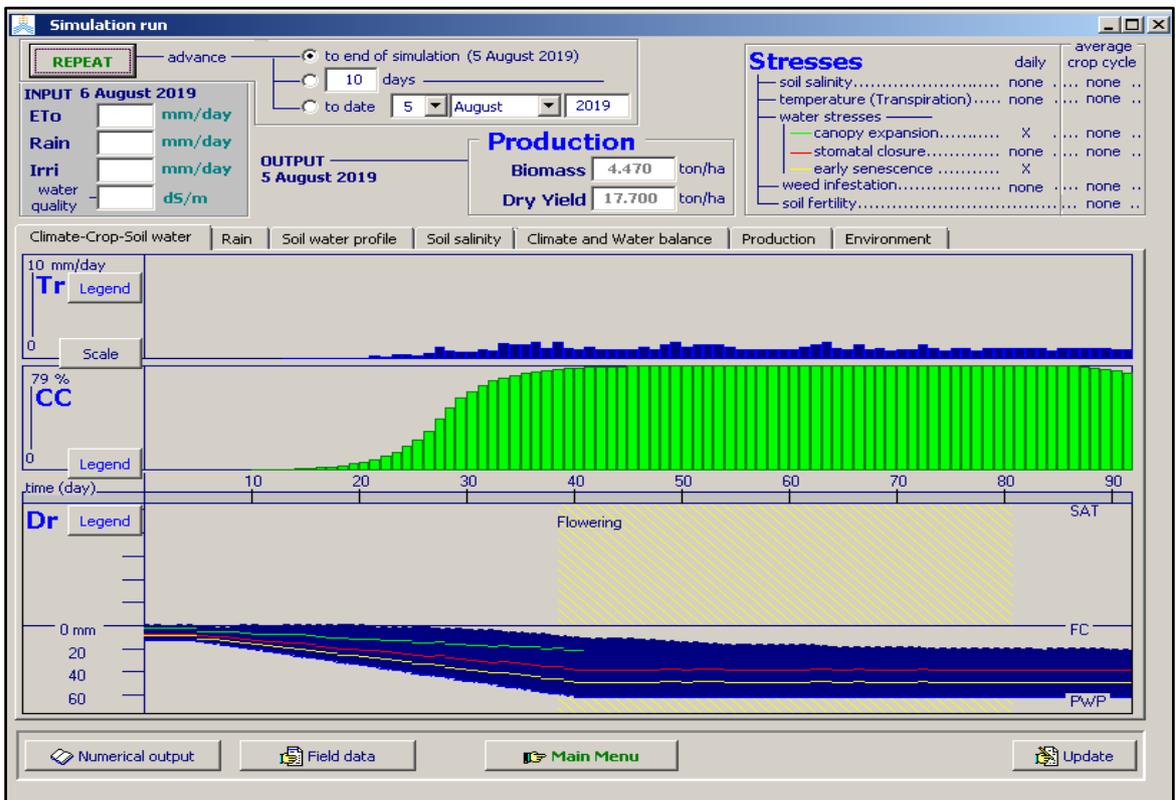


Figura 65: Resultado de la simulación en AQUACROP del tratamiento de riego equivalente al 60% de la Eto.

ANEXO 7: BALANCE HÍDRICO SIMULADO EN AQUACROP

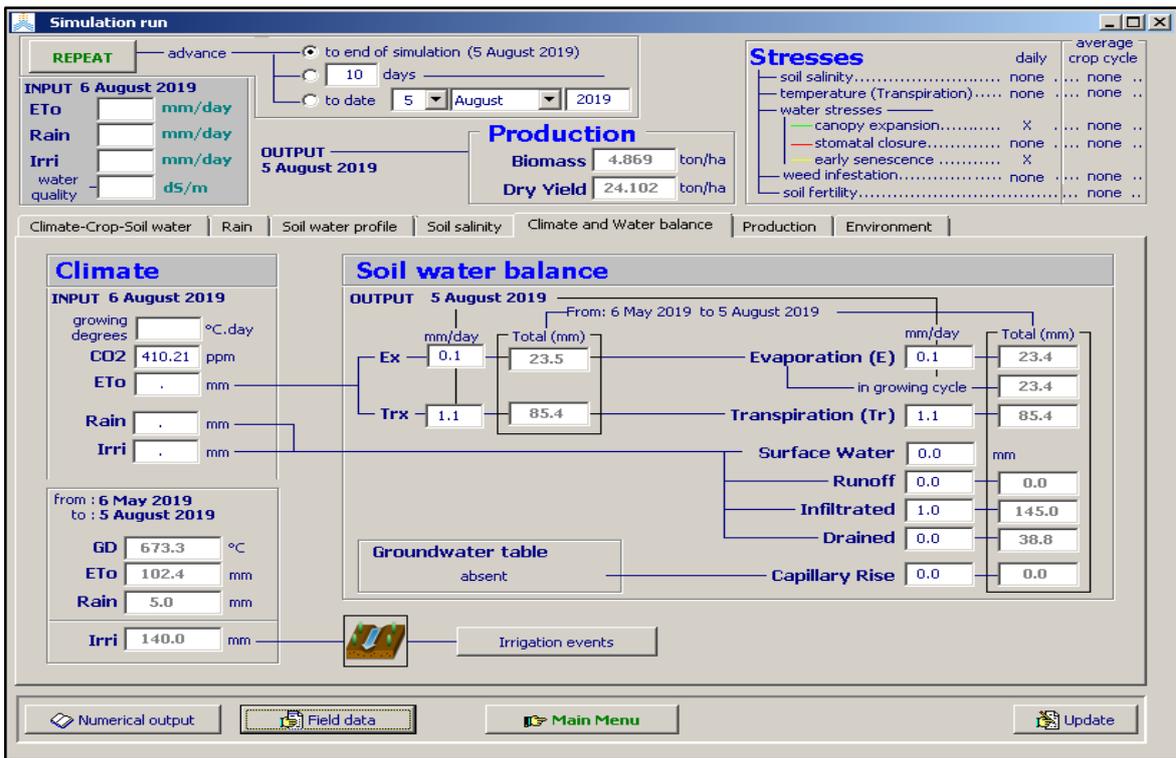


Figura 66: Balance hídrico simulado para el tratamiento de riego equivalente al 120% de la Eto.

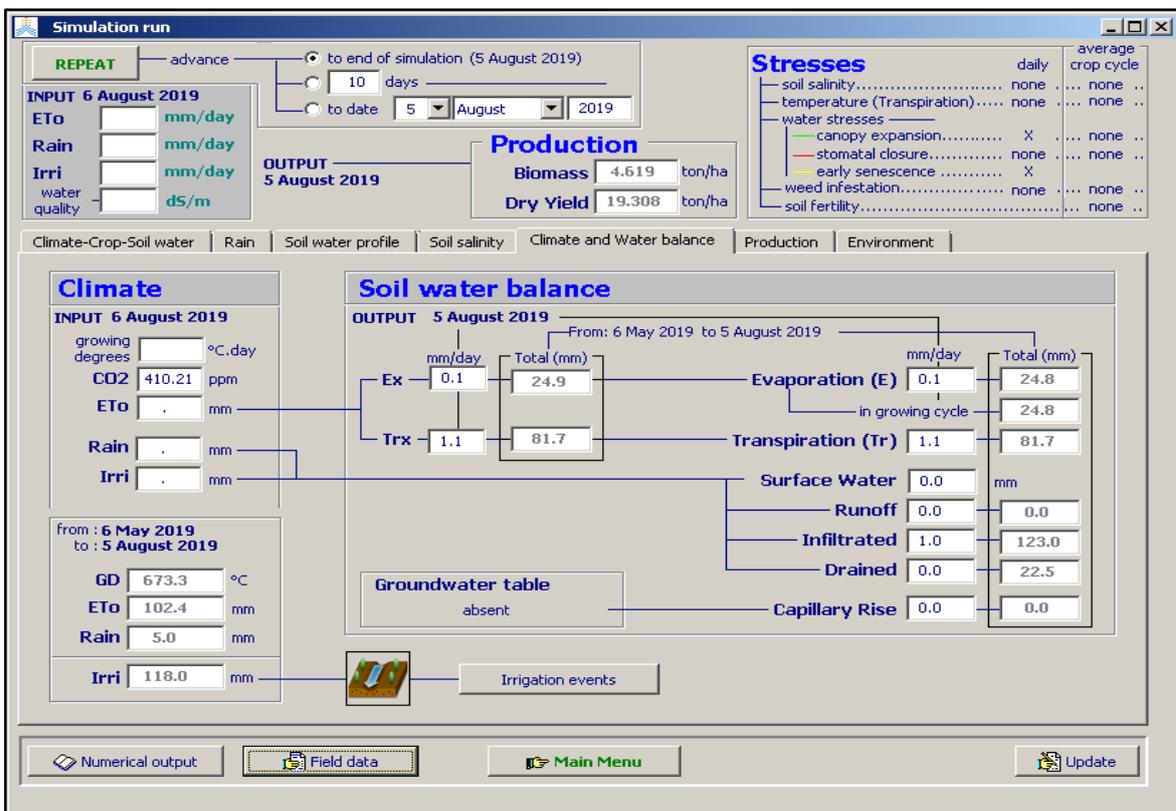


Figura 67: Balance hídrico simulado para el tratamiento de riego equivalente al 100% de la Eto.

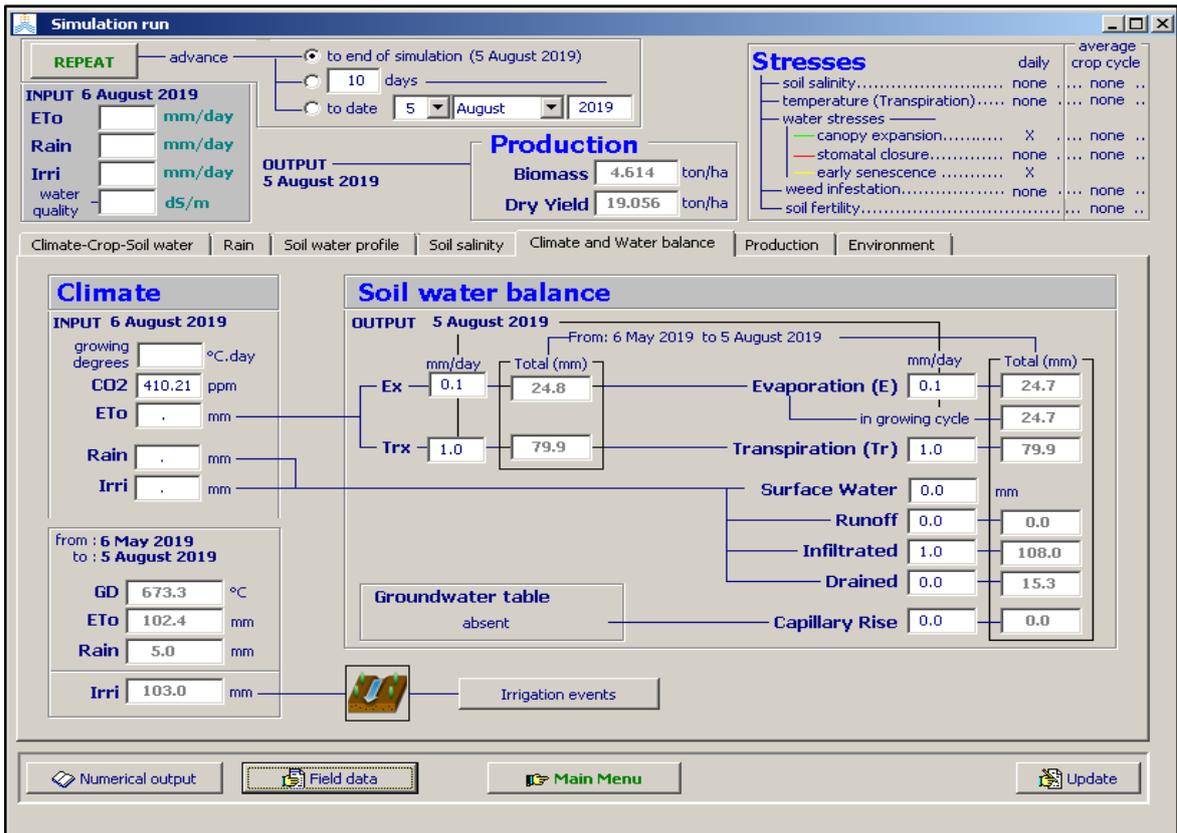


Figura 68: Balance hídrico simulado para el tratamiento de riego equivalente al 80% de la Eto.

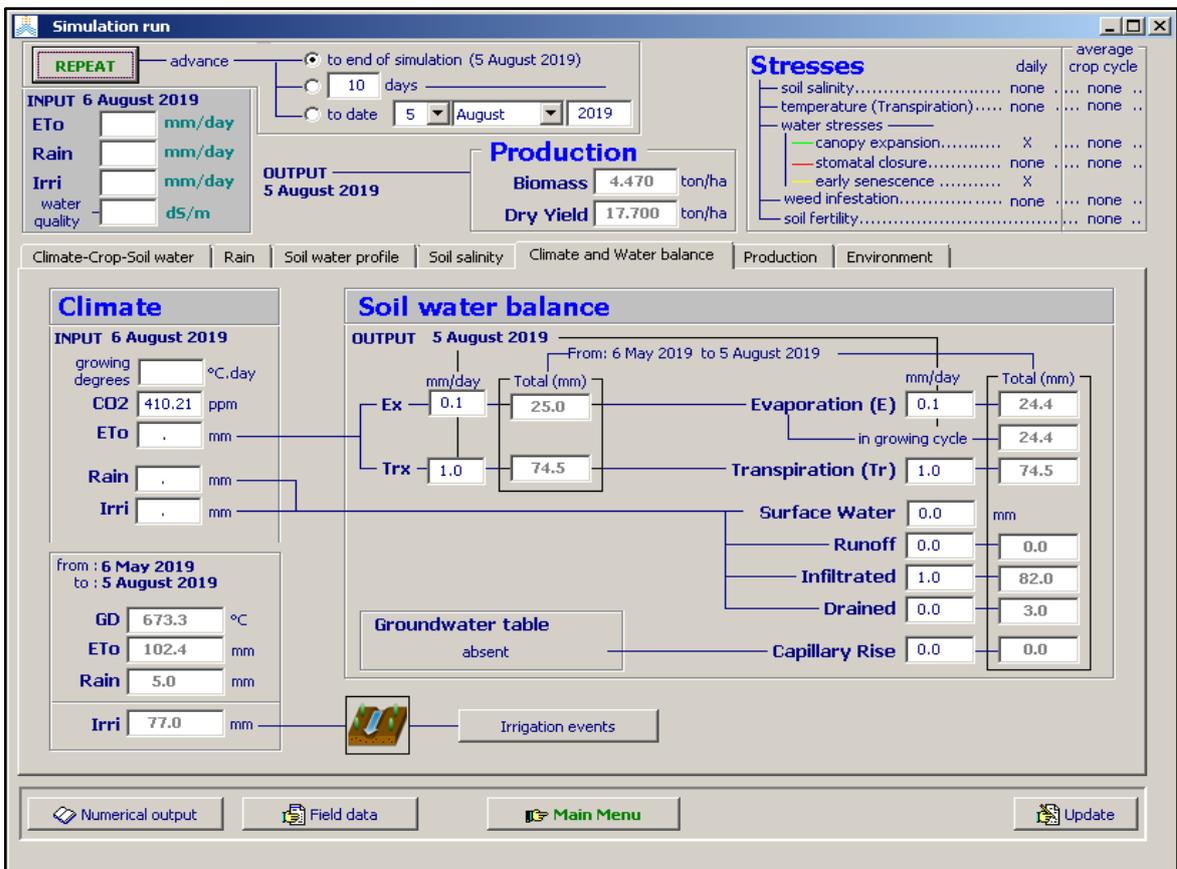


Figura 69: Balance hídrico simulado para el tratamiento de riego equivalente al 60% de la Eto

ANEXO 8: PANEL FOTOGRÁFICO



Figura 70: Preparación del terreno



Figura 71: Siembra del Zapallito italiano



Figura 72: Operación y control del sistema de riego



Figura 73: Monitoreo del cultivo



Figura 74: Planta del Zapallito Italiano