

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA
MOLINA**

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**"EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO DE ARROZ CON
HUMEDAD VARIABLE EMPLEANDO AQUACROP"**

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

PUNG PARDO VICTOR DANIEL

LA MOLINA - PERÚ

2021

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA

**“EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO DE ARROZ CON
HUMEDAD VARIABLE EMPLEANDO AQUACROP”**

TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE:

INGENIERO AGRÍCOLA

Presentado por:

BACH. VICTOR DANIEL PUNG PARDO

Sustentado y aprobado por el siguiente jurado:

Mg. Sc. GUILLERMO CLEMENTE AGUILAR GIRALDO
Presidente

Mg. Sc. MIGUEL ÁNGEL SÁNCHEZ DELGADO
Miembro

Ing. ANTONIO CELESTINO ENCISO GUTIÉRREZ
Miembro

Dra. LIA RAMOS FERNANDEZ
Asesor

Mg. Sc. ZENAIDA ROSSANA PORRAS JORGE
Co-Asesor

LIMA – PERU

2021

DEDICATORIA

A mi madre Lilian Mónica

A mi hermano Gabriel Antonio

A mis abuelos Victor Juan “Tata” y Carmen

A Mayra Maldonado

Por su apoyo y comprensión incondicional

AGRADECIMIENTOS

A Dios por acompañarme en mis momentos más difícil.

Al Proyecto “Uso de sensores remotos para determinar índice de estrés hídrico en el mejoramiento del manejo de riego de arroz (Orayza Sativa) en zonas áridas, para enfrentar al cambio climático”. Convenio N° 008-2016-INIA-PNIA/UPMSI/IE

A mi asesora Dra. Lía Ramos Fernandez, por el apoyo y comprensión en esta investigación y al grupo de investigación DANI “Teledetección y cambio climático aplicado a los recursos hídricos y la agricultura”

A mi Co- asesora y amiga Mg.Sc. Rossana Porras Jorge por su apoyo incondicional y consejos que hasta el día de hoy tengo presente.

A mis jefes y amigos, Mg.Sc. Jhosep Ochoa, Ing. Lilet Gamboa y Miguel Arévalo por su comprensión y apoyo.

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. OBJETIVOS	2
II. MARCO TEORICO.....	3
2.1. EL CULTIVO DE ARROZ.....	3
2.1.1. Estrategias de ahorro de agua en el cultivo de arroz.....	3
2.1.2. Estrés hídrico en el cultivo de arroz.....	4
2.2. EVAPOTRANSPIRACIÓN (ET).....	5
2.2.1. Proceso de evapotranspiración	6
2.2.2. La transpiración del cultivo	6
2.2.3. La evaporación del suelo	6
2.2.4. Modelo de balance de humedad Aquacrop	7
III. METODOLOGIA	9
3.1. ZONA DEL EXPERIMENTO	9
3.1.1. Tratamientos:	11
3.2. HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES	11
3.3. CARACTERIZACIÓN DEL CULTIVO	12
3.4. EVAPOTRANSPIRACION MEDIANTE EL BALANCE DE HUMEDAD UTILIZANDO EL MODELO AQUACROP	17
3.4.1. La evapotranspiración del cultivo	20
a) Evapotranspiración de referencia (ET _o)	20
b) La transpiración del cultivo	21
c) La evaporación del suelo	22
d) Balance de humedad del suelo.....	23

3.4.2.	Análisis estadístico.....	23
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	25
4.1.	CARACTERIZAR EL ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR (IAF), LA COBERTURA DEL DOSEL Y LA CONDUCTANCIA ESTOMÁTICA.....	25
4.1.1.	Índice de área foliar (IAF).....	25
4.1.2.	Cobertura del dosel	25
4.1.3.	Relación de la conductancia estomática y humedad del suelo	26
4.2.	DETERMINACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO MEDIANTE EL BALANCE DE HUMEDAD DEL SUELO.....	30
4.2.1.	Calibración del modelo Aquacrop	30
4.2.2.	Ajuste de la cobertura del dosel.....	38
4.2.3.	Ajuste de la humedad del suelo	39
4.2.4.	Parámetros calibrados en el programa Aquacrop	41
4.3.	EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO ESTIMADO MEDIANTE EL BALANCE DE HUMEDAD DEL SUELO	43
4.3.1.	Evapotranspiración del cultivo para los tratamientos de riego T1 y T2	43
V.	CONCLUSIONES	46
VI.	RECOMENDACIONES.....	47
VII.	BIBLIOGRAFIA.....	48
VIII.	ANEXOS	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Representación de la repartición de la evapotranspiración en evaporación y transpiración durante el crecimiento del cultivo.....	5
Figura 2: Fórmula de transpiración del cultivo según programa AquaCrop.....	6
Figura 3: Fórmula de la evaporación del suelo según AquaCrop.....	7
Figura 4: Esquema de funcionamiento entre los componentes principales del modelo Aquacrop.....	8
Figura 5: Representación del balance de hídrico del suelo en un perfil de suelo.....	8
Figura 6: Ubicación geográfica del AER y parcelas de estudio.....	9
Figura 7: Datos climáticos de temperatura, humedad relativa, precipitación, ETo, heliofanía y velocidad de viento.....	10
Figura 8: Comparación entre el índice del área foliar con la cobertura del dosel y la ecuación que relaciona a ambos parámetros fondo blanco.....	12
Figura 9: Procesamiento de imágenes tomadas en el AER en T1 para calcular la Cobertura del dosel con el software GreenCrop Tracker.....	13
Figura 10: Protocolo para la obtención y procesamiento de la CC% de las imágenes tomadas en el AER.....	14
Figura 11: Comparación de la cobertura del dosel en diferentes fechas para T1 y T2.....	15
Figura 12: Etapas fenológicas del arroz variedad IR-43 en el AER.....	16
Figura 13: Fases fenológicas del cultivo de arroz IR-43, bajo dos condiciones de humedad del suelo T1 y T2.....	18
Figura 14: Raíces medidas de T2 en la etapa de cosecha en el AER.....	19
Figura 15: Raíces medidas de T1 en la etapa de cosecha en el AER.....	19
Figura 16: Diagrama para la obtención de la ETo por método Penman-Monteith en Aquacrop.....	20
Figura 17: Cobertura del dosel durante toda la etapa del cultivo (emergencia, máximo desarrollo foliar, senescencia y maduración).....	22
Figura 18: Índice de área foliar (IAF) estimado a partir de la cobertura del dosel y medido en campo con un ceptómetro bajo condiciones de humedad saturada T1 y no saturada T2.....	25

Figura 19: Cobertura del dosel (%) bajo condiciones de humedad del suelo saturado T1 y no saturado T2.	26
Figura 20: Relación entre conductancia estomática y la humedad del suelo en T2 para 20 cm y 30 cm de profundidad.....	27
Figura 21: Conductancia estomática y humedad del suelo durante el ciclo de secas en la fase de macollamiento del arroz para T2.....	29
Figura 22: Comparación de los resultados de transpiración obtenidos por el programa Aquacrop y calculado en base a las fórmulas.	31
Figura 23: Comparación de la transpiración para T1 y T2 simulados por el programa Aquacrop	32
Figura 24: Comparación de los resultados del coeficiente de transpiración obtenidos por el programa Aquacrop y calculado en base a las fórmulas.	32
Figura 25: Comparación del coeficiente de transpiración para T1 y T2 simulados por el programa Aquacrop.....	33
Figura 26: Gráfica de los valores de la cobertura del dosel (% CC) en comparación con la cobertura del dosel ajustada para efectos microadvectivos (CC*) para T1 y para T2.....	33
Figura 27: Comparación de los resultados de la cobertura del dosel obtenidos por el programa Aquacrop y calculado en base a las fórmulas.	34
Figura 28: Comparación de la cobertura del dosel para T1 y T2 simulados por el programa Aquacrop.	34
Figura 29: Comparación de los resultados de la evaporación del suelo obtenidos por el programa Aquacrop y calculado en base a las fórmulas.	35
Figura 30: Comparación de la evaporación del suelo para T1 y T2 simulados por el programa Aquacrop.	36
Figura 31: Comparación de los resultados de la evapotranspiración del suelo obtenidos por el programa Aquacrop y calculado en base a las fórmulas.	37
Figura 32: Comparación de la evapotranspiración del cultivo para T1 y T2 simulados por el programa Aquacrop.....	37
Figura 33: Cobertura del dosel observado y simulado bajo condiciones de humedad saturada T1 y no saturada T2.....	38
Figura 34: Correlación de la cobertura del dosel observado y simulado bajo condiciones de humedad saturada T1 y no saturada T2.....	39
Figura 35: Humedad del suelo observado y simulado bajo condiciones de humedad saturada T1 y no saturada T2.....	40

Figura 36: Correlación de la humedad del suelo observado y simulado bajo condiciones de humedad saturada T1 y no saturada T2.....	41
Figura 37: Se muestra la evaporación, transpiración y la evapotranspiración simulados para el cultivo de arroz durante toda la etapa fenológica bajo condiciones de humedad a) saturada T1 y b) no saturado T2.	44
Figura 38: Se muestra el coeficiente de cultivo (Kc) simulado para el cultivo de arroz variedad IR-43 bajo condiciones de humedad del suelo saturado T1 y no saturado T2.	44
Figura 39: Análisis de agua realizado en el laboratorio de agua, suelo, medio ambiente y fertirriego de la facultad de ingeniería agrícola de la UNALM.....	55
Figura 40: Análisis de suelo antes de la siembra realizado en el laboratorio de análisis de suelo, plantas, aguas y fertilizantes de la facultad de agronomía de la UNALM.....	56
Figura 41: Análisis de suelo después de la siembra realizado en el laboratorio de análisis de suelo, plantas, aguas y fertilizantes de la facultad de agronomía de la UNALM.....	57
Figura 42: Interfaz del programa Aquacrop dónde se muestra la biomasa, rendimiento transpiración y cobertura del dosel de T1	63
Figura 43: Resultados calibrados de la cobertura del dosel del programa Aquacrop para T1	63
Figura 44: Resultados calibrados de la humedad del suelo del programa Aquacrop para T1.	64
Figura 45: Interfaz del programa Aquacrop dónde se muestra la biomasa, rendimiento transpiración y cobertura del dosel de T2	64
Figura 46: Resultados calibrados de la cobertura del dosel del programa Aquacrop para T2	65
Figura 47: Resultados calibrados de la humedad del suelo del programa Aquacrop para T2.	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Respuestas morfológicas y fisiológicas en el arroz debido al estrés por sequía.....	5
Tabla 2: Herramientas utilizadas en gabinete para el cultivo de arroz IR-43.....	11
Tabla 3: Datos de humedad volumétrica del suelo a 20 cm versus conductancia estomática en T2.....	27
Tabla 4: Parámetros calibrados en el Aquacrop	42
Tabla 5: Tabla de productividad del agua.....	45
Tabla 6: Tabla de análisis de varianza	45
Tabla 7: Datos climáticos ingresados al programa Aquacrop.....	58
Tabla 8: Lámina de riego en mm regadas para T1 y T2.....	62

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: Resultados del análisis de agua reportado por el laboratorio.....	55
ANEXO 2: Resultados del análisis del suelo reportado por el laboratorio	56
ANEXO 3: Datos climáticos durante la campaña evaluada.....	58
ANEXO 4: Lámina de riego para el cultivo de arroz.....	58
ANEXO 5: Resultados de la simulación en el programa Aquacrop.....	63

LISTA DE ABREVIATURAS

Acrónimo:

AER:	Área experimental de riego
CC:	Cobertura de dosel
CCo:	Cobertura del dosel inicial
CC*:	Cobertura del dosel real ajustada para efectos microadvectivos
CCx:	Cobertura del dosel máximo
CGC:	Coefficiente de crecimiento del dosel
cc:	Capacidad de campo
CDC:	Coefficiente de declinación del dosel
E:	Evaporación
ET:	Evapotranspiración
ETC:	Evapotranspiración del cultivo
ETo:	Evapotranspiración de referencia
GDD:	Grados días de crecimiento
HI:	Índice de cosecha
HSA:	Humedecimiento y secado alternado
IAF:	Índice de área foliar
Ks:	Coefficiente de estrés por agua
Kc _{tr} :	Coefficiente de transpiración del cultivo
Ks _{tr} :	Coefficiente de estrés por frío
Kr:	Coefficiente de reducción por evaporación
Ke:	Coefficiente de evaporación del suelo
Ke _x :	Coefficiente máximo de evaporación
PMP:	Punto de marchitez permanente
RWC:	Contenido relativo del agua
SAT:	Saturación del suelo
T:	Transpiración
WP:	Productividad de agua

RESUMEN

La presente investigación, evaluó la evapotranspiración del cultivo mediante el balance de humedad para condiciones del suelo saturado T1 y no saturado T2 en cultivo de arroz variedad IR-43. El tratamiento de suelo saturado (T1) contempló un riego por gravedad y el no saturado (T2) bajo ciclos de secas, las que estuvieron distribuidos en 24 parcelas de 4 x 2,5 m. En el tratamiento no saturado se aplicaron láminas de riego de 10 cm a diferencia de esta las condiciones para el tratamiento no saturado tuvo 8 ciclos de secas durante la etapa fenológica de macollamiento. Para analizar el balance de humedad del suelo se utilizó un modelo de simulación de cultivos (Aquacrop), que se calibro mediante la incorporación de parámetros de clima, cultivo, suelo, riego y manejo. Para el tratamiento saturado se aplicó un volumen de 34928,50 m³. ha⁻¹ y un rendimiento de 8680 kg. ha⁻¹ para 151 días después de siembra (DDS) a diferencia del tratamiento no saturado que tuvo un gasto de 28163,35 m³. ha⁻¹ y rendimiento de 8610 kg. ha⁻¹ con un periodo de 164 días. La evapotranspiración fue mayor en el tratamiento saturado respecto al no saturado. La acumulación de la biomasa fue mayor para T1 con 15550 kg. ha⁻¹ y 16390 kg. ha⁻¹ para T2, mostrando un 5% más de biomasa para T2, demostrando así que la siembra del cultivo bajo condiciones no saturadas es una alternativa de ahorro de agua en el cultivo de arroz.

Palabras claves: Evapotranspiración, balance de humedad, AQUACROP, saturación.

ABSTRACT

The present investigation evaluated the evapotranspiration of the crop by means of the humidity balance for conditions of the soil saturated T1 and unsaturated T2 in rice cultivation variety IR-43. The saturated soil treatment (T1) contemplated a gravity irrigation and the unsaturated one (T2) under dry cycles, which were distributed in 24 plots of 4 x 2,5 m. In the unsaturated treatment, irrigation sheets of 10 cm were applied, unlike this, the conditions for the unsaturated treatment had 8 dry cycles during the phenological stage of tillering. To analyze the soil moisture balance, a crop simulation model (Aquacrop) was used, which was calibrated by incorporating climate, crop, soil, irrigation and management parameters. For the saturated treatment, a volume of 34928,50 m³ was applied. ha⁻¹ and a yield of 8680 kg. ha⁻¹ for 151 days after sowing (DDS) in contrast to the unsaturated treatment that had a flow of 28,163.35 m³. ha⁻¹ and yield of 8610 kg. ha⁻¹ with a period of 164 days. Evapotranspiration was higher in the saturated treatment compared to the unsaturated one. The accumulation of biomass was higher for T1 with 15,550 kg. ha⁻¹ and 16390 kg. ha⁻¹ for T2, showing 5% more biomass for T2, thus demonstrating that planting the crop under unsaturated conditions is a water-saving alternative in rice cultivation.

Keywords: Evapotranspiration, moisture balance, AQUACROP, saturation.

I. INTRODUCCIÓN

La evapotranspiración (ET) es un componente de flujo importante en el balance hídrico en regiones propensas a escasez de agua bajo el contexto a cambio climático (Başğaoğlu, Chakraborty, & Winterle, 2021). La estimación de la ET permite gestionar la asignación del riego en los cultivos de manera oportuna y garantiza la productividad del agua en la agricultura (Anderson, Allen, Morse, & Kustas, 2012). La determinación de la ET se puede obtener a partir del uso de un tanque evaporímetro tipo “A”, lisímetros y otros métodos. Sin embargo, estos métodos requieren una evaluación diaria y el uso de recursos para su monitoreo. Actualmente el modelo Aquacrop es una herramienta que nos permite determinar la evapotranspiración mediante el balance hídrico en el suelo. El modelo agrometeorológico AquaCrop fue desarrollado por la FAO para abordar la seguridad alimentaria, bajo el contexto del cambio climático y tiene como principal objetivo la productividad del agua (WP) basándose en el desarrollo del cultivo en función a la transpiración. Este modelo también realiza el balance de agua en el suelo con la finalidad de estimar la evaporación del suelo y la transpiración del cultivo de forma separada. Permitiendo la gestión y asignación de los recursos hídricos de manera eficiente. Sin embargo, necesita ser calibrado para condiciones locales considerando el clima, suelo, cultivo y manejo de riego.

Por lo anterior, el presente trabajo de investigación tiene por finalidad obtener la evapotranspiración del cultivo (ETC) de arroz empleando el modelo Aquacrop previamente calibrado con información de campo bajo condiciones de humedad del suelo saturado y no saturado.

1.1. OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo de investigación es obtener la evapotranspiración del cultivo de la variedad de arroz IR-43 mediante el programa AQUACROP en la Molina.

El objetivo principal se obtendrá a través de los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar el Índice de Área Foliar (IAF), la cobertura del dosel y la conductancia estomática, para el cultivo de arroz bajo humedad del suelo saturado y no saturado.
- Determinar la evapotranspiración del cultivo en la variedad de arroz IR-43 por medio del balance de humedad del suelo bajo condiciones de humedad del suelo saturado y no saturado en la Molina.

II. MARCO TEORICO

2.1. EL CULTIVO DE ARROZ

El arroz (*Oryza sativa* L.) es un cultivo que requiere una importante cantidad de agua para su desarrollo. En el Perú la variedad IR-43 es muy utilizada por los agricultores en la costa norte, ya que presenta un alto rendimiento (10-12.5 t ha⁻¹) y alta tolerancia al estrés hídrico. Sin embargo, este cultivo utiliza de 12000 m³ a 20000 m³ por hectárea. El seguimiento del crecimiento y el rendimiento de los cultivos durante las etapas de desarrollo es un aspecto esencial del manejo agrícola. A continuación, detallamos las variables con las que se caracterizó el cultivo:

- a) Índice de área foliar (IAF): El índice de área foliar es un buen indicador del estado de la vegetación y un buen predictor de rendimiento (Kaplan *et al.*, 2021). IAF es una cantidad adimensional que caracteriza a las coberturas de las plantas.
- b) Cobertura del dosel: La cobertura del dosel, está definida como la proporción de dosel de los cultivos, es un parámetro importante que permite caracterizar el desarrollo del cultivo, midiendo la densidad de masa de la misma (Parker and Simpson, 2020).
- c) Conductancia estomática: cuando los cultivos ingresan a estrés hídrico los estomas se cierran, lo que limita la transpiración (Tr) y la fotosíntesis en diferentes grados dependiendo del tipo de planta, ciclo de vida y factores ambientales. Por lo tanto, la conductancia estomática se usa a menudo como una variable indirecta para detectar el estado hídrico y el estrés de la planta (Zangani *et al.*, 2021).

2.1.1. Estrategias de ahorro de agua en el cultivo de arroz

El Instituto Internacional de Investigaciones sobre el Arroz (IRRI) es la principal organización de investigación del mundo en el cultivo del arroz, que desarrolla nuevos métodos y tecnologías que permiten a los agricultores administrar sus campos de manera rentable y sostenible.

Actualmente vienen implementando diversas técnicas de ahorro en el cultivo de arroz, siendo uno de ellos la técnica del humedecimiento y secado alternado (HSA), que involucra un manejo de alternancia en el riego considerando el suelo saturado y no saturado.

HSA es una de las técnicas de ahorro en el riego desarrollada por el IRRI. La técnica de programación de riego simple pero eficaz reduce las entradas de agua en la producción de arroz en un 20-25% (Bouman y Tuong, 2001). El agua ahorrada mediante el uso de HSA y variedades modernas de arroz ha permitido a los agricultores reducir el consumo de agua en la producción de arroz en un 30%. Así mismo permite a los agricultores reducir los costos de producción sin penalizar el rendimiento.

2.1.2. Estrés hídrico en el cultivo de arroz

Zaher-Ara, Boroomand, & Sadat-Hosseini (2016) confirman que existen rasgos morfológicos ante el estrés hídrico de la planta, como la disminución del tamaño de la hoja, la cutinización (capa protectora más externa) de la parte superficial de la hoja, menor número de estomas, etc.

El estrés por falta de agua acelera la reducción de la cobertura del dosel, reduce la longevidad con la cantidad de hojas por planta, y por lo tanto reduce la producción de biomasa, según Abullah, Pawar, Kale, & Dingre (2015) la longitud de los brotes se reduce cuando aumenta la duración y la gravedad del estrés hídrico.

Existe también una disminución en el número y tamaño del grano y una fuerte relación entre la alteración de la altura de planta, la biomasa y el área foliar, con la senescencia foliar. Una respuesta al estrés hídrico en la biomasa es la disminución significativa en el peso seco y fresco de la raíz y también en el brote durante la deshidratación (Kadam *et al.*, 2017). Según Wei *et al.* (2017) indican que en la fase reproductiva, los factores importantes para el rendimiento potencial de los granos son el desarrollo de las espiguillas y las panículas, por lo tanto los pequeños cambios inducidos por la falta de agua durante el desarrollo de las panículas pueden afectar severamente en el rendimiento final del cultivo.

Según Fahad *et al.* (2017), el estrés por falta de agua afecta los procesos fisiológicos y por lo tanto altera el crecimiento y la productividad del cultivo. Estos rasgos fisiológicos que influyen en las relaciones hídricas de las plantas son el contenido relativo de agua (RWC), la resistencia de los estomas, el potencial hídrico de las hojas, la tasa de transpiración y las temperaturas de las hojas.

En el inicio del desarrollo foliar de las hojas de la planta de arroz se observa un RWC alto y disminuye a medida que se acumula la materia seca. Cuando la planta de arroz se estresa por falta de agua tiene un RWC más bajo que las que no están estresadas, también presentan una

disminución de la transpiración y en el potencial hídrico de las hojas. En la Tabla 1 se observa un resumen de las respuestas fisiológicas y morfológicas al estrés hídrico en arroz.

Tabla 1: Respuestas morfológicas y fisiológicas en el arroz (*Oryza sativa* L.) debido al estrés por sequía.

Respuestas fisiológicas	Respuestas morfológicas
Pérdida de turgencia y ajuste osmótico. Disminución transitoria de la eficiencia fotoquímica. Potencial hídrico y foliar reducido Disminución de la conductancia osmótica al CO. CO interno reducido, disminución de la fotosíntesis neta. Tasa de crecimiento y rendimiento de cultivos reducidos.	Reducción de profundidad, distribución, número y longitud de las primeras raíces. Rollo de hojas, rizado, reducción del área foliar y marchitamiento. Disminución de la biomasa vegetal e inhibición del crecimiento. Reducción de la floración que conduce a la disminución del rendimiento de los cultivos.

FUENTE: Upadhyaya & Kumar P. (2019)

2.2. EVAPOTRANSPIRACIÓN (ET)

El concepto de evapotranspiración incluye a la evapotranspiración del cultivo (ETC), de referencia (ETo) y un coeficiente del cultivo (Kc). La evapotranspiración del cultivo permite reponer las necesidades de agua en el cultivo que pierde por evaporación y transpiración. En la Figura 1 se observa el comportamiento de la evaporación y transpiración en un intervalo de tiempo.

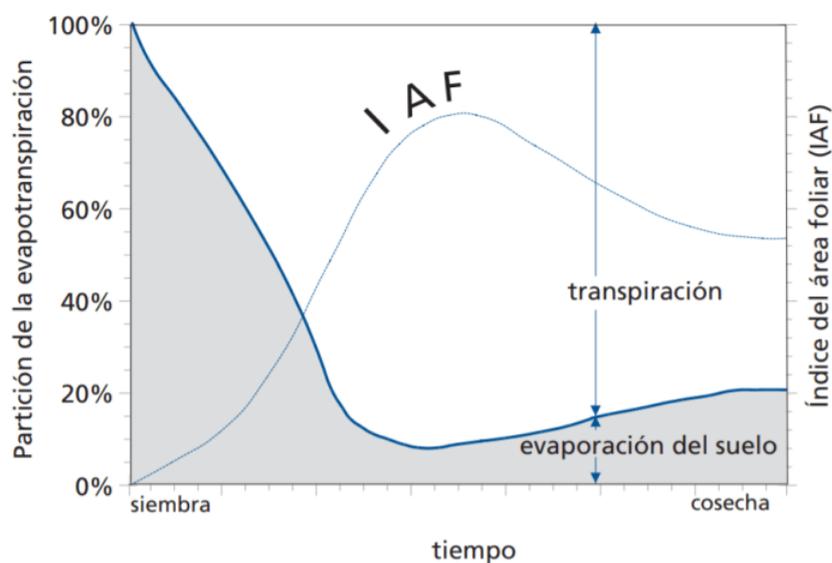


Figura 1: Representación de la repartición de la evapotranspiración en evaporación y transpiración durante el crecimiento del cultivo.

FUENTE: Allen *et al.* (2006)

2.2.1. Proceso de evapotranspiración

Se conoce como evapotranspiración (ET) la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración del cultivo.

2.2.2. La transpiración del cultivo

Según Vargas, Beltramo, Racines, & Motta (2010), la transpiración es el agua que se pierde en forma de vapor en la superficie de la planta. Este fenómeno se da en los estomas de las hojas y también por la cutícula foliar y la de otros tejidos. En la Figura 2 se observa todas las variables que Aquacrop considera para determinar la transpiración.

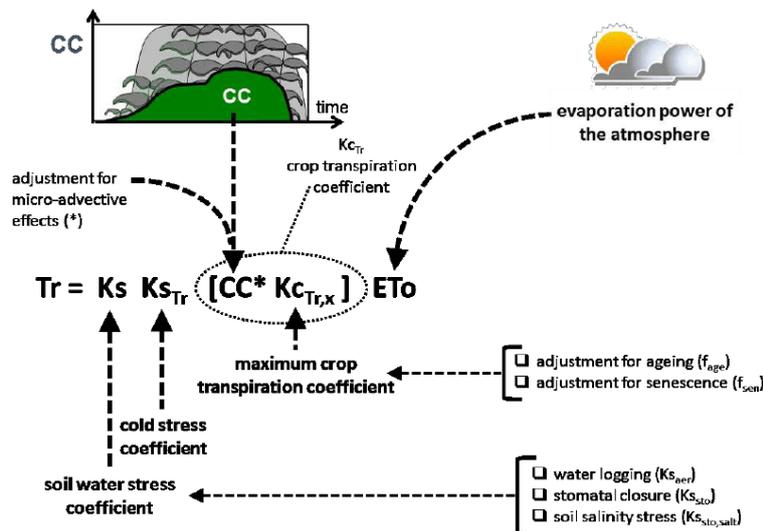


Figura 2: Fórmula de transpiración del cultivo según programa AquaCrop.

FUENTE: Raes *et al.*, (2018)

2.2.3. La evaporación del suelo

Según Allen *et al.* (2006) el proceso por el cual el agua líquida se transforma en vapor de agua y se retira de la superficie evaporante se llama evaporación. La radiación, la velocidad de viento, la temperatura del aire y la humedad atmosférica son datos climatológicos que se consideran al evaluar el proceso de la evaporación según (Raes *et al.*, 2018). En la Figura 3 se observa todas las variables que Aquacrop considera para determinar la evaporación.

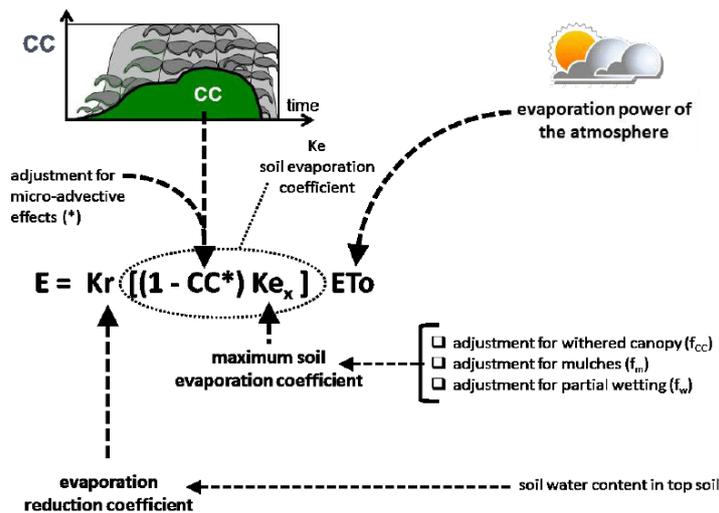


Figura 3: Fórmula de la evaporación del suelo según AquaCrop

FUENTE: Raes *et al.*, (2018)

Según Allen *et al.* (2006), la evaporación y transpiración son fenómenos que ocurren simultáneamente. Aquacrop divide la ET en la suma de la transpiración y la evaporación con respecto al área foliar por unidad de superficie de suelo debajo de él, en momento de la siembra o del trasplante la evaporación es casi un 100% de la ET. Actualmente el modelo Aquacrop viene siendo utilizado para poder estimar la evapotranspiración en los cultivos mediante la metodología del balance de humedad del suelo.

2.2.4. Modelo de balance de humedad Aquacrop

Aquacrop es un modelo agronómico para la producción de cultivos y la optimización de las necesidades de agua de riego, que ha sido desarrollado por la División de Tierras y Aguas de FAO. La cobertura del dosel (CC), la biomasa (B) y los rendimientos (Y) de un cultivo son las principales variables del modelo que se calculan en función de la productividad del agua (WP), es decir la biomasa producida por unidad de agua transpirada.

El modelo Aquacrop relaciona el desarrollo del cultivo como se observa en la Figura 4, con su transpiración a través de la cobertura del dosel, que luego relaciona con la productividad de biomasa a través de un coeficiente de productividad de agua (WP), y finalmente, la producción de biomasa se relaciona con el rendimiento a través de un índice de cosecha (HI) (Corbari *et al.*, 2021). Cuando el contenido de humedad del suelo se reduce, esta genera estrés hídrico en el cultivo, el cual afecta a la expansión de las hojas, la cobertura del dosel del cultivo, el cierre y apertura de estomas, la profundidad del sistema radicular, el índice de cosecha y la productividad del agua (Steduto *et al.*, 2012).

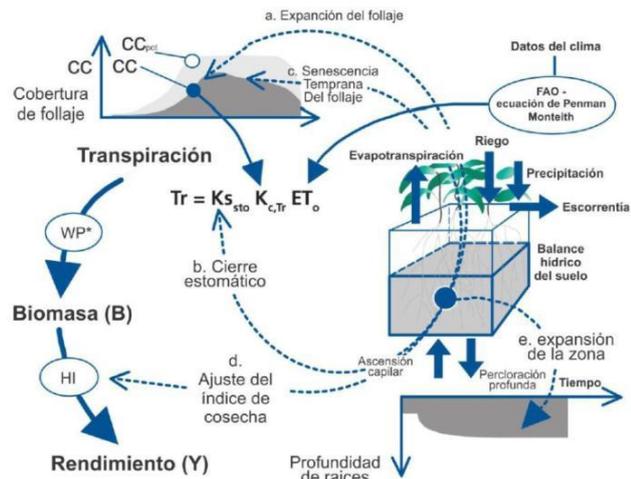


Figura 4: Esquema de funcionamiento entre los componentes principales del modelo Aquacrop.

FUENTE: Steduto *et al.*, (2012)

De acuerdo a lo anterior descrito, el programa utiliza los componentes ya mencionados para finalmente obtener el balance de humedad del suelo. La evapotranspiración del cultivo (ETC) involucra el balance de humedad en el suelo, y esta se relaciona por la lluvia (P), irrigación (I), con las pérdidas por evapotranspiración (ET), escorrentía (RO), drenaje (D) y el cambio en el contenido de humedad del suelo aprovechable (Wr) (Flores & Ruiz, 1998). Como se observa en la Figura 5.

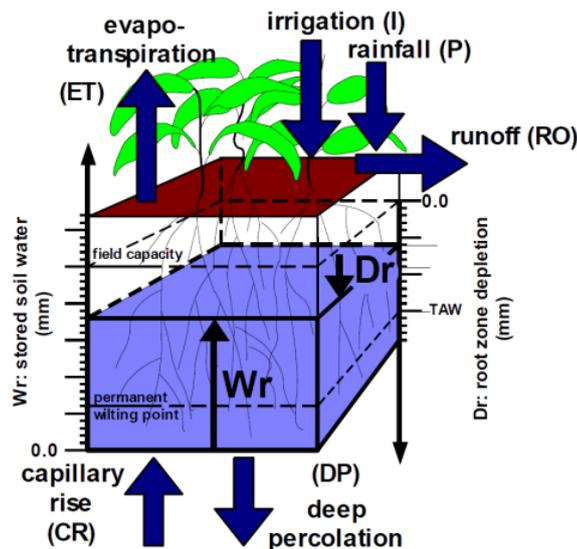


Figura 5: Representación del balance de hídrico del suelo en un perfil de suelo

FUENTE: Raes *et al.*, (2018)

III. METODOLOGIA

3.1. ZONA DEL EXPERIMENTO

El proyecto se desarrolla en el “Área Experimental de Riego AER”, dentro del campus de la Universidad Nacional Agraria la Molina, en el distrito de La Molina, Provincia de Lima, Región Lima, con coordenadas geográficas de Longitud: $12^{\circ} 04' 50''$, Latitud: $76^{\circ} 57' 06.5''$ y Altitud: 233 m.s.n.m.; en la Figura 6 se presenta la distribución y ubicación del AER con 24 parcelas de 4 x 2,5 m (10 m^2). La zona de estudio es árida según la clasificación climática de Warren Thornthwaitees, registrando para la campaña de estudio promedios de Humedad Relativa de 78,63%, velocidad del viento 0,71 m/s y temperatura $23,62^{\circ} \text{C}$, con una precipitación total de 0,01 mm.

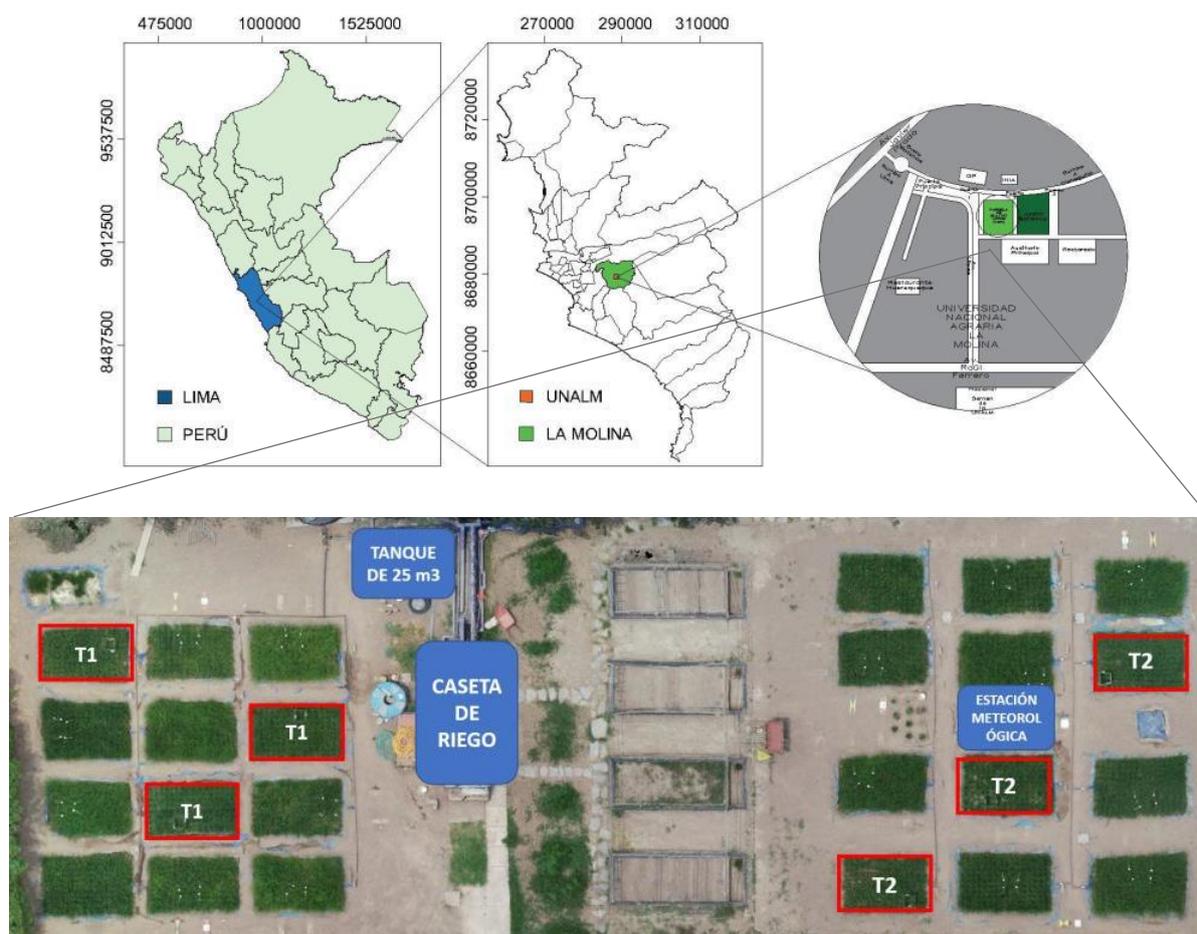


Figura 6: Ubicación geográfica del AER y parcelas de estudio

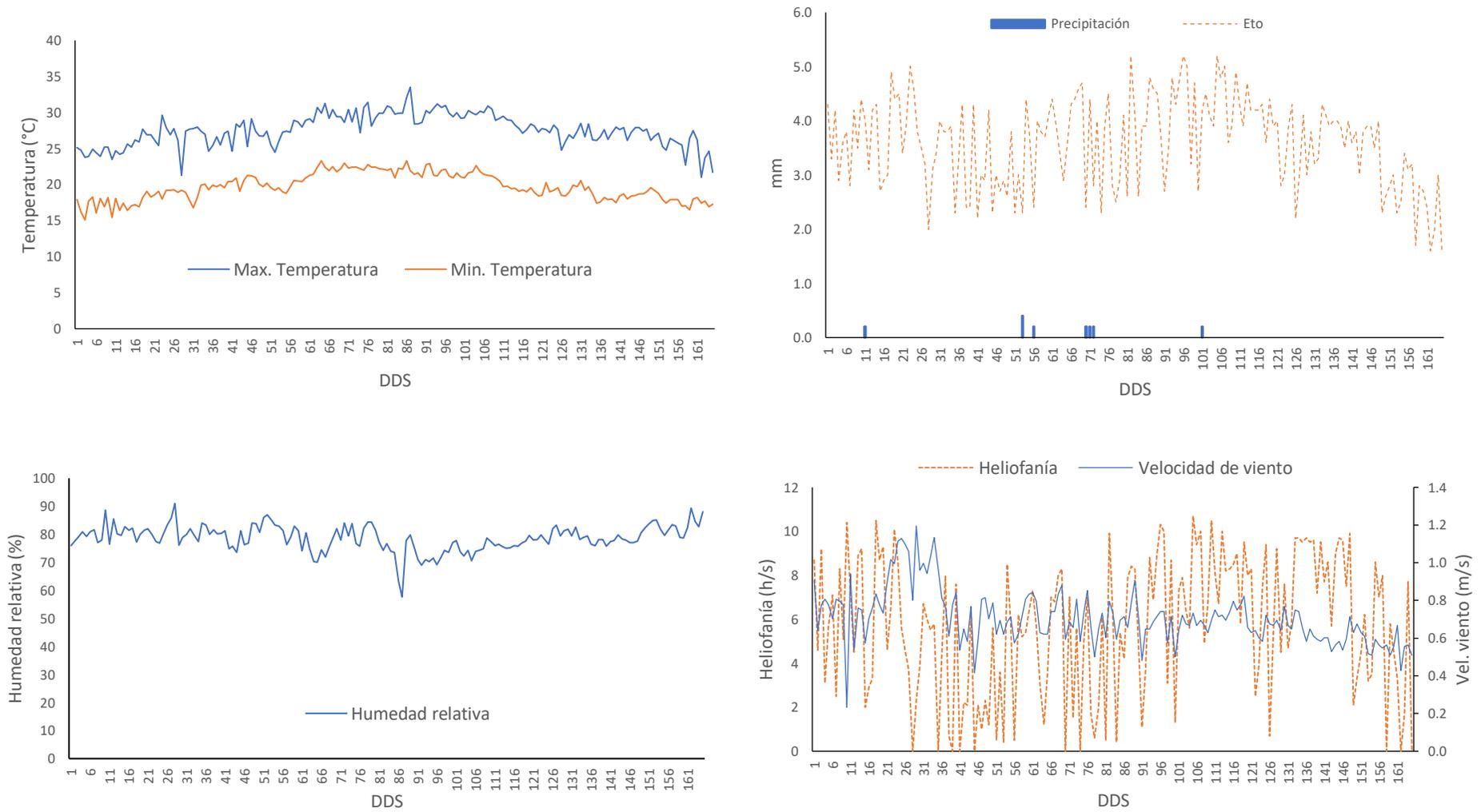


Figura 7: Datos climáticos de temperatura, humedad relativa, precipitación, ETo, heliofania y velocidad de viento

FUENTE: Elaborado con información del AER (Estación Davis-modelo Vantage PRO 2)

3.1.1. Tratamientos:

La investigación tuvo dos tratamientos en base a la aplicación de riego.

T1: Tratamiento con humedad del suelo saturado comenzó en la fecha del 27/11/2018 hasta 27/04/2019, se contaba con una red de tuberías y la operación fue mediante llaves que conecta con un tanque de 25 m³, que disponía de un medidor que ayudaba a calcular el volumen de agua utilizado por diferencia en altura y tiempo de riego. Después de 34 días (DDS) se inició el T1 el cual consistió en mantener una lámina de 0 cm a 10 cm.

T2: Tratamiento con humedad del suelo no saturado comenzó el 27/11/2018 hasta 10/05/2019, el agua utilizado para este tratamiento fue de un reservorio de 12 m³ que era succionada por una bomba “Salmson” de 1,5 HP (60Kw) con un caudal de 6 m³. h⁻¹, luego pasaba por filtros y un caudalímetro y finalmente a la red de tubería principal hacia cada parcela. El caudal de salida en las parcelas fue de 1,45 l. s⁻¹. El tiempo que duró el tratamiento fue desde los 34 DDS hasta los 99 DDS, el suelo alcanzó unas tensiones de -35 Kpa a -20 Kpa, y luego de los 99 DDS la humedad del suelo fue continua hasta el corte de agua que dio inicio a la cosecha (Frisancho, 2020).

3.2. HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES

En la Tabla 2, se detalla las herramientas computacionales utilizadas para la investigación, los cuales ayudaron para la recepción de datos, estimación, procesamiento y generación de gráficos de información de entrada para llevar a cabo el modelo agrometeorológico en el cultivo de arroz en la UNALM.

Tabla 2: Herramientas utilizadas en gabinete para el cultivo de arroz IR-43

Herramientas computacionales	Descripción
Aquacrop 6.1	Para la realización del modelo generado en base a los datos de la campaña 2018/2019
Green Crop Tracker	Se utilizó para estimar la cobertura del canopy
Matlab	Para generar gráficas
Soil Water characteristics	Para estimar los parámetros del suelo
AutoCAD	Para graficar a escala algunas figuras
Tabla de cálculo	Para procesar los datos y analizar resultados

3.3. CARACTERIZACIÓN DEL CULTIVO

Se recopiló información de campo referida a la variedad del cultivo de arroz (IR-43) en la campaña agrícola, que comenzó el 27/11/2018 y terminó el 10/05/2019.

a) Índice del área foliar

Se realizó la correlación del índice del área foliar (IAF) estimado mediante el programa GreenCrop Tracker con los datos registrado del ceptómetro modelo LP-80 AccuPAR PAR/LAI, tomado en campo, obteniendo buenos resultados en la correlación de los dos métodos.

Para la medición del IAF, se considera la división de la superficie total de hojas por unidad de la superficie del suelo como se puede observar en la Figura 8.

$$IAF = \frac{\text{Superficie total de hojas}}{\text{Unidad de superficie de suelo}} \quad \text{Ecuación 1}$$

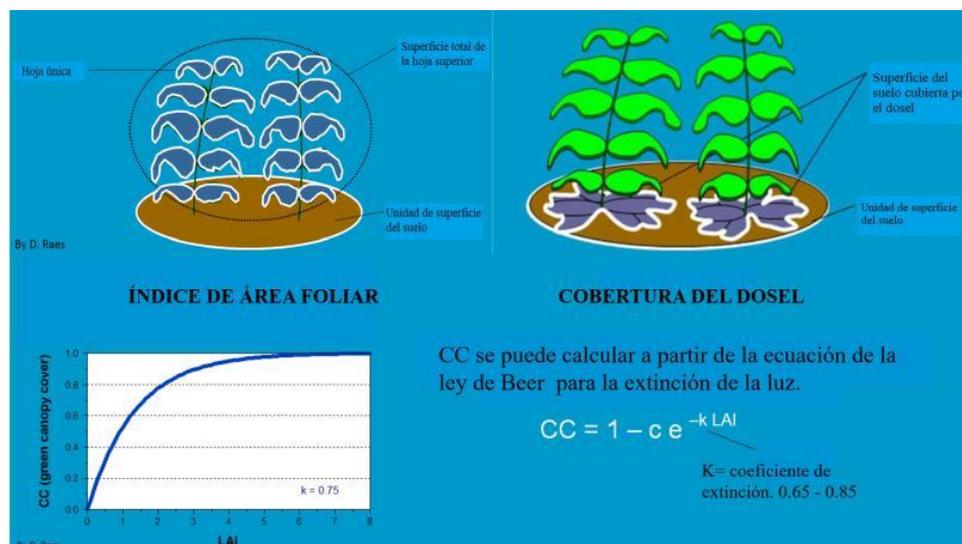


Figura 8: Comparación entre el índice del área foliar con la cobertura del dosel y la ecuación que relaciona a ambos parámetros fondo blanco

FUENTE: Raes *et al*, (2018)

b) Cobertura del dosel (CC)

Para determinar la cobertura del dosel del cultivo de arroz se utilizó el programa GreenCrop Tracker, que es un software muy práctico y sencillo con muy buenos resultados

y es una alternativa viable a los métodos terrestres. Según Karakus & Karabork (2017) el software GreenCrop Tracker deriva automáticamente las estimaciones de la cobertura del dosel como se observa en la Figura 9, utilizando un umbral que se basa en métodos de histogramas para estimar la cobertura del dosel del cultivo.

La medición de la cobertura del dosel fue capturada en 6 etapas fenológicas en 12 evaluaciones para T1 y 14 evaluaciones para T2. La muestra fue de 3 plantas representativas para cada evaluación la cual se tomaron en forma aleatorias en la parcela del AER. Las imágenes fueron capturadas a los 24-31-41-49-56-63-70-85-98-105-116-137-144 DDS para T1 y 24-34-36-41-49-56-63-70-85-98-105-116-137-144 DDS para T2 con una cámara fotográfica de forma horizontal a una altura de 1.20 m del suelo, como se puede observar en la Figura 9.

$$CC = \frac{\text{Superficie del suelo cubierta por el dosel vegetal verde}}{\text{Unidad de superficie del suelo}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Para obtener la cobertura del dosel, se tiene una relación entre la superficie del suelo cubierta por el dosel sobre la unidad de superficie del suelo.

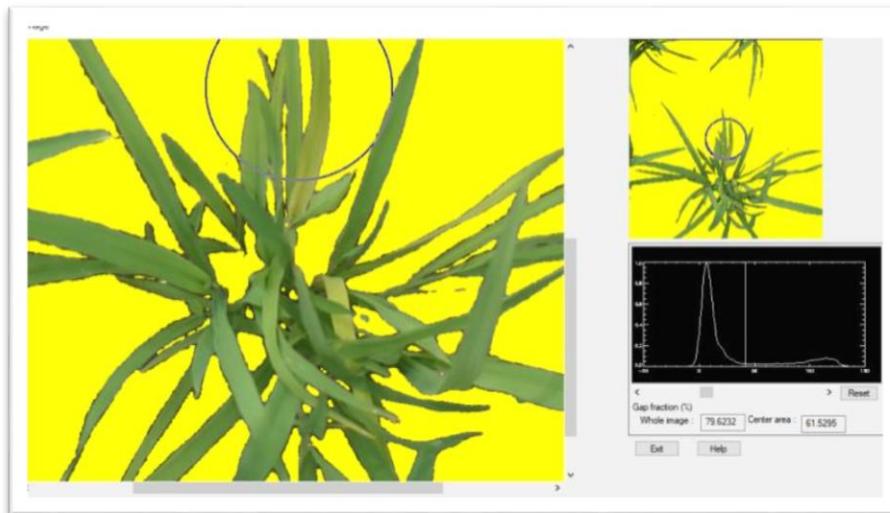


Figura 9: Procesamiento de imágenes tomadas en el AER en T1 para calcular la Cobertura del dosel con el software GreenCrop Tracker.

En la Figura 10 se puede observar los protocolos utilizados para la recolección correcta de las imágenes y su procesamiento para la obtención de la cobertura del dosel.

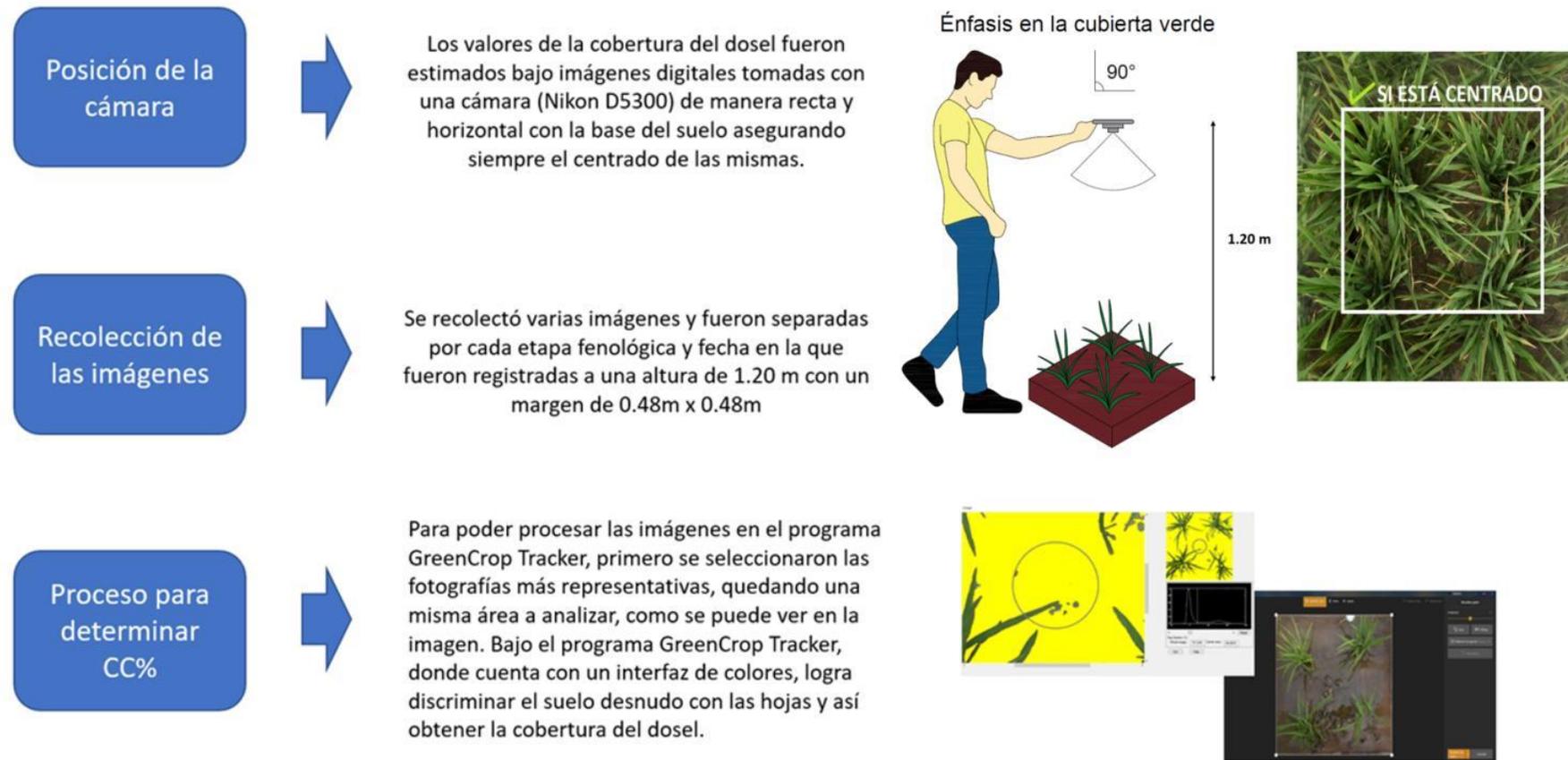


Figura 10: Protocolo para la obtención y procesamiento de la CC% de las imágenes tomadas en el AER.

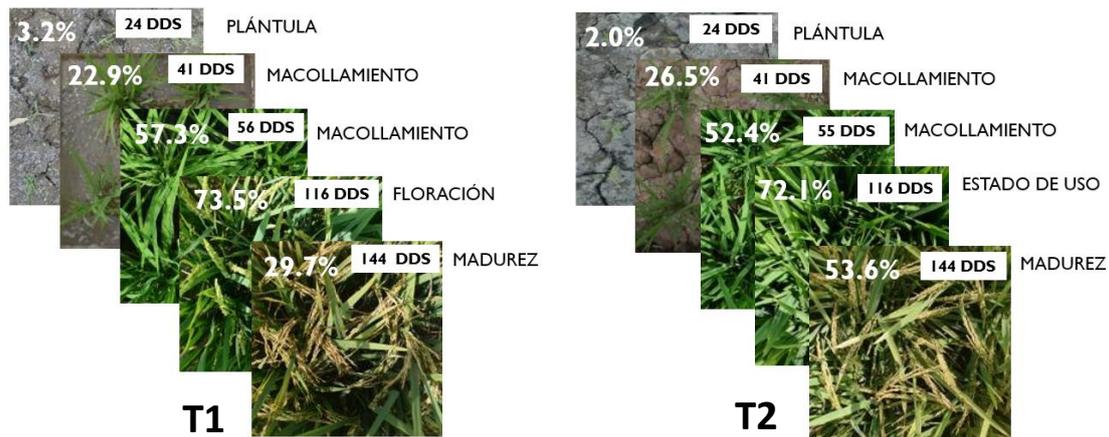


Figura 11: Comparación de la cobertura del dosel en diferentes fechas para T1 y T2

En la Figura 11 se tiene una recopilación de imágenes tomadas en diferentes fechas el cual han sido ya procesadas en el programa GreenCrop Tracker obteniendo la cobertura del dosel (%) para T1 y T2.

Según Dell'Amico & Morales, (2017) para hacer frente a la escasez de agua las plantas cuentan con una estrategia que conlleva un conjunto complejo de rasgos relacionados con el agua y el carbono, donde estos rasgos muestran fuertes interacciones que son relevantes a diferentes niveles de organizaciones y escalas de tiempo. A la escala corta de tiempo y a nivel de tejidos y órganos entre los procesos involucrados se incluye el comportamiento estomático. Para poder soportar el estrés hídrico, las plantas cierran sus estomas para garantizar la turgencia y mantener el metabolismo celular. En medida que estos se cierran, genera una reducción de la tasa fotosintética, entonces las plantas deben de ajustar de forma regular su conductancia estomática para permitir la entrada de CO_2 y evitar pérdidas de agua innecesarias durante el estrés.

Según San Miguel-Chávez *et al.* (1999) nos dice que la conductancia estomática en la transferencia de CO_2 y vapor de agua entre el mesófilo y la atmósfera, es importante en los estudios que evalúan la producción de biomasa, porque a través de los estomas es por donde ingresa el carbono necesario para sintetizar diversas moléculas.

									
EMERGENCIA	PLÁNTULA	MACOLLAMIENTO	PRIMORDIO FLORAL	ESTADO DE USO	FLORACIÓN	GRANO LECHOSO	GRANO PASTOSO	GRANO CEROSO	MADUREZ FISIOLÓGICA



TRATAMIENTO UNO



TRATAMIENTO DOS

Figura 12: Etapas fenológicas del arroz variedad IR-43 en el AER

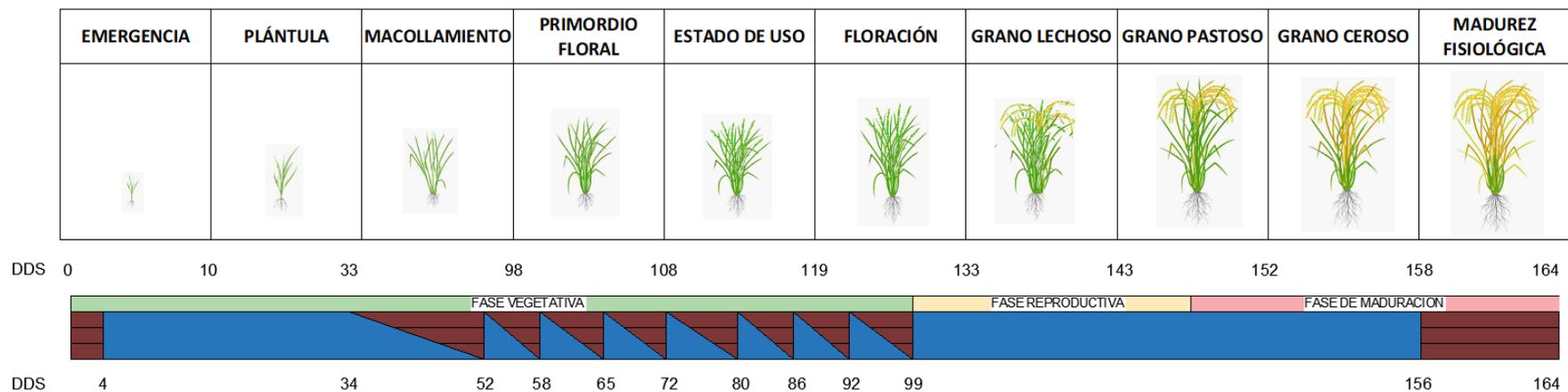
FUENTE: Área Experimental de Riego.

3.4. EVAPOTRASPIRACION MEDIANTE EL BALANCE DE HUMEDAD UTILIZANDO EL MODELO AQUACROP

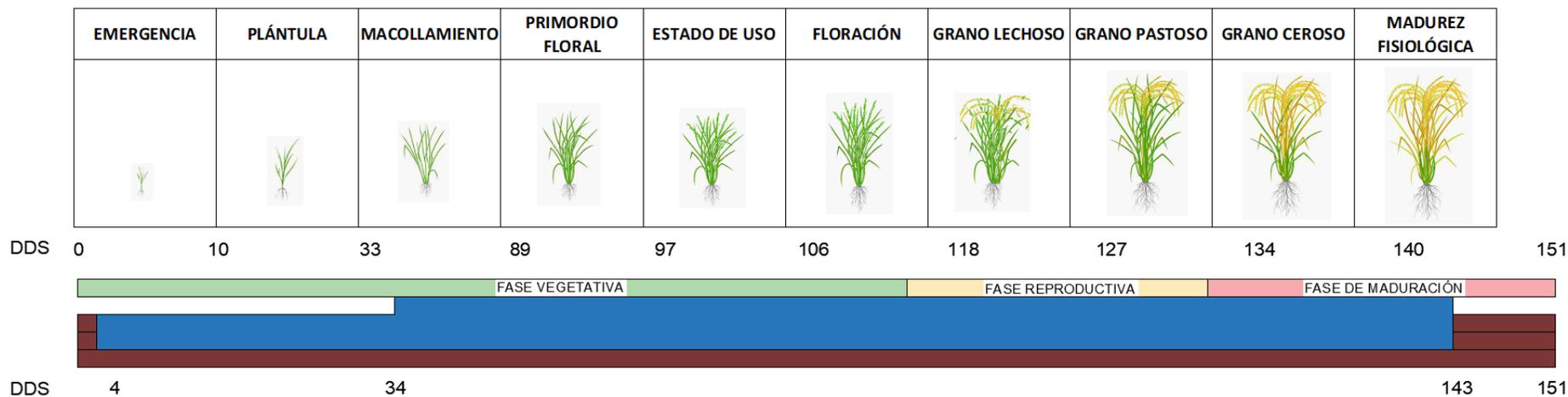
El modelo AquaCrop para poder cuantificar el balance de humedad del suelo y estimar la evapotranspiración del cultivo, tiene que estar previamente calibrado con datos recopilados en las parcelas experimentales considerando cuatro módulos principales, estos son: clima, suelo, cultivo y prácticas de manejo. La FAO calibró el modelo para diferente cultivo a nivel mundial, siendo los parámetros conservativos los que sirven como punto de partida en la calibración del modelo Aquacrop, los procedimientos a seguir están explicados en el manual de la FAO.

Datos para la calibración del modelo

- a) Cultivo: La variedad fue IR-43 teniendo un desarrollo desde el 27/11/2018 hasta 27/04/2019 para T1 y del 27/11/2018 hasta 10/05/2019 para T2, se evidenció diez estados fenológicos de la planta los cuales fueron: emergencia, plántula, macollamiento, primordio floral, estado de uso, floración, grano lechoso, grano pastoso, grano ceroso y madurez fisiológica y tuvo una duración de 151 DDS para T1 y 164 DDS para T2. Se colectó información referida a la duración de los estados fenológicos con fotografías del desarrollo del cultivo, profundidad de la raíz, biomasa y rendimiento.
La densidad de siembra para esta investigación fue de 16000 plantas/ha con una distribución de 25 cm x 25 cm entre filas y entre plantas respectivamente. Esta densidad varía a la de la campaña 2018 que fue de 20000 plantas/ha con una distribución de 20 cm x 20 cm (Porrás *et al.*, 2020).
- b) Clima: Se colectó información diaria para la temperatura máxima y mínima (°C), la precipitación (mm), velocidad del viento (m/s), humedad relativa (%) y heliofanía (h/s) donde la información fue obtenida por la estación meteorológica que se ubicó en medio de la parcela de riego del AER, la evapotranspiración de referencia (ET_o), que se estimó bajo el método de Penman Monteith.
- c) Suelo: Los parámetros físicos del suelo para esta investigación fueron: Suelo de textura franco arenoso a los 40 cm, con capacidad de campo (cc) 22%, punto de marchitez permanente (PMP) 12% y saturación del suelo (SAT) 41% para el suelo franco arenoso.
- d) Manejo de campo y aplicaciones de la lámina de riego: El riego fue por gravedad, diferenciando dos tratamientos de riego, para T1 con humedad del suelo a saturación permanente y T2 con humedad del suelo no saturada. Las malezas fueron controladas manualmente una vez por semana



TRATAMIENTO 2



TRATAMIENTO 1

Figura 13: Fases fenológicas del cultivo de arroz IR-43, bajo dos condiciones de humedad del suelo T1 y T2

e) Profundidad de enraizamiento

La profundidad de raíces es un dato de entrada clave para poder realizar la simulación en el programa, según Raes *et al.* (2018) nos dice que la profundidad de enraizamiento efectiva está definida como la profundidad del suelo donde las raíces se proliferan adecuadamente para extraer la mayor parte de la demanda de agua que necesita el cultivo. Para la calibración del modelo se midieron 9 plantas representativas en la fase de maduración, los cuales se obtuvo un promedio de 25 cm para T2 y 35,7 cm para T1. En la Figura 14 y Figura 15 se detalla las plantas muestreadas.



Figura 14: Raíces medidas de T2 en la etapa de cosecha en el AER



Figura 15: Raíces medidas de T1 en la etapa de cosecha en el AER

3.4.1. La evapotranspiración del cultivo

La evapotranspiración del cultivo (mm) se calcula mediante la suma de la evaporación (mm) y la transpiración (mm) en relación de la cobertura del canopy (%) que se desarrolló en toda la etapa fenológica del cultivo.

a) Evapotranspiración de referencia (ET_o)

La evapotranspiración de referencia (ET_o) se calculó mediante la fórmula de Penman-Monteith empleando la herramienta Aquacrop (módulo clima). En la Figura 16, se esquematiza el procedimiento que se siguió para la estimación de la ET_o, a partir de datos climáticos como la temperatura (°C), humedad atmosférica (%), velocidad de viento (m/s) y heliofanía.

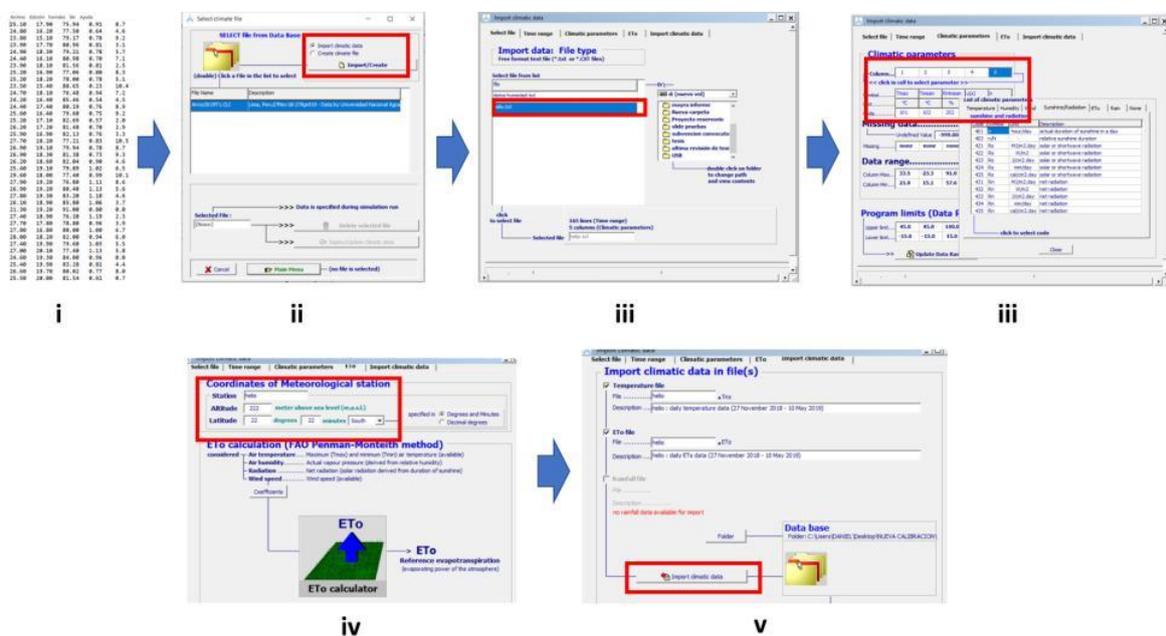


Figura 16: Diagrama para la obtención de la ET_o por método Penman-Monteith en Aquacrop

Para hallar la ET_o por el método Penman-Monteith en Aquacrop, se recolecta la información requerida en un blog de notas (i) (Temperatura máxima y mínima, humedad, velocidad de viento y heliofanía), (ii) luego importar los datos (Import climatic data) e Import/ Create, (iii) seleccionar el archivo con los inputs del primer paso, (iv) colocar la ubicación geográfica y finalmente, (v) importar datos climáticos. Los archivos se reciben en un blog de notas y son datos diarios de acuerdo a los días de los datos de entrada.

b) La transpiración del cultivo

Raes *et al.* (2018) determina la transpiración a partir de la siguiente fórmula.

$$Tr = (Ks.Ks_{tr}Kc_{tr}).ETo \quad \text{Ecuación 3}$$

Dónde: Tr (mm) es igual a la multiplicación de la ETo (mm/día), por el coeficiente de transpiración del cultivo Kc_{tr} , con el coeficiente de estrés por agua Ks y con el coeficiente del estrés por frío Ks_{tr} . También menciona que la ETo es la evapotranspiración de referencia la cual se mide en una superficie de pasto dónde no hace falta el agua y calcula el poder de evaporación de la atmósfera.

Para obtener el valor del coeficiente de transpiración Kc_{Tr} es necesario multiplicar un $Kc_{Tr,x}$ que es el coeficiente máximo de transpiración, el cual se considera como valor conservativo igual a 1,1 según Raes *et al.* (2018), con la cobertura del dosel CC^* .

$$Kc_{Tr} = CC^*Kc_{Tr,x} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde CC^* es la cobertura del dosel real ajustada para efectos microadvectivos y se obtiene mediante la siguiente formula:

$$CC^* = 1.72CC - CC^2 + 0.30CC^3 \quad \text{Ecuación 5}$$

El desarrollo de la cobertura del dosel durante el crecimiento del cultivo sigue el siguiente comportamiento, según se detalla en la Figura 17.

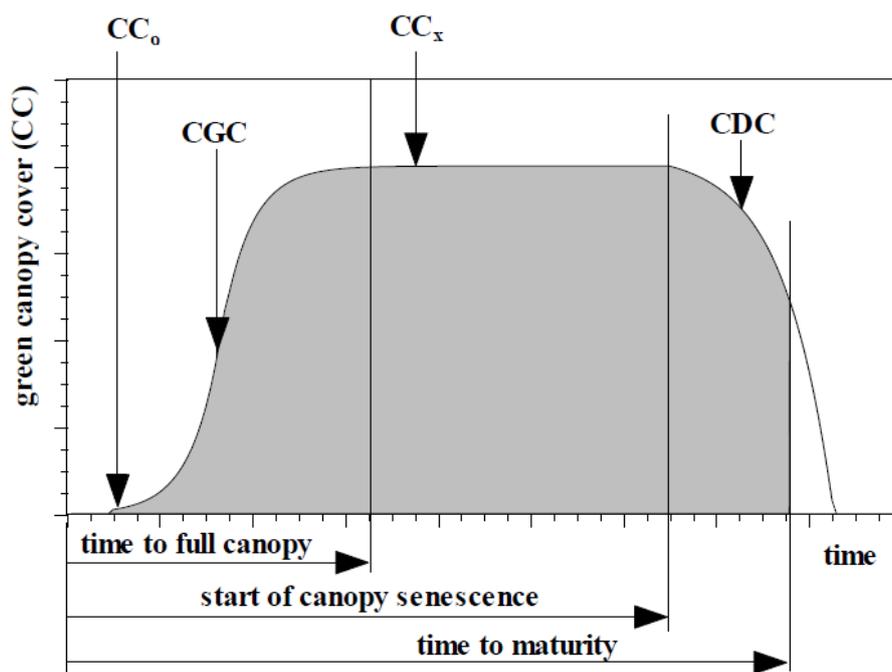


Figura 17: Cobertura del dosel durante toda la etapa del cultivo (emergencia, máximo desarrollo foliar, senescencia y maduración)

FUENTE: Raes *et al.*, (2018)

El desarrollo de la cobertura del dosel sigue una tendencia exponencial al comienzo, dónde se observa su crecimiento, luego se observa un decaimiento exponencial dónde se lleva a cabo la senescencia del dosel y el marchitamiento de las hojas como se observa en la **Error! Reference source not found.**, y es simulado mediante las siguientes ecuaciones:

- i) Ecuación 1: (Crecimiento exponencial) según Raes *et al.* (2018), es válida hasta que la cobertura del dosel sea la mitad de la cobertura máxima del dosel $CC \leq CC_x/2$.

$$CC = CC_o e^{tCGC} \quad \text{Ecuación 6}$$

- ii) Ecuación 2: (Decaimiento exponencial) según Raes *et al.*, (2018), es válida cuando la cobertura del dosel es mayor a la mitad de la cobertura máxima del dosel $CC > CC_x/2$.

$$CC = CC_x - 0.25 \frac{(CC_x)^2}{CC_o} e^{-tCGC} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde: CC es la cobertura del dosel a un tiempo t, CC_o : es el tamaño inicial del dosel cuando $t=0$, CC_x : Cobertura máxima del dosel, CGC : Coeficiente de crecimiento del dosel, t: tiempo en DDS.

- iii) Ecuación 3: Según Raes *et al.* (2018), para la declinación de la cobertura del canopy se utilizó la siguiente fórmula:

$$CC = CC_x \left[1 - 0.05 \left(e^{\frac{3.33 CDC}{CC_x + 2.29} t} - 1 \right) \right] \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde: CC es la cobertura del dosel a un tiempo t, CC_x : Cobertura máxima del dosel y la curva descendente empieza al inicio de la senescencia y $t=0$, CDC: Coeficiente de declinación del dosel, mientras más grande sea el valor la caída será más pronunciada, t: tiempo en DDS.

c) La evaporación del suelo

La fórmula que cuantifica el valor de la evaporación obtenida en toda la etapa fenológica es la siguiente:

$$E = (Kr \cdot Ke) \cdot ET_o \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde: E es la evaporación que se expresa en (mm), ET_o es la evapotranspiración de referencia, Kr es el coeficiente de reducción de la evaporación que en nuestro caso se consideró como 1, ya que se dio una lámina que respondió a la demanda evaporativa de la atmósfera al inicio del experimento (siembra) que es donde existe más pérdida por evaporación, y Ke que es el coeficiente de evaporación del suelo, el cual se define mediante la siguiente ecuación.

$$Ke = (1 - CC^*) \cdot Ke_x \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde: Ke es el coeficiente de evaporación del suelo, que considera las características de la superficie del suelo no cubierto por el dosel, Ke_x es el coeficiente máximo de evaporación del suelo que se consideró como 1,1 como valor predeterminado según Raes *et al.* (2018), y $1 - CC^*$ es la proporción de la cobertura del dosel real ajustada para efectos microadvectivos del suelo no cubierta.

d) Balance de humedad del suelo

Para estimar la evapotranspiración del cultivo, se utilizó la metodología establecida por el modelo Aquacrop, las variables que fueron consideradas para el balance de humedad del suelo fueron los siguientes: la lluvia (P), irrigación o riego (I), evapotranspiración (ET), escorrentía (RO), drenaje (D) y el cambio en el contenido de humedad del suelo aprovechable (Wr) (Flores & Ruiz, 1998).

La ecuación que representa el balance de humedad del suelo, se detalla a continuación:

$$Wr_{t+1} = Wr_t + (I + P - RO) + CR - ET - DP \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde: Wr_t es el contenido de agua en el perfil total del suelo, I es el agua aplicada por riego, P es la Lluvia, Ro es la escorrentía superficial, Cr es el agua que se mueve hacia arriba por el aumento capilar, ETC es la evapotranspiración del cultivo y finalmente DP es la percolación profunda.

3.4.2. Análisis estadístico

Los indicadores estadísticos utilizados para la calibración del modelo fueron: La eficiencia de Nash-Sutcliffe (EF), relación de desviación estándar (RSR), índice de Willmot (d) y coeficiente de determinación (R^2). El uso de cada indicador usado individualmente tiene limitaciones, pero el uso en conjunto de los indicadores hace que la evaluación sea mucho más eficaz con el desempeño del modelo para simular el crecimiento de los cultivos. Se muestra a continuación las ecuaciones detalladas.

$$EF = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{obs})^2} \right] \quad \text{Ecuación 12}$$

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{Obs}} \left[\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{obs})^2}} \right] \quad \text{Ecuación 13}$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (|Y_i^{sim} - Y_i^{obs}| + |Y_i^{obs} - Y_i^{obs}|)^2} \right] \quad \text{Ecuación 14}$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{obs})(Y_i^{sim} - Y_i^{sim})}{\sqrt{(Y_i^{obs} - Y_i^{obs}) \times \sum_{i=1}^n (Y_i^{sim} - Y_i^{sim})}} \right] \quad \text{Ecuación 15}$$

En las ecuaciones, Y_i^{obs} y Y_i^{sim} representan los valores observados y los valores simulados obtenidos con el modelo Aquacrop, respectivamente.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CARACTERIZAR EL ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR (IAF), LA COBERTURA DEL DOSEL Y LA CONDUCTANCIA ESTOMÁTICA.

4.1.1. Índice de área foliar (IAF)

La correlación del índice del área foliar del cultivo medido en campo (Ceptómetro) y el simulado con el programa GreenCrop Tracker bajo los tratamientos de humedad del suelo saturado y no saturado se detalla en la Figura 18. El valor, máximo alcanzado para el T1 fue (2,63 y 2,00) con un $r^2= 0,78$ y T2 de (2,54 y 2,09) con un $r^2= 0,72$ para el simulado y el medido respectivamente, según Qui *et al.* reporta que el Índice de Área Foliar (IAF) en la etapa de macollamiento para un crecimiento óptimo del arroz obtuvo un $r^2= 0,46$, siendo este menor a lo encontrado en el AER, debido a las diferencias climáticas del lugar (Qiu, Xiang, Ma, & Du, 2020).

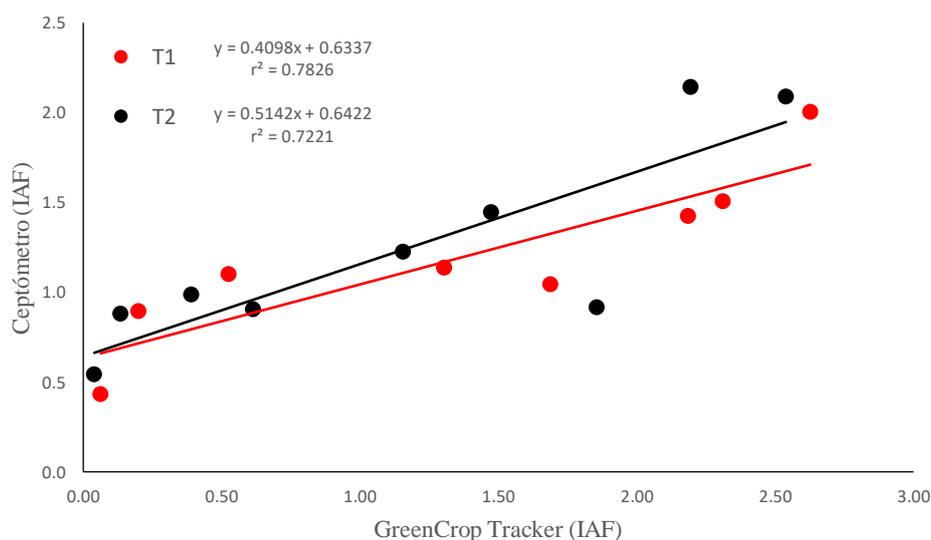


Figura 18: Índice de área foliar (IAF) estimado a partir de la cobertura del dosel y medido en campo con un ceptómetro bajo condiciones de humedad saturada T1 y no saturada T2.

4.1.2. Cobertura del dosel

En la Figura 19 se muestra el porcentaje de la cobertura del dosel observado durante el desarrollo del cultivo desde la siembra hasta la maduración para T1 y T2. El valor, máximo alcanzado fue 73,5% para T1 y 72,1% para T2 bajo condiciones de la Molina. Según Porras bajo condiciones óptimas de clima y riego en cultivo de arroz el valor máximo de cobertura del dosel sería 98%, esta diferencia es debido a la variedad del cultivo, la coloración de las hojas y otros factores externos que pueden afectar estos parámetros. (Porras Jorge, Ramos Fernández, Ojeda Bustamante, & Ontiveros Capurata, 2020).

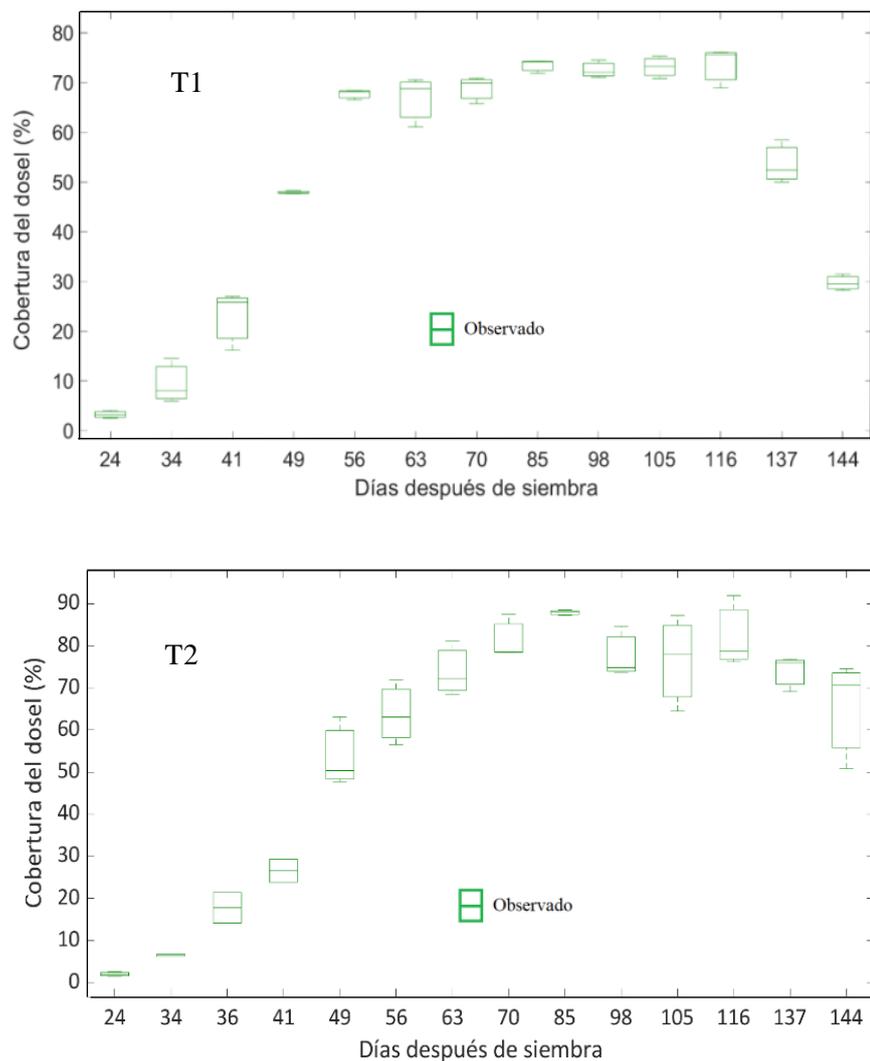


Figura 19: Cobertura del dosel (%) bajo condiciones de humedad del suelo saturado T1 y no saturado T2.

4.1.3. Relación de la conductancia estomática y humedad del suelo

La conductancia estomática ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) monitoreada en campo durante la etapa de macollamiento para T2 es proporcional a la humedad del suelo, en la Figura 20 verificamos la relación entre ambas variables en diferentes profundidades del suelo, para una profundidad de 20 cm con $r^2 = 0,719$ y para la profundidad de 30 cm con un $r^2 = 0,706$. Según Gujjar *et al.* 2020. indica que existe un efecto obvio del estrés por sequía en el cierre de los estoma que provoca una reducción de la conductancia en las etapas de macollamiento y llenado de granos encontrándose una diferencia significativa de la media de $p < 0,05$.

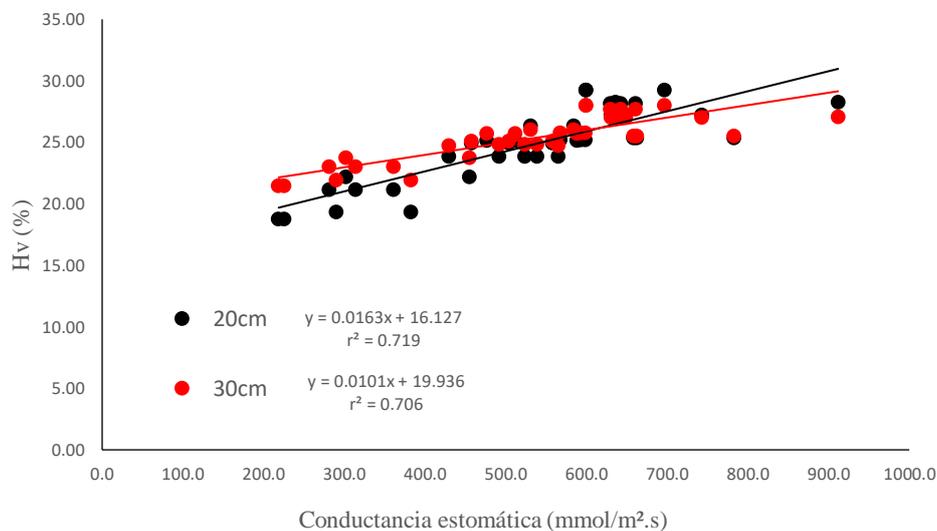


Figura 20: Relación entre conductancia estomática y la humedad del suelo en T2 para 20 cm y 30 cm de profundidad.

La reducción del riego fue realizada en la etapa de macollamiento, siendo dicha etapa la más resistente en comparación con las demás etapas fenológicas del cultivo. Diversos autores recomiendan las prácticas seguras en la última etapa vegetativa del macollamiento, para no comprometer la etapa de floración y evitar posibles pérdidas de rendimiento (Lampayan, Xangsayasane & Bueno, 2019).

En la etapa final de la fase vegetativa, se realizó 4 medidas con el porómetro, de 1 pm a 2 pm. Es a esta hora donde se realiza el mayor flujo de vapor de agua o la mayor transpiración (conductancia estomática) (Rubio, 2020).

Tabla 3: Datos de humedad volumétrica del suelo a 20 cm versus Conductancia estomática en T2.

Humedad volumétrica (%)	Conductancia estomática ($mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$)
27,6	644,5
23,8	518,1
21,2	319,1
18,7	222,3

En la Tabla 3 se obtuvo información de humedad del suelo a 20 cm en T2, con valores de humedad volumétrica de: 27,6%, 23,8%, 21,2% y 18,7% y valores de conductancia estomática en $mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$: 644,5 - 518,1 - 319,1 - 222,3; cuyos valores se muestran en la Figura 21, el cual muestra una relación: BUENA según (Gujjar *et al.*, 2020).

En la Figura 21 :

Se puede observar la primera imagen (i) de la Figura 21, la cual fue tomada a los 34 DDS y se observa el buen estado en el color, en la forma de las hojas del cultivo y la buena humedad del suelo ya que el porcentaje de humedad volumétrico fue de 27,6% en T2 mostraba por encima de la capacidad de campo y cerca de saturación.

La segunda imagen (ii), fue tomada a los 64 DDS y se observa como el cultivo empieza a tener estrés, debido a las secas controladas; esto se puede observar por el color y formas de sus hojas, también por la humedad del suelo que registró un porcentaje volumétrico de 23,8% por debajo de la capacidad de campo; en esta etapa el cultivo presentó un enrollamiento de hojas. Al respecto Donoso (2020), menciona que es una respuesta a la falta de agua, en la planta presenta varios síntomas como el ajuste osmótico, reducción de la conductancia estomática y la fotosíntesis y bajos rendimientos.

La tercera imagen (iii) se tomó a los 77 DDS y nos muestra una ligera recuperación en la cobertura de canopy. Sin embargo, la humedad volumétrica se encuentra en 21,2% por debajo de capacidad de campo por lo cual se empieza a observar ligeras quemaduras en las puntas de las hojas de la planta y el color verde oscuro que predomina en las hojas, así como la falta de humedad en el suelo.

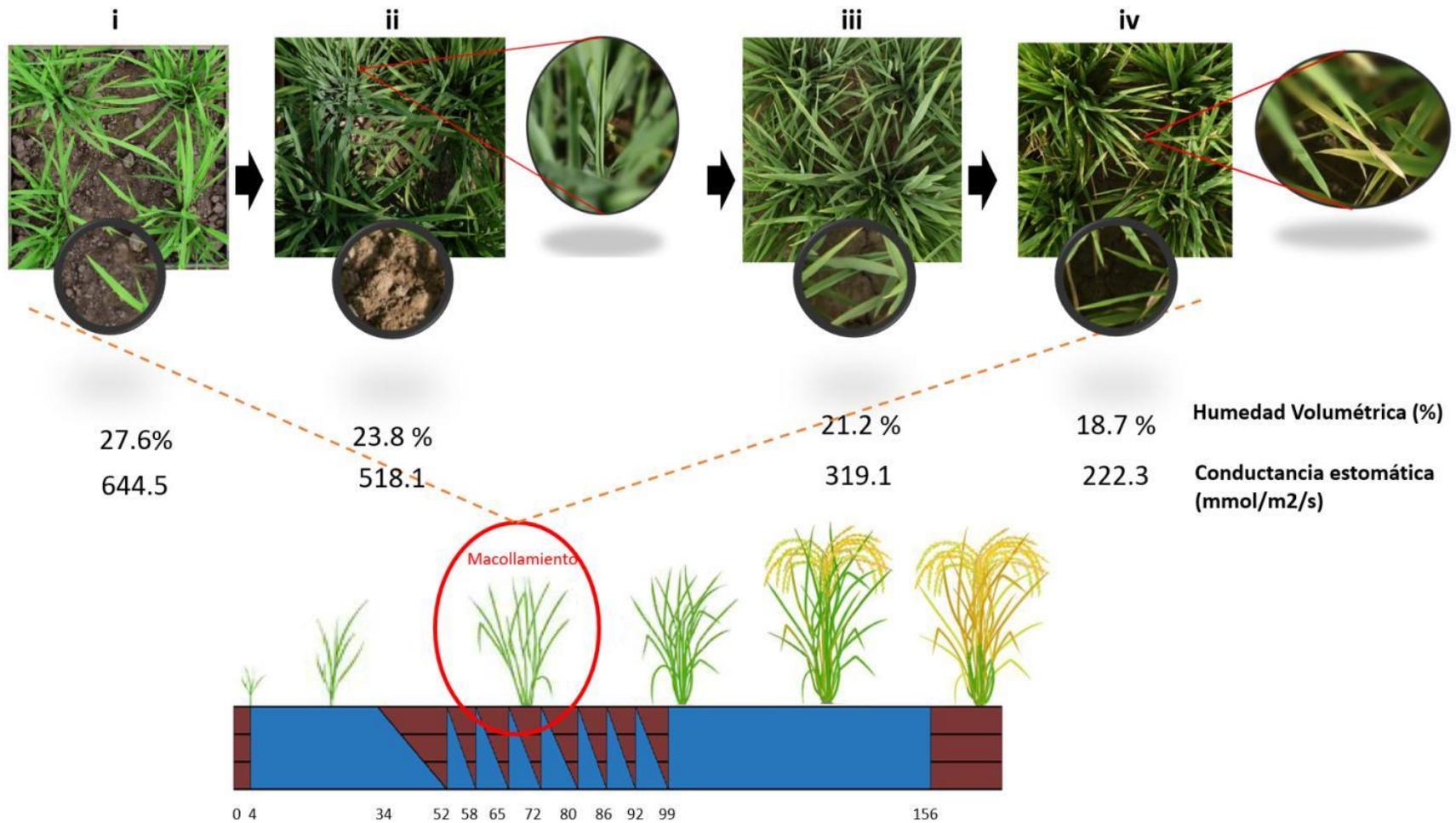


Figura 21: Conductancia estomática y humedad del suelo durante el ciclo de secas en la fase de macollamiento del arroz para T2.

La cuarta imagen (iv) se tomó a los 98 DDS y presentó una humedad relativa de 18,7%, estando muy por debajo de capacidad de campo. Se presenta estrés hídrico en la planta; en la imagen se puede observar claramente la quema de las puntas de las hojas. Según Polón, en su investigación consistió en suspender el riego por 25 días, dejando el campo con una lámina de 5 mm y que esta se consuma por filtración y evapotranspiración; permitiendo que el suelo se agriete (suelo seco), y así se produzca un enrollamiento de las hojas y quemaduras en las puntas de las mismas (Polón, 2006).

4.2. DETERMINACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO MEDIANTE EL BALANCE DE HUMEDAD DEL SUELO

Para la determinación de la evapotranspiración del cultivo de arroz para dos tratamientos (T1 y T2) considerando la metodología del balance de humedad del suelo, se consideraron tres pasos muy importantes:

4.2.1. Calibración del modelo Aquacrop

a) La transpiración del cultivo

La transpiración se calcula mediante el producto de la E_{to} con el coeficiente de estrés hídrico del suelo K_s , el cual es menor a 1 y por ende reduce el valor de la transpiración del cultivo cuando no existe suficientemente agua disponible para contrarrestar la demanda evaporativa de la atmósfera. En tal sentido, para los tratamientos T1 y T2 no se consideró influyente este valor, ya que no hubo estrés hídrico significativo para ambos tratamientos, puesto que en T1 se desarrolló un tratamiento óptimo y para T2 se realizó los cortes de agua en etapa de macollamiento, cuya etapa es la más resistente al estrés según Lampayan (2019). Por otro lado, el coeficiente de estrés por frío $K_{s_{tr}}$ que se vuelve menor a 1 cuando no hay suficiente temperatura durante el día y para nuestra investigación se consideró 1 ya que el clima en todo momento estuvo en un rango aceptable y finalmente el coeficiente de transpiración $K_{c_{tr}}$ que es proporcional a la CC.

En la Figura 22 se muestra una similitud en la transpiración para T1 y T2, ya que en ambos casos no hubo estrés significativo.

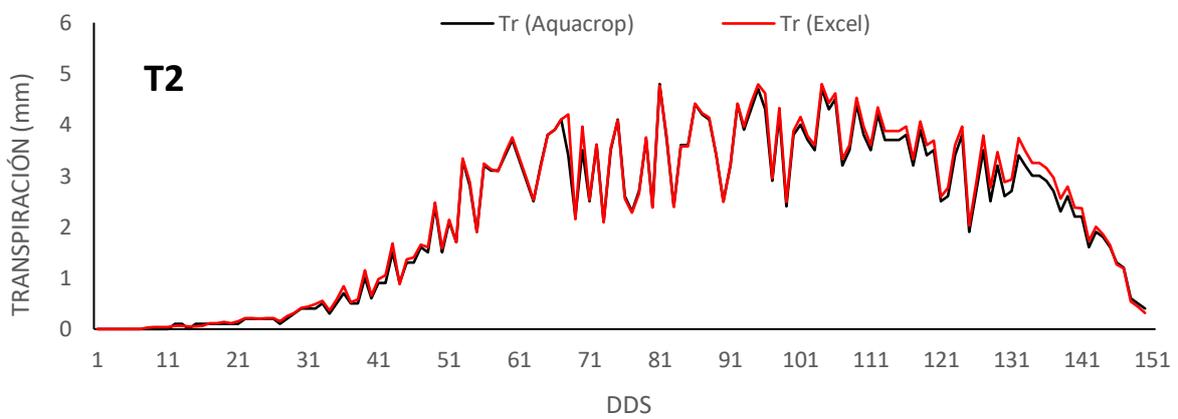
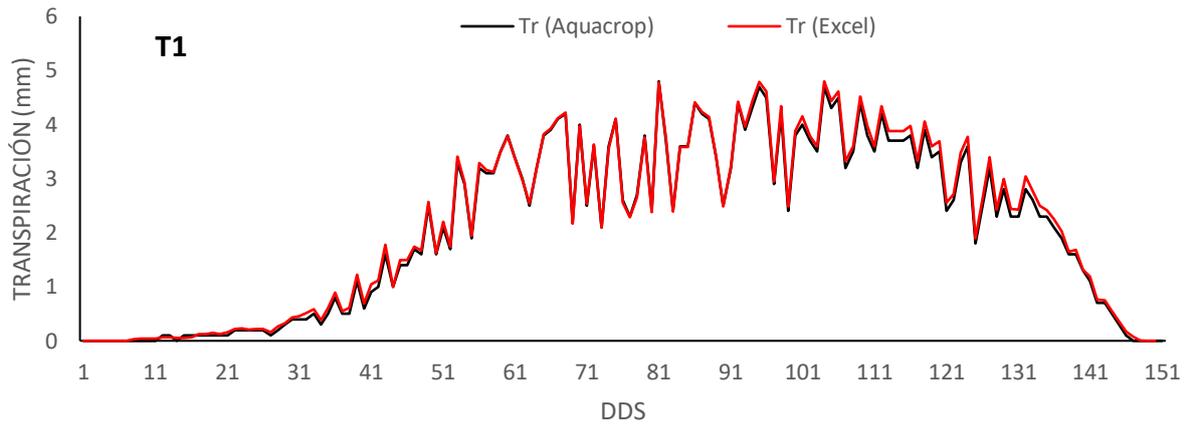


Figura 22: Comparación de los resultados de transpiración obtenidos por el programa Aquacrop y calculado en base a las fórmulas.

En la Figura 23 se compara las gráficas de los dos tratamientos, se observa que para el T2 hubo más transpiración que T1, debido a que la fecha de cosecha del T2 fue a los 164 DDS y para T1 fue a los 151 DDS, lo cual hubo más días que el cultivo transpiró.

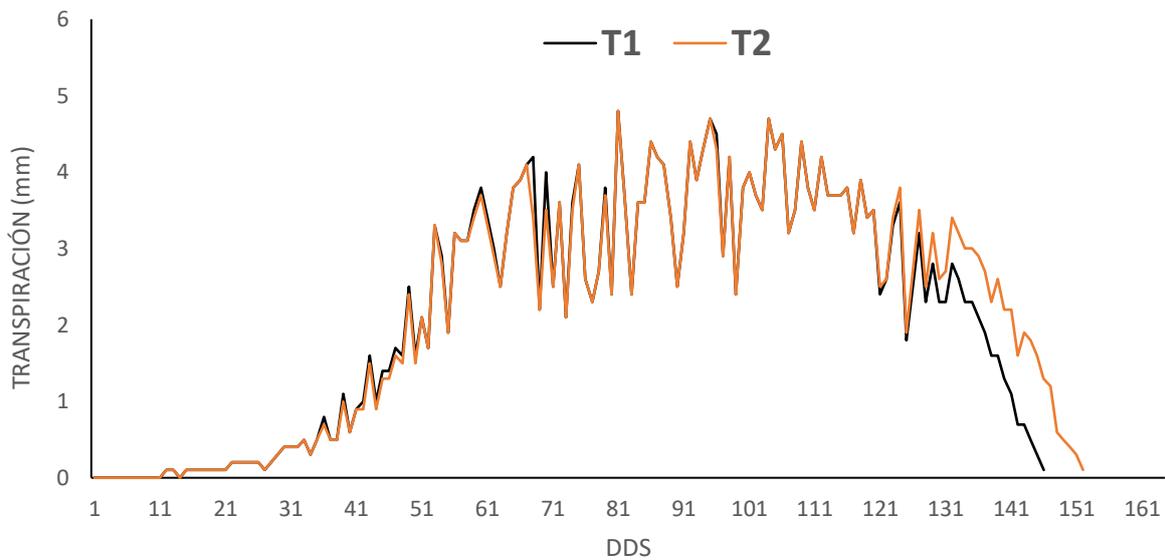


Figura 23: Comparación de la transpiración para T1 y T2 simulados por el programa Aquacrop

En la **Error! Reference source not found.** Figura 24 se observa el comportamiento del coeficiente de transpiración en toda la etapa fenológica del cultivo para T1 y T2. La ecuación se observa en la Ecuación 4.

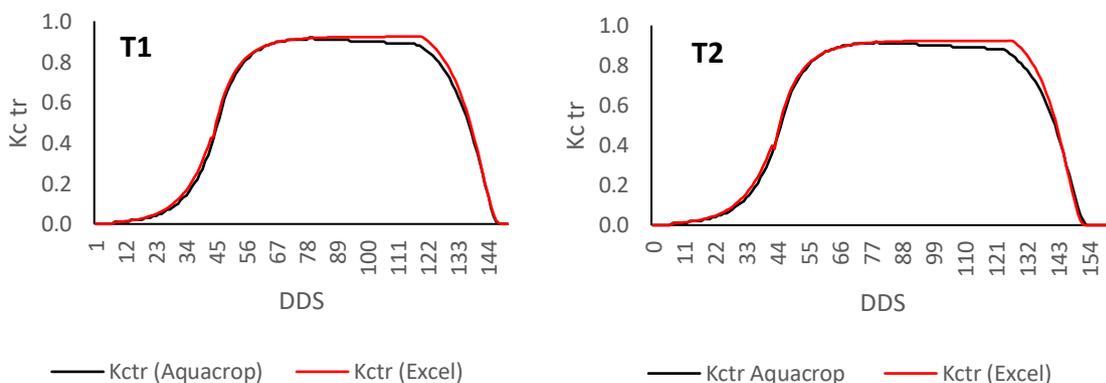


Figura 24: Comparación de los resultados del coeficiente de transpiración obtenidos por el programa Aquacrop y calculado en base a las fórmulas.

En la Figura 25 se compara las gráficas del coeficiente de transpiración de los dos tratamientos, se observa que para el T2 la curva fue un poco más alargada que T1, debido a que la fecha de cosecha del T2 fue dos semanas mayor con respecto a T1.

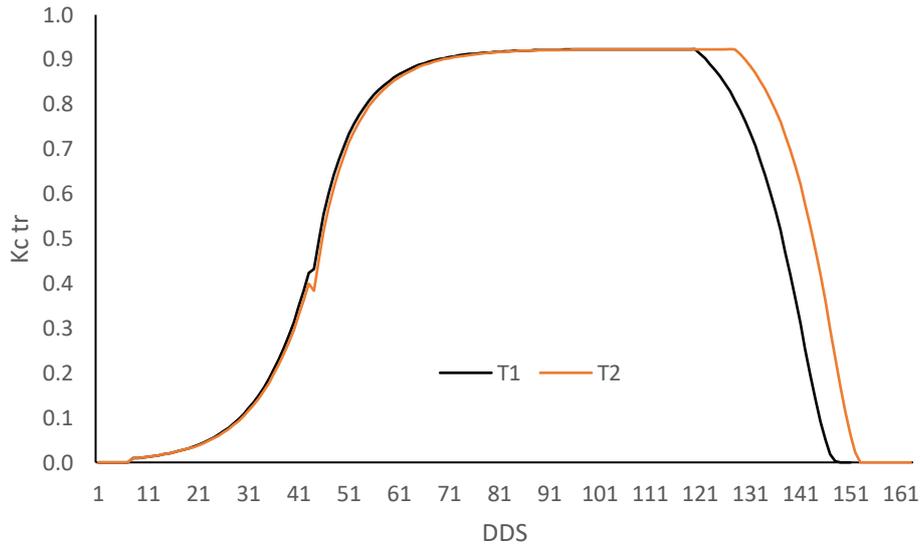


Figura 25: Comparación del coeficiente de transpiración para T1 y T2 simulados por el programa Aquacrop

En la

Figura 26 se muestra la gráfica de los valores del CC^* tiene valores por encima del $\% CC$ y por ende en las ecuaciones siguientes es de gran importancia obtener este valor para datos satisfactorios. Donde CC^* es la cobertura del dosel real ajustada para efectos microadvectivos.

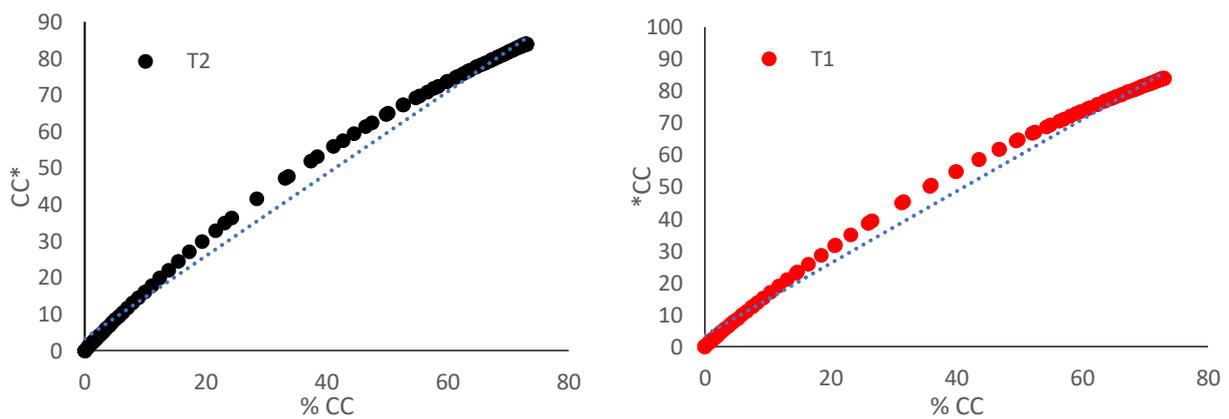


Figura 26: Gráfica de los valores de la cobertura del dosel ($\% CC$) en comparación con la cobertura del dosel ajustada para efectos microadvectivos (CC^*) para T1 y para T2.

La ecuación 6 genera la curva exponencial creciente en el inicio de la etapa fenológica, la ecuación 7 muestra un decaimiento exponencial y se da para definir la cobertura del dosel máximo y finalmente la ecuación 8 genera una declinación de la cobertura del dosel como se observan en la Figura 27.

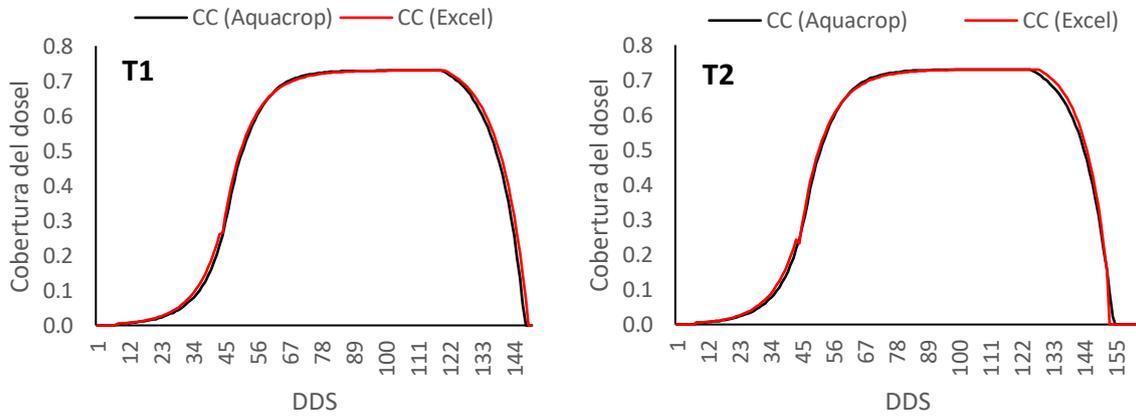


Figura 27: Comparación de los resultados de la cobertura del dosel obtenidos por el programa Aquacrop y calculado en base a las fórmulas.

En la Figura 28 se compara las gráficas de la cobertura del dosel de los dos tratamientos, se observa que para el T2 la curva fue un poco más alargada que T1, debido a que la fecha de cosecha del T2 fue dos semanas mayor con respecto a T1 y por lo tanto se dio esta diferencia.

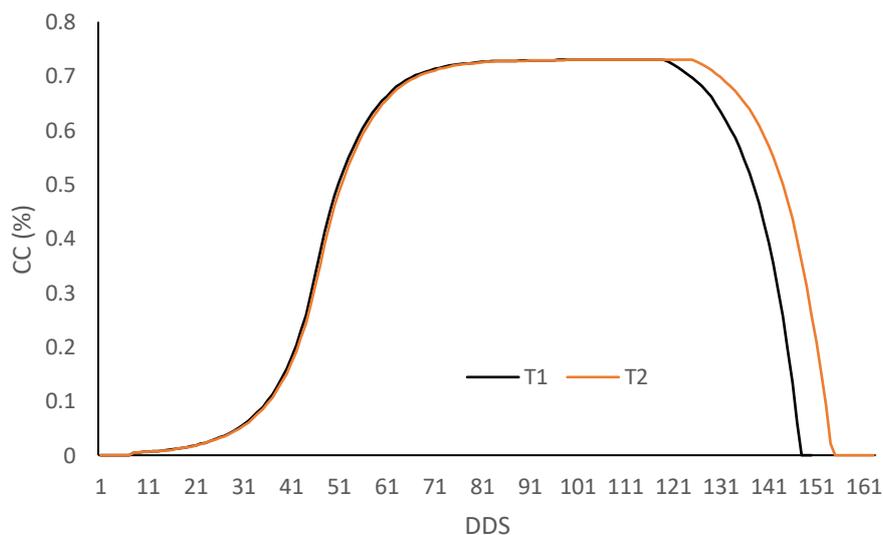


Figura 28: Comparación de la cobertura del dosel para T1 y T2 simulados por el programa Aquacrop.

b) La evaporación del suelo

Según Raes *et al.* (2018), la evaporación de la humedad del suelo, se inicia con un valor muy alto, puesto que el cultivo carece de dosel y, por ende, hay más suelo descubierto ocasionando una pérdida de agua por evaporación considerable como se puede observar en la Figura 29.

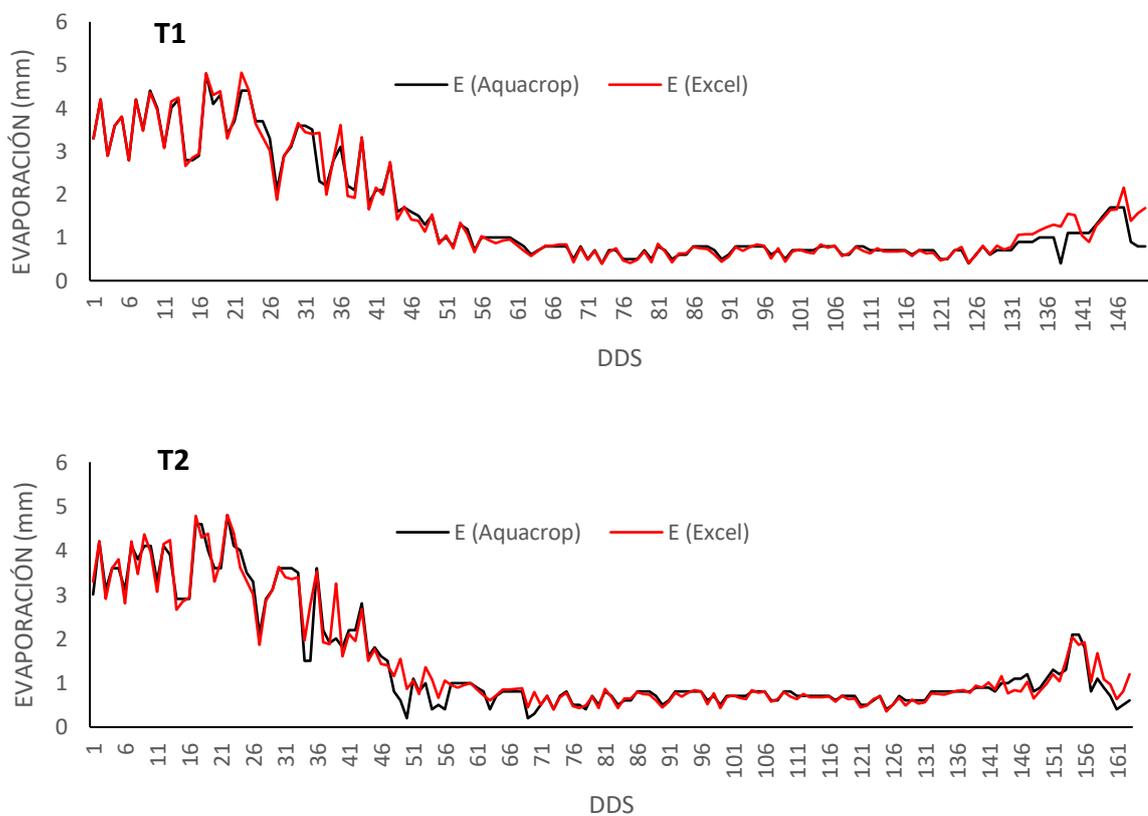


Figura 29: Comparación de los resultados de la evaporación del suelo obtenidos por el programa Aquacrop y calculado en base a las fórmulas.

En la Figura 30 se compara las gráficas de evaporación de los dos tratamientos y se observa que hubo más pérdida por evaporación para T2 a comparación de T1, debido a que la fecha de cosecha del T2 fue dos semanas mayor con respecto a T1.

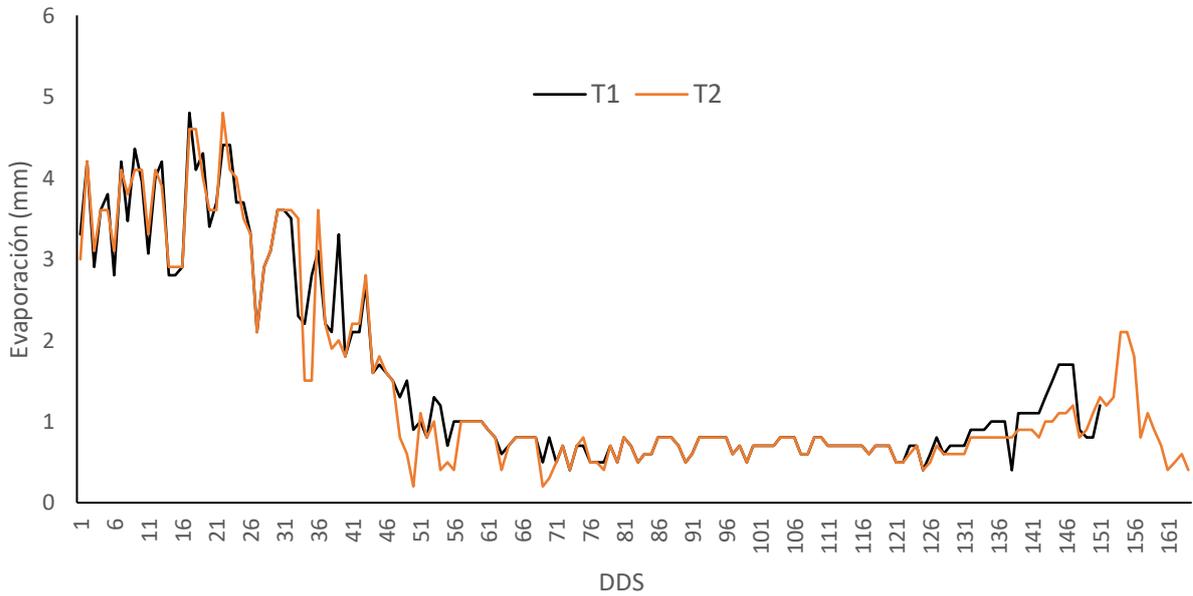
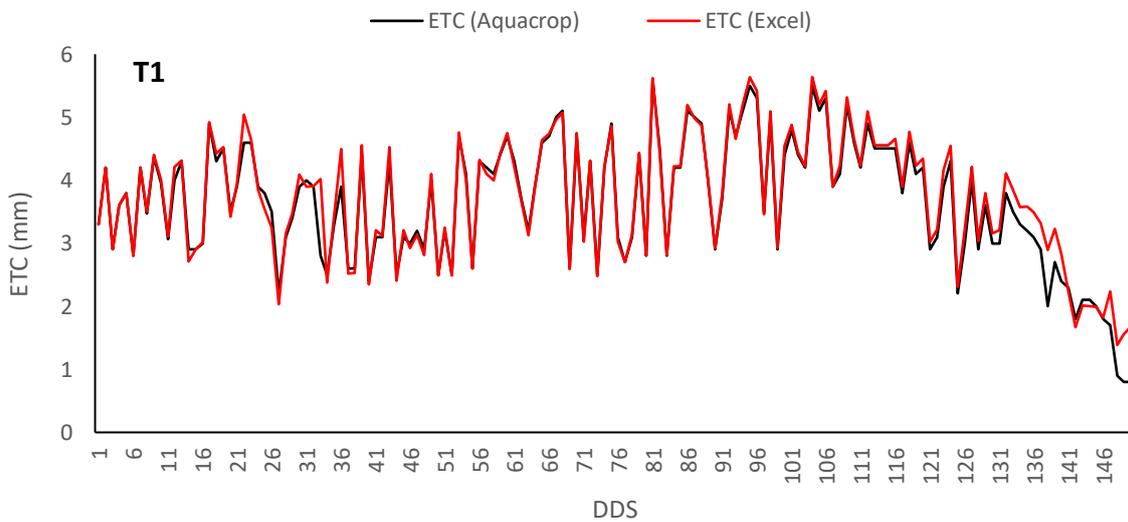


Figura 30: Comparación de la evaporación del suelo para T1 y T2 simulados por el programa Aquacrop.

c) La evapotranspiración del cultivo

La evapotranspiración del cultivo está dada por la suma de la evaporación del suelo y la transpiración del cultivo, en la Figura 31 se observa la tendencia de las uniones de las dos gráficas de transpiración y evaporación.



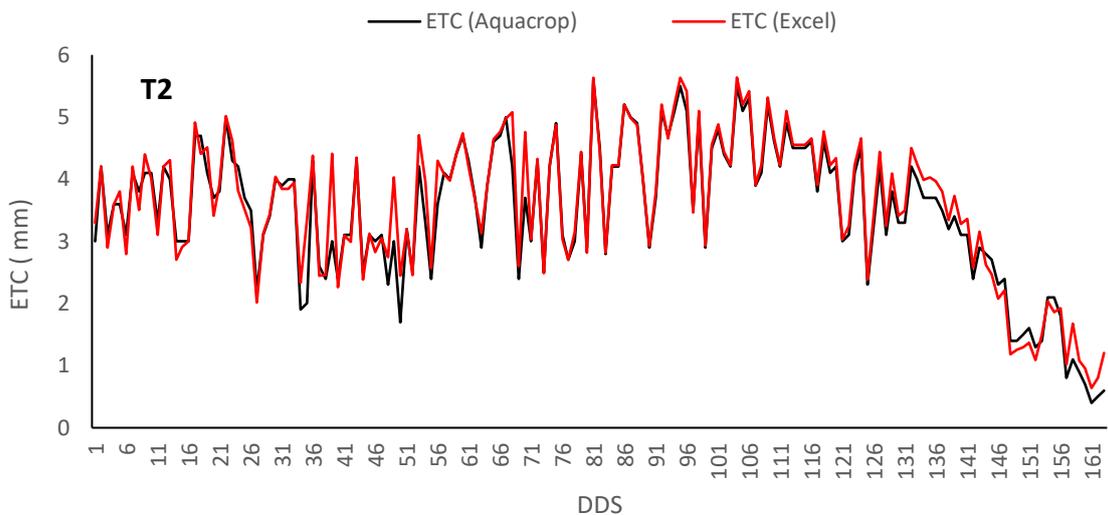


Figura 31: Comparación de los resultados de la evapotranspiración del suelo obtenidos por el programa Aquacrop y calculado en base a las fórmulas.

En la Figura 32 se observa la comparación de T1 y T2 y la diferencia en la última etapa de los valores obtenidos en donde T2 evapotranspiro más que T1, debido a que la fecha de cosecha del T2 fue a los 164 DDS y para T1 fue a los 151 DDS.

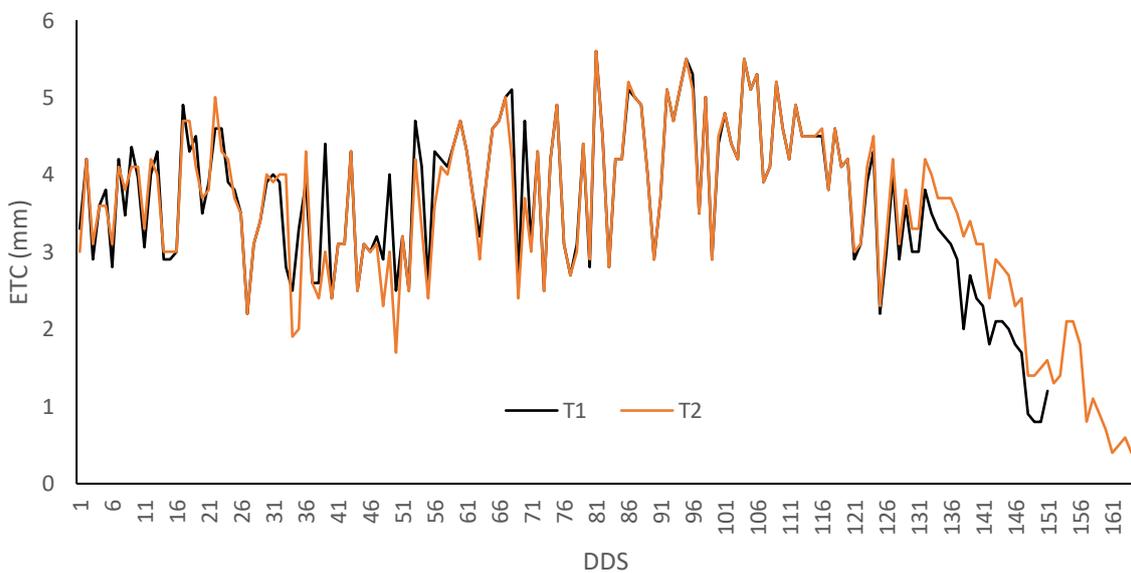


Figura 32: Comparación de la evapotranspiración del cultivo para T1 y T2 simulados por el programa Aquacrop.

4.2.2. Ajuste de la cobertura del dosel

La calibración de la cobertura del dosel observado y simulado para T1 y T2 se detalla en la Figura 33. Para T1 existe un buen ajuste entre la cobertura observada y la simulada, en cambio para T2 en el desarrollo del cultivo hay una subestimación por parte del modelo. Los indicadores estadísticos basados en el promedio de NRMSE (Normalized root mean square error) presentan un desempeño excelente $\text{NRMSE} < 10\%$, un desempeño bueno $10\% < \text{NRMSE} < 20\%$ y desempeño regular $20\% < \text{NRMSE} < 30\%$. Siendo para T1 un desempeño excelente y para T2 un desempeño bueno con valores de 4,7 y 12,9 respectivamente; y un índice de Nash para T1 y T2 de 0,99 y 0,93 respectivamente, siendo un valor aceptable para ambos (Primordian & Davatgar, 2019).

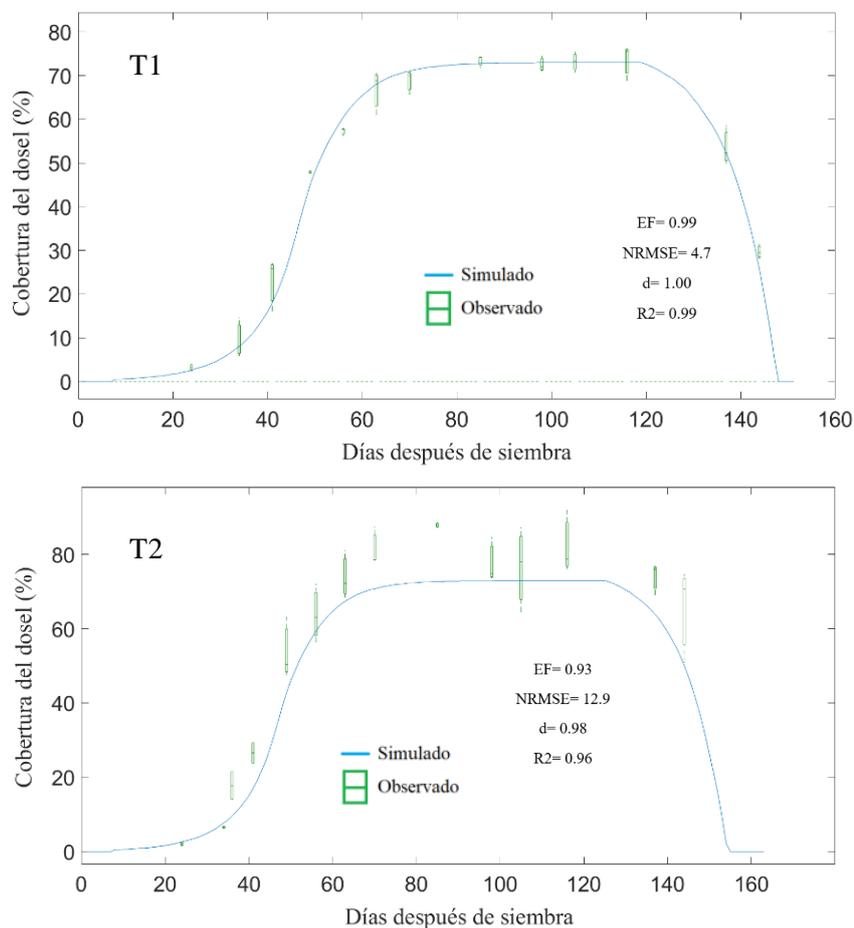


Figura 33: Cobertura del dosel observado y simulado bajo condiciones de humedad saturada T1 y no saturada T2.

En la correlación observada y simulada de la Figura 34 para el tratamiento de humedad saturada T1 y el tratamiento de humedad no saturada T2, en la cobertura del dosel se obtuvo un $r^2=$

0,99 y $r^2= 0,97$ respectivamente, siendo un valor óptimo con respecto a los resultados que se obtuvo en la ciudad de Paraná (Brasil) las cuales fueron $r^2= 0,88$ y $r^2= 0,75$ (Rosa, Souza, Santos, & Tsukahara, 2019).

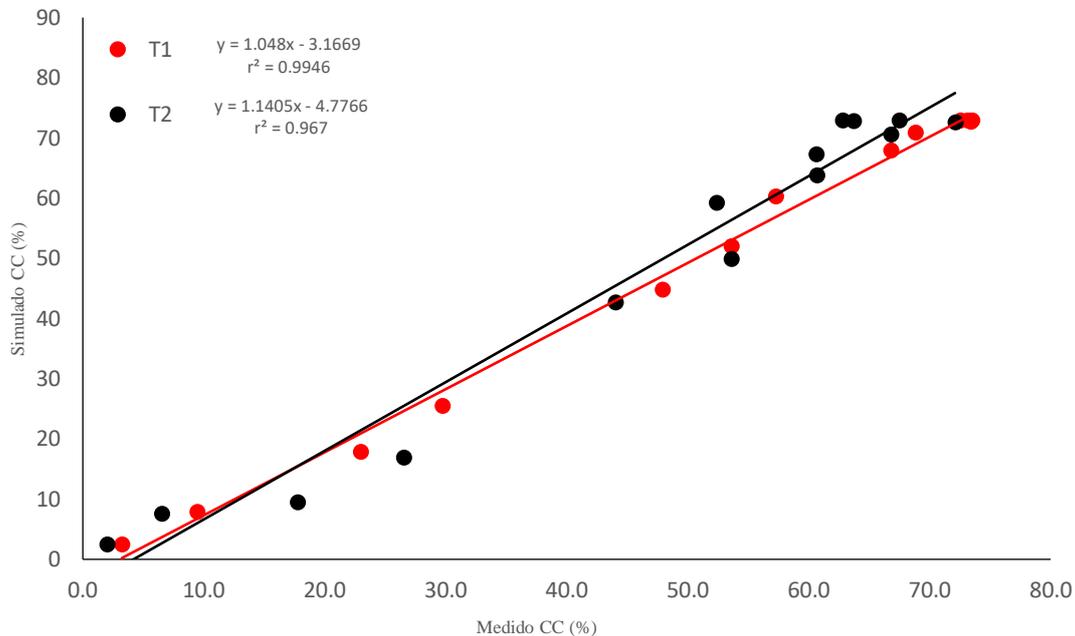


Figura 34: Correlación de la cobertura del dosel observado y simulado bajo condiciones de humedad saturada T1 y no saturada T2.

4.2.3. Ajuste de la humedad del suelo

La calibración de la humedad del suelo observado y simulado para T1 y T2 se detalla en la Figura 35. Para el tratamiento saturado existe un buen ajuste entre la cobertura observada y la simulada con un índice de Nash de 0,92; en cambio para el tratamiento bajo secas en el desarrollo del cultivo hay una subestimación por parte del modelo con un índice de Nash de -4,62. En el caso de T1 el valor se aproxima a 1 por lo que el valor es aceptable; sin embargo, en T2 se observa que el valor es negativo por lo que la simulación no se ajustaría a los datos reales. Esto se debe a que los valores en el perfil del suelo de la Molina son muy variables, encontrándose diferentes dimensiones de perfiles en varios sectores del T2 el cual influyó en las lecturas de los sensores de humedad que se ubicó a 20 cm, en cambio para el T1 el riego fue a saturación donde se pudo obtener buenos datos de humedad; debido a que todos los perfiles del suelo estaban húmedos. Según Ochoa afirma que existe influencia de parámetros del suelo, raíz y agua en el suelo en las simulaciones del programa AquaCrop en la variabilidad de la calibración, rendimiento y validación (Ochoa, 2019).

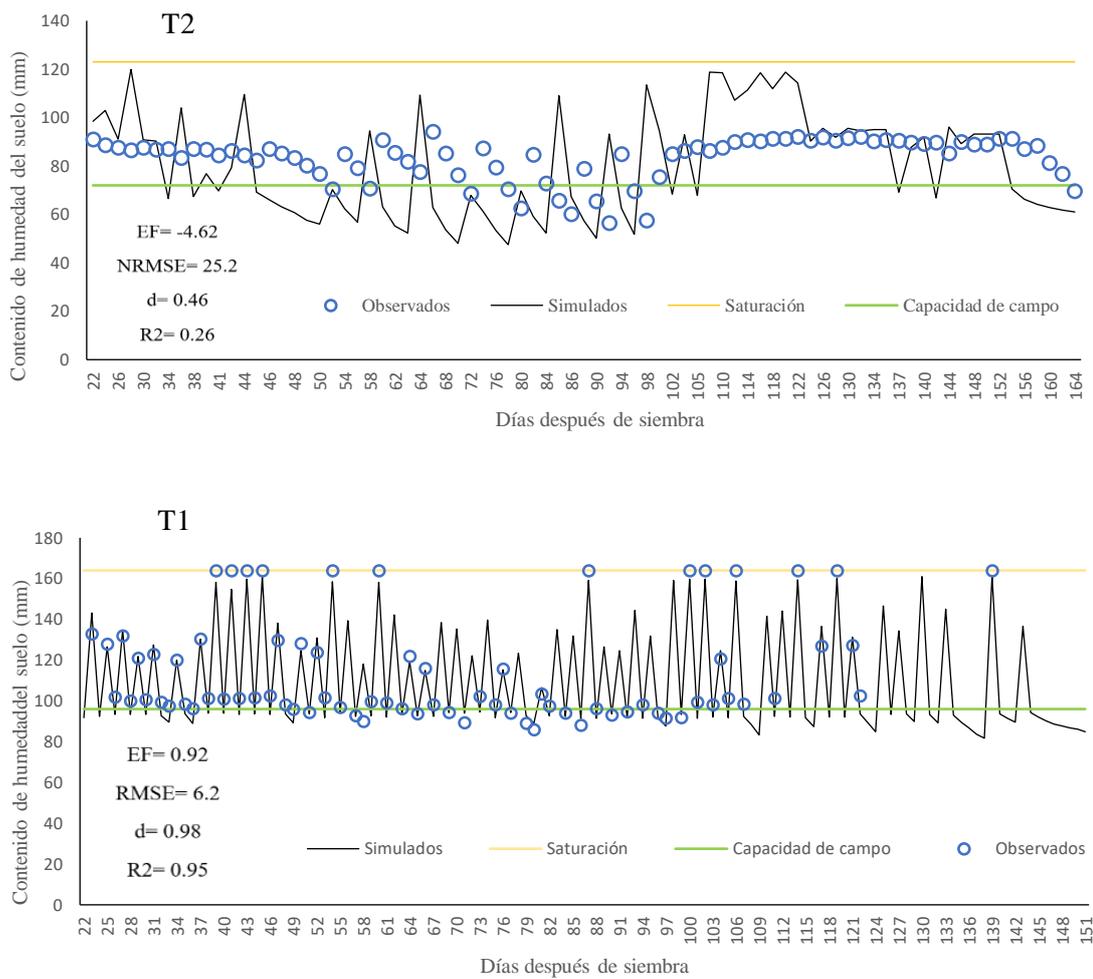


Figura 35: Humedad del suelo observado y simulado bajo condiciones de humedad saturada T1 y no saturada T2.

Se observa en la Figura 36 la correlación de la humedad del suelo entre lo observada y simulada para el tratamiento T1 y T2, se obtuvo un r de Pearson de $r = 0,97$ y $r = 0,26$ respectivamente. Según Hatfield, los valores superiores a 0,8 son considerados excelentes para el rendimiento del modelo, como se detalla en T1, siendo un valor óptimo para el tratamiento saturado pero un valor regular para el T2 (Hatfield, 2016).

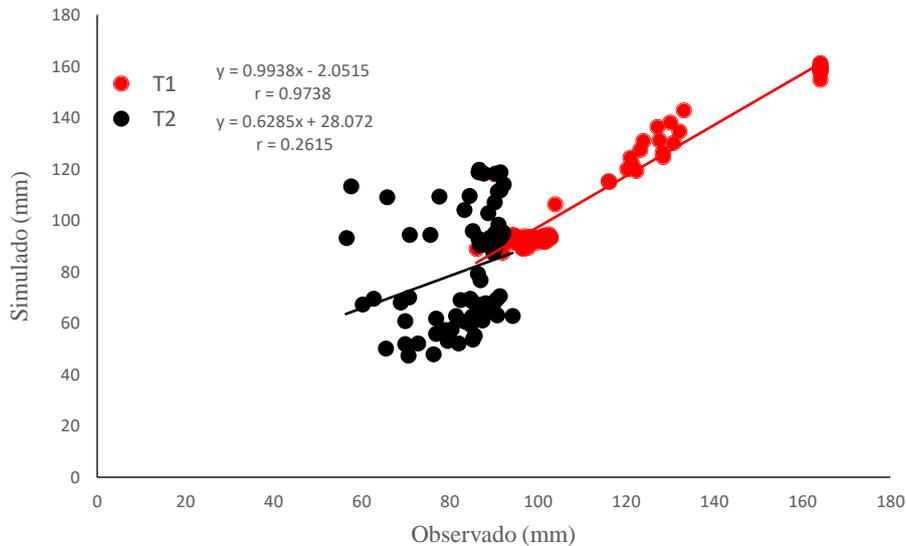


Figura 36: Correlación de la humedad del suelo observado y simulado bajo condiciones de humedad saturada T1 y no saturada T2.

4.2.4. Parámetros calibrados en el programa Aquacrop

Los datos de entrada y parámetros calibrados del programa Aquacrop fueron el manejo de riego, variables climáticas y mediciones del desarrollo del cultivo. En la calibración se consideró una temperatura base $T_b = 10^\circ\text{C}$. La cobertura de la planta inicial $CC_0 = 0,48\%$ con una densidad de 16 plantas por metro cuadrados. Los coeficientes de crecimiento del dosel (CGC) para los tratamientos T1 y T2 fueron $11,4$ y $11,2 \%$ día⁻¹. Estos valores significan que el dosel crece cada día un $11,4\%$ y $11,2\%$, durante la primera mitad del desarrollo del dosel el CGC es prácticamente constante cuando no hay estrés (Porras Jorge *et al.*, 2020). Los valores por encima del 6 a 8 % fueron recomendados según Amiri *et al.*, (2016). La cobertura máxima del dosel (CC_x) se estimó en $73,5\%$ y $72,1\%$ para T1 y T2 respectivamente. Valores que fueron similares a Amiri *et al.* (2016) quien reportó valores del 82% . Los valores de disminución del dosel (CDC) para T1 y T2 fueron $0,641 \%$ para ambos tratamientos. Estos valores se repitió en la experiencia de Amiri *et al.* (2016) quien obtuvo valores de $CDC = 0,6\%$. Para la profundidad máxima de raíces (r_{tx}) la longitud fueron de $0,36 \text{ m}$ a $0,25 \text{ m}$ para T1 y T2 respectivamente. La longitud de las raíces profundas es fundamental para el comportamiento de los cultivos en limitaciones de suministro de agua. Para la productividad del agua (WP) se calibró como 18 g m^{-2} para T1 y T2. Valores que están dentro de los rango de Amiri *et al.* (2016) que considera rangos de 15 a 20 g m^{-2} .

En la Tabla 4, se verifica que en la cobertura inicial del dosel para ambos tratamientos es 0,48% y una densidad de 64 plantas por metro cuadrado, valor que se encuentra dentro de la recomendación de (Raes *et al.*, 2018) el coeficiente de crecimiento del dosel *CGC* fue de 11,4 para T1 y 11,2 para T2 el cual según Amiri, Bampayan, Rezari, & Rezari (2016) recomienda valores superiores a 9,6% por día. Para la cobertura máxima del dosel en el cultivo de arroz variedad IR-43, se obtuvo 73,5% para T1 y 72,1% para T2, Según Porrás-Jorge *et al.* (2020) los valores obtenidos en su investigación fueron de 98% el valor en el tratamiento de humedecimiento continuo (T0) y valor de 90% para el tratamiento con descenso de humedad del suelo (T3).

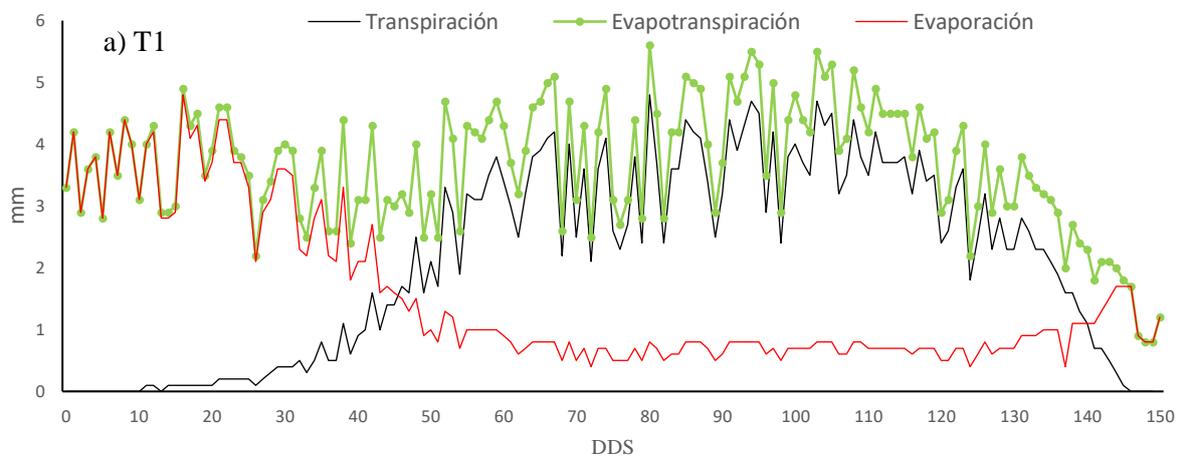
Tabla 4: Parámetros calibrados en el Aquacrop.

Parámetro de cultivo	Descripción	T1 (Saturado)	T2 (No saturado)	Valores predeterminados	Unid.
Cobertura del dosel y desarrollo fenológico					
<i>CC_o</i> :	Cobertura inicial del dosel	0.48	0.48	0.3-0.8	%
<i>p/l</i> :	Densidad de plantas	64.0	64.0	15.0-30.0	Plants m^{-2}
<i>CGC</i> :	Coeficiente de crecimiento del dosel	11.4	11.2	0.006-0.008	% day ⁻¹
<i>CC_x</i> :	Máxima cobertura del dosel	73.5	72.1	Aproximadamente completamente cubierto	%
<i>CDC</i>	Coeficiente de disminución del dosel	0.641	0.641	0.005	%/GDD
<i>t - r</i> :	Tiempo a la recuperación después de siembra hasta la emergencia	102	102	35-100	GDD
<i>t - f</i> :	Tiempo hasta la floración	1413	1573	1000-1300	GDD
<i>t - s</i> :	Tiempo hasta el inicio de senescencia	1906	1998	1000-1500	GDD
<i>t - m</i> :	Tiempo hasta la maduración	2369	2542	1500-2000	GDD
<i>Lon - f</i> :	Longitud de floración	496	563	-	GDD
<i>t - max r</i> :	Tiempo hasta la profundidad máxima efectiva de enraizamiento	1413	1573	-	GDD
Desarrollo de raíces:					
<i>rtx</i> :	Prof. Máxima de raíz efectiva	0.358	0.25	0.6	m
Producción de biomasa y rendimiento					
<i>WP *</i> :	Productividad del agua	18	18	19	gr m ⁻²
<i>hi</i> :	Índice de cosecha de referencia	56	54	35-50	%
Estrés hídrico					
<i>pexp, lower</i> :	Umbral inferior para la expansión del dosel	0.4	0.70	0.4	-
<i>pexp, upper</i> :	Umbral superior para la expansión del dosel	0.0	0.35	0.0	-
<i>sf - exp</i> :	Factor de forma para la expansión del dosel	3.0	3.0	3.0	-
<i>psto</i> :	Umbral superior para el cierre del estoma	0.5	0.75	0.5	-
<i>sf - psto</i> :	Factor de forma para el cierre del estoma	3.0	3.0	3.0	-
<i>psen</i> :	Umbral superior para la senescencia precoz del dosel.	0.55	0.8	0.55	-
<i>sf - psen</i> :	Factor de forma para la senescencia precoz del dosel.	3.0	3.0	3.0	-

4.3. EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO ESTIMADO MEDIANTE EL BALANCE DE HUMEDAD DEL SUELO

4.3.1. Evapotranspiración del cultivo para los tratamientos de riego T1 y T2

En la Figura 37 se detalla la transpiración, evaporación y por ende la evapotranspiración del cultivo de arroz variedad IR43. Se obtuvo una simulación bajo el programa Aquacrop de la evapotranspiración acumulada (ETc) de 550,3 mm para un periodo de 164 DDS para T2, y un ETc acumulado de 570,1 mm para un periodo de 151 DDS para T1, al respecto la ETc en la etapa de macollamiento, floración y grano lechoso, representan más del 88% de la ETc total del cultivo (Chengxin *et al.*, 2020). Herrera, Hervis, Gonzales, & Duarte (2019) estimaron la evapotranspiración del arroz en Cuba, obteniendo un promedio de 853 mm por cosecha y señalaron que este componente significa un 53% a 56% del balance hídrico en el campo. Herrera ,Meneses, Duarte , González, & Hervis (2020) indican la importancia de estimar este parámetro para el manejo eficiente del agua y el incremento de la eficiencia del uso del mismo en el cultivo de arroz.



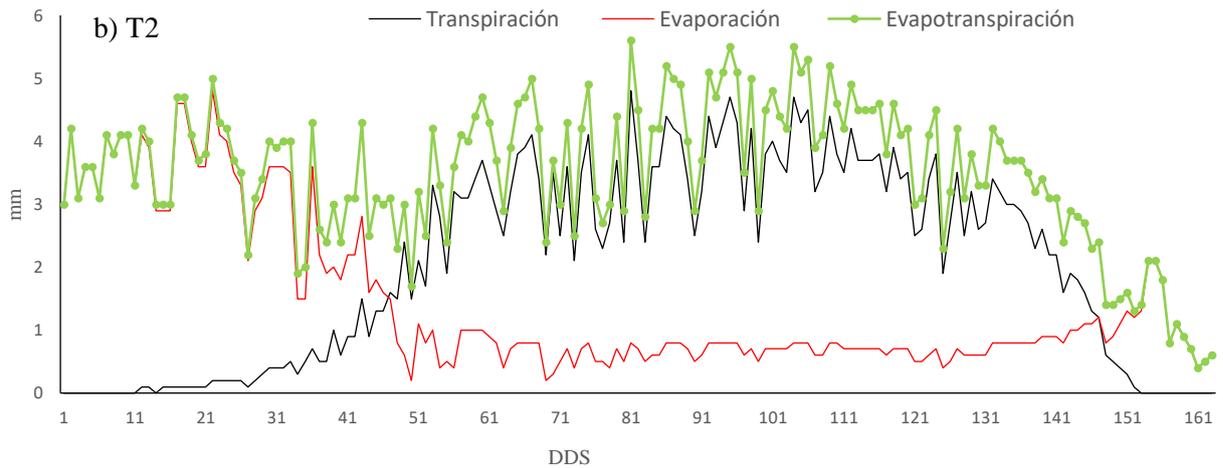


Figura 37: Se muestra la evaporación, transpiración y la evapotranspiración simulados para el cultivo de arroz durante toda la etapa fenológica bajo condiciones de humedad a) saturada T1 y b) no saturado T2.

En la Figura 38 se detalla el Kc simulado con el programa Aquacrop durante toda la etapa fenológica del cultivo y el cual se obtuvo dividiendo la ETC sobre la ETo para los dos tratamientos. El valor máximo del Kc para T1 es 1,1 y T2 es 1,1. Se muestra que los valores obtenidos son menores que los valores recomendados por la FAO (Allen R *et al.*, 2006), teniendo este último un Kc máximo de 1,2.

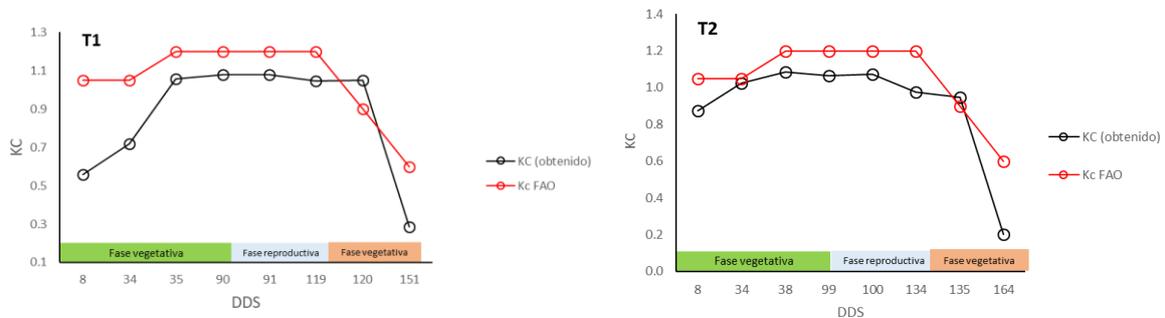


Figura 38: Se muestra el coeficiente de cultivo (Kc) simulado para el cultivo de arroz variedad IR-43 bajo condiciones de humedad del suelo saturado T1 y no saturado T2.

En la Tabla 5 se observa que el volumen de riego aplicado para T1 fue de $34928,50 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, esto se debe a que el riego fue diario con lámina de 5 cm, y para T2 fue de $28163,35 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, por el tratamiento de suelo no saturado. Considerando que el volumen de agua aplicada en T2 fue aproximadamente 19 por ciento menor que T1. La Productividad del agua para T1 y T2 fueron de 0,25 y 0,31 $\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$ respectivamente donde existe una diferencia de 0,06 $\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a favor

de T2, calculando este valor (WP) dividiendo el rendimiento obtenido del cultivo y el volumen de agua.

Tabla 5: Tabla de productividad del agua.

Tratamiento	ETC (m ³ .ha ⁻¹)	Volumen de agua(m ³ .ha ⁻¹)	Biomasa (kg.ha ⁻¹)	Rendimiento (kg.ha ⁻¹)	Productividad del Agua (kg.m ⁻³)
T1	5503	34928.50	15550	8680	0.25
T2	5701	28163.35	16390	8610	0.31

Según Heros *et al.* (2014) nos dice que bajo riego por inundación en las áreas de plantaciones de arroz en el Perú en los valles de Chancay- Lambayeque y la parte alta de Chira-Piura varía de 12000 a 20000 m³. ha⁻¹, el cual resulta menos cantidad de metros cúbicos aplicados, se puede observar que el tipo de suelo de la Molina no es retentivo.

El rendimiento final para T1 fue de 8680 kg. ha⁻¹ y para T2 fue de 8610 kg. ha⁻¹, mostrando una diferencia del 1 por ciento a favor de T1. En el Perú el promedio nacional en el 2019 fue alrededor de 8000 kg. ha⁻¹, dónde los mayores rendimientos en kg. ha⁻¹ se obtuvieron en Arequipa (14000), Ancash (11800), La Libertad (10600), Piura (8700) y Tumbes (8300) y menores rendimientos se encuentra en la selva nacional debido a la insuficiente disponibilidad de semilla calificada como es el caso de San Martín (6900). Para T1 y T2 el rendimiento final está dentro del promedio del rango nacional (MINAGRI, 2019).

Según el siguiente análisis estadístico de varianza (Anova) que se muestra en la Tabla 6, se concluye que no existe diferencias significativas en los resultados de evapotranspiración para los tratamientos T1 y T2.

Tabla 6: Tabla de análisis de varianza

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	2.2	1	2.2	1.8	0.2	3.9
Dentro de los grupos	369.6	313	1.2			
Total	371.7	314				

V. CONCLUSIONES

1. Se obtuvo una evapotranspiración de 550,3 mm en 151 DDS y 570,1 mm en 164 DDS para el tratamiento con humedad del suelo saturado (T1) y no saturado (T2) respectivamente. La evapotranspiración se obtuvo mediante simulación del balance de agua en el suelo en el cultivo de arroz para la variedad IR-43.
2. El índice de área foliar (IAF) medido y simulado tuvo un r^2 de 0,78 y 0,72 para T1 y T2 respectivamente. La cobertura del dosel observada y simulada con el modelo Aquacrop tuvo un desempeño “excelente” para T1 y “bueno” para T2, según los siguientes indicadores estadísticos EF de 0,99; NRMSE de 4,7; d de 1,00 y r^2 de 0,99 para T1 y EF de 0,93; NRMSE de 12,9; d de 0,98; r^2 de 0,96 para T2. La correlación paramétrica entre la conductancia estomática y la humedad del suelo, presento un valor de r^2 de 0,848 y 0,840 para T1 y T2 respectivamente.
3. El cultivo de arroz bajo humedad del suelo no saturado, permitió un ahorro de agua del 19,37% ($6765,15 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) y un incremento en la productividad del agua del $0,06 \text{ kg m}^{-3}$ a favor de T2, determinando que T2 es una muy buena estrategia para aplicar en el cultivo de arroz y obtener un ahorro del agua significativo.

VI. RECOMENDACIONES

1. Caracterizar los estadios del cultivo y cobertura del canopy, al menos dos veces por semana, para una mejor parametrización del modelo.
2. Evaluar la sensibilidad de los parámetros mediante métodos estadísticos.
3. Evaluar para diferentes campañas agrícolas la humedad del suelo no saturada en diferentes variedades de arroz.
4. Determinar la capacidad de campo y punto de marchitez permanente in situ.

VII. BIBLIOGRAFIA

- Abullah, T., Pawar, D., Kale, K., & Dingre, S. (2015). Water and nutrient use efficiencies of wheat (*Triticum aestivum* L.) under drip fertigation. *Agriculture for Sustainable Development*, 3(1),52-56. doi:<https://www.ijsr.net/archive/v4i5/SUB154520.pdf>
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de requerimientos de agua de los cultivos. Roma: Estudio FAO riego y drenaje 56. Obtenido de <http://www.fao.org/3/x0490s/x0490s.pdf>
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma: FAO riego y drenaje Manual 56. Retrieved from <http://www.fao.org/3/x0490s/x0490s00.htm>
- Amiri, E., Bampayan, M., Rezari, M., & Rezari, E. (2016). Evaluation of Ceres-Rice, Aquacrop and Oryza2000 models in simulation of rice yield response to different irrigation and nitrogen management strategies. *Journal of Plant Nutrition*, 37, 11, 1749-1769. Obtenido de <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01904167.2014.888750>
- Amiri, E., Rezaei, M., & Bannayan, M. (2016). Evaluation of Ceres-Rice, Aquacrop and Oryza2000 models in simulation of rice yield response to different irrigation and nitrogen management strategies. *Journal of Plant Nutrition*, 37, 11, 1749-1769. doi:<https://doi.org/10.1080/01904167.2014.888750>
- Anderson, M., Allen, R., Morse, A., & Kustas, W. (2012). Uso de imágenes térmicas Landsat para monitorear la evapotranspiración y administrar los recursos hídricos. *Ambiente Sensor Remoto*, 122, 50-65. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.025>
- Başağaoğlu, H., Chakraborty, D., & Winterle, J. (2021). Reliable Evapotranspiration predictions with a probabilistic machine learning framework. *Water*, 13(4), 557. doi:<https://doi.org/10.3390/w13040557>

- Bouman, B., & Tuong, T. (2001). Field water management to save water and increase its productivity in irrigated lowland rice. *Agricultural Water Management*, 11-30. doi:[https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(00\)00128-1](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(00)00128-1)
- Carracelas, G., Hombuckle, J., Rosas, J., & Roel, A. (2019). Irrigation management strategies to increase water productivity in *Oryza sativa* (rice) in Uruguay. *Agricultural Water Management*, 161-172. doi:<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.05.049>
- Charalampopoulos, I., Polychroni, L., Psomiadis, E., & Nastos, P. (24 de Enero de 2021). Spatiotemporal Estimation of the Olive and Vine Cultivations' Growing Degree Days in the Balkans Region. *atmosphere*, 12(2),148. doi:<https://doi.org/10.3390/atmos12020148>
- Chengxin , Z., Zhang, Z., Shurong, H., Chen, W., Pan, Y., & Wang, Z. (2020). Agronomic Growth Performance of Super Rice under Water-Saving Irrigation Methods with Different water- ontrolled thresholds in different Growth tages. *Agronomy*, 8-13. doi:<https://doi.org/10.3390/agronomy9020100>
- Dell´Amico, J., & Morales, D. (2017). Stomatal conductance behavior of two Cuban tomato varieties in field conditions and limited irrigation. *Scielo*. Retrieved from http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362017000200020
- Domingo, F., Villagarcía, L., & Were, A. (2003). ¿Cómo se puede medir y estimar la evapotranspiración?: estado actual y evolución. *Ecosistemas*, 1-15. doi:<https://doi.org/10.7818/ECOS.251>
- Donoso, G. (2020). Experiencias en el uso eficiente del agua para el cultivo del arroz en Chile. *Maule y Ñuble: Instituto Nacional de Innovaciones Agrarias Chile*.
- Fahad , S., Bajwa A.A., Nazir, U., Anjum, S., Farooq, A., & Zohaib, A. (2017). Crop production under drought and heat stress: plant responses and management options. *Front. Plant Sci.*, 8,1147. doi:[10.3389/fpls.2017.01147](https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01147)
- Flores, H., & Ruiz, J. (1998). Estimación de la humedad del suelo para maiz de temporal mediante un balance hídrico. *TERRA latinoamericana*, 219-229. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/573/57316305.pdf>

- Frisancho, G. (2020). Efecto del riego por inundación y secas en la emisión de gases en el cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.), UNALM. Lima. Obtenido de <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/4370>
- Greaves, G., & Wang, Y.-M. (2016). Assessment of FAO AquaCrop model for simulating maize growth and productivity under deficit irrigation in a tropical environment. *Resilient Water Management in Agriculture*, 8(12), 557. doi:<https://doi.org/10.3390/w8120557>
- Gujjar, R. S., Banyen, P., Chuekong, W., Worakan, P., Roytrakul, S., & Supaibulwatana, K. (2020). A Synthetic Cytokinin Improves Photosynthesis in Rice under Drought Stress by Modulating the Abundance of Proteins Related to Stomatal Conductance, Chlorophyll Contents, and Rubisco Activity. *Plants*, 10-21. doi:<https://doi.org/10.3390/plants9091106>
- Haofang, Y., Chuan, Z., Oue, H., Guangjie, P., & Darko, R. (2017). Determination of crop and soil evaporation coefficients for estimating evapotranspiration in a paddy field. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 10(4): 130-139. doi: <http://hdl.handle.net/123456789/4400>
- Hatfield, J. (2016). Increased Temperatures Have Dramatic Effects on Growth and Grain Yield of Three Maize Hybrids. *Agricultural & Environmental Letters*, 4-5. doi:<https://doi.org/10.2134/ael2015.10.0006>
- Heros Aguilar, E. (2019). Doctorado en Agricultura sustentable. Alternativas tecnológicas para contribuir a la sustentabilidad del cultivo de arroz en el Perú. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria la Molina - Escuela de Posgrado. Retrieved from <https://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/3987/heros-aguilar-elizabeth-consuelo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Heros, E., Gomez, L., & Sosa, G. (2014). Utilización de los índices de selección en la identificación de genotipo de arroz (*Oryza sativa* L.) tolerantes a sequía. *Producción Agropecuaria y Desarrollo Sostenible*, 2: 11-31. doi:<https://doi.org/10.5377/payds.v2i0.4326>
- Herrera, J., Meneses, J., Duarte, C., González, F., & Hervis, G. (14 de Junio de 2020). Determinación del coeficiente de cultivo para la estimación de la evapotranspiración

del arroz en Cuba. Obtenido de Ciencias Técnicas Agropecuarias:
http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2071-00542020000300005&script=sci_arttext&tlng=es#B17

Herrera , P., Hervis, G., Gonzales, R., & Duarte, D. (2019). Estudio sobre el balance hídrico del arroz en Cuba. *Ingeniería Agrícola* 9(3), 2227-8761. Obtenido de www.rcta.unah.edu.cu/index.php/IAgric/article/view/1143

Kadam, N., Tamilselvan, A., Lawas, L., Quimontes, C., Bahuguna, R., & Thomson, M. (2017). Genetic control of plasticity in root morphology and anatomy of rice in response to water-deficit. *Plant Physiol*, 174, 2302-2315. Retrieved from <http://refhub.elsevier.com/B978-0-12-814332-2.00009-5/sbref25>

Kaplan, G., & Rozenstein, O. (2021). Spaceborne Estimation of Leaf Area Index in Cotton, Tomato, and Wheat Using Sentinel-2. *Land*, 10, 505.
doi:<https://doi.org/10.3390/land10050505>

Karakus, P., & Karabork, P. (2017). Estimating crop cover fraction from digital color images. Information from imagery, 67-68. doi:<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W6-67-2017>, 2017

Lampayan, R., Xangsayasane, P., & Bueno, C. (2019). Crop Performance and Water Productivity of Transplanted Rice as Affected by seeding age seedling density under Alternate Wetting and Conditions in Lao PDR. *Water*, 5-17.
doi:<https://doi.org/10.3390/w11091816>

Melesse, A., Weng, Q., Thenkabail, P., & Senay, G. (2007). Remote sensing sensors and application in environmental resources mapping and modeling. *Sensors*, 3209-3241.
doi:<https://doi.org/10.3390/s7123209>

Ochoa, C. (2019, Noviembre). Calibración, validación y uso del modelo AquaCrop para el cultivo de la chufa (*Cyperus esculentus* L. var. *sativus* Boeck.) en Valencia. Valencia, España: Universidad Politecnica de Valencia. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10251/134097>

Osca, J., Galán, f., & Moreno-Ramón, H. (2021). Wetland and the influence of Winter Flooding. *Agronomy*, 11-1199. doi:<https://doi.org/10.3390/agronomy11061199>

- Parker, J., & Simpson, G. (2020). A Case Study Balancing Predetermined Targets and Real-World Constraints to Guide Optimum Urban Tree Canopy Cover for Perth, Western Australia. *Forest*, 11, 1120. doi: <https://doi.org/10.3390/f11111128>
- Patel, J. B., Patel, V. J., & Patel, J. R. (2006). Influence of different methods of irrigation and nitrogen levels on crop growth rate and yield of maize. *Indian J. Crop, Sci.* 1(1-2): 175-177. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_nlinks&ref=6590223&pid=S2007-0934201400020000600017&lng=es
- Polón, P. R. (2006). Impacto nacional en el incremento del rendimiento agrícola, economizar agua de riego y energía en el cultivo del arroz (*oryza sativa* L) como consecuencia del estrés hídrico. Pinar del Río: XVI Forum de ciencia y técnica. Retrieved from <http://www.forumcyt.cu/UserFiles/forum/Textos/0109604.pdf>
- Porrás-Jorge, R., Ramos-Fernández, L., Ojeda-Bustamante, W., & Ontiveros-Capurata, R. E. (2020). Performance assessment of the AquaCrop model to estimate rice yields under alternate wetting and drying irrigation in the coast of Peru. *Scientia Agropecuaria*, 309-321. doi:<https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.03.03>
- Primordian, N., & Davatgar, N. (2019). Simulating the effects of climatic fluctuations on rice irrigation water. *Agricultural Water Management*, 97-106. doi:[10.1016/j.agwat.2018.10.003](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.10.003)
- Qiu, Z., Xiang, H., Ma, F., & Du, C. (2020). Qualifications of Rice Growth Indicators Optimized at Different Growth Stages Using Inmanned Aerial Vehicle Digital Imagery. *remote sensing*, 7-18. doi:<https://doi.org/10.3390/rs12193228>
- Quezada, C., Hernaíz, S., Stolpe, N., & Saludes, A. (2011). Efecto del método de riego intermitente en componentes de rendimiento y manejo del agua en once genotipos de arroz (*Oryza sativa* L.). *Chilean J. Agric. Anim., Sci.* 27(2): 105-115. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_nlinks&ref=6590225&pid=S2007-0934201400020000600018&lng=es
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T., & Fereres, E. (2018). FAO crop-water productivity model to simulate yield response to water. In D. Raes, & P. Steduto, *Manual Aquacrop 6.0 - 6.1 Reference manual* (pp. 26-87). United Nations: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Retrieved from <http://www.fao.org/3/br246e/br246e.pdf>

- Robles , T. R., Rodrigez, L. J., & Martinez , S. L. (2005). Desarrollo vegetativo de melón (Cucumis melo L.) establecido por trasplante, con guiado vertical y acolchado plástico en la comarca lagunera. Rev Chapingo Serie zonas andinas, 4:15-20. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_nlinks&ref=6590232&pid=S2007-0934201400020000600022&lng=es
- Rosa, S., Souza, J., Santos, A., & Tsukahara, R. (2019). Desempenho do modelo aquacrop para a cultura do trigo na mesorregião centro oriental do paraná. Convibra, 5-9. Retrieved from http://www.moretti.agrarias.ufpr.br/publicacoes/re.i_2020_Convibra_1.pdf
- Rubio , R. (2020). Índice de estrés hídrico a partir de termografía desde un vehículo aéreo no tripulado, conductancia estomática y humedad de suelo. Universidad Nacional Agraria la Molina, pp. 35-64.
- San Miguel-Cháves, R., Hernández-Sequera, V., Rosas-Calleja, D., Trinidad-Santos, A., & Larqué-Saavedra, A. (1999). Efecto del potasio sobre la conductancia estomática y contenido de lorofila en amaranto (*Amaranthus hypochondriacus* L.). Chapingo serie hortiultura, 19-22. doi:10.5154/r.rchsh.1997.11.077
- Sanchez, M., Hernandez , Y., Dell, J., & Polón , R. (2016). Emission of N₂O, N₂ and CO₂; from soil fertilized with nitrate: Effect of compaction, soil moisture and reventing. Soil biology and biochemistry, 37(3) 178-186.
- Sanchez-Toribio, M. (1992). Métodos para el estudio de la evaporación y evapotranspiración. Geoforma Ediciones, 35. doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022011000300010>
- Steduto, P., Hsiao, T., Fereres, E., & Raes, D. (2012). Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. Roma: FAO. Obtenido de <http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html>
- Tuong, P., Bouman, B., & Mortimer, M. (2005). Integrated Approaches for Increasing Water Productivity in Irrigated Rice- Based systems in Asia. Plant Production Science, 231-241. doi:<https://doi.org/10.1626/pps.8.231>

- Upadhyaya, H., & Kumar P., S. (2019). Drought stress responses and its management in rice. Department of botany, (9) 177-191. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814332-2.00009-5>
- Vargas, J., Beltramo, V., Racines, M., & Motta, C. (2010). El arroz y su medio ambiente. CGSpace, 83-99. Obtenido de http://ciat-library.ciat.cgiar.org/Articulos_Ciat/2010_Degiovanni-Produccion_eco-eficiente_del_arroz.pdf#page=107
- Wei, H., Chen , C., Ma , X., Zhang, Y., Han, J., & Mei, H. (2017). Comparative analysis of expression profiles of panicle development among tolerant and sensitive rice in response to drought stress. *Front. Plant Sci*, 8, 437. doi:10.3389/fpls.2017.00437
- Zaher-Ara, T., Boroomand, N., & Sadat-Hosseini, M. (2016). Physiological and morphological response to drought stress in seedings of ten cirus. 30(3), 985-993. doi:10.1007/s00468-016-1372-y
- Zangani, E., Afsahi, K., Shekari, F., & Mac Sweeney, E. (2021). Nitrogen and Phosphorus Addition to Soil Improves Seed Yield, Foliar Stomatal Conductance, and the Photosynthetic Response of Rapeseed (*Brassica napus* L.). *Agriculture*, 11, 483. doi:<https://doi.org/10.3390/agriculture11060483>

VIII. ANEXOS

ANEXO 1: Resultados del análisis de agua reportado por el laboratorio



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA
DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS DRH
LABORATORIO DE AGUA, SUELO, MEDIO AMBIENTE Y FERTIRRIEGO
Av. La Molina s/n Teléfono: 614 7800 Anexo 226 Lima Email: las-fla@lamolina.edu.pe



Nº 009022

ANÁLISIS DE AGUA - RUTINA

SOLICITANTE : GERARDO FRISANCHO LARICO
PROYECTO : " EFECTO DEL MANEJO DEL RIEGO BAJO INUNDACIÓN Y SECAS EN LA EMISIÓN DE GASES DE INVERNADERO DEL ARROZ EN EL ADRYD"
PROCEDENCIA : Reservorio - Campo Ferial
RESPONSABLE ANÁLISIS : Ing. Nore Arévalo Flores
FECHA DE ANÁLISIS : La Molina, 31 de octubre de 2018

Nº LABORATORIO	9022
Nº DE CAMPO	Agua
CE mmhos/cm	0.62
pH	8.16
Calcio meq/l	4.53
Magnesio meq/l	0.66
Sodio meq/l	0.83
Potasio meq/l	0.13
SUMA DE CATIONES	6.14
Cloruro meq/l	0.92
Sulfato meq/l	3.38
Bicarbonato meq/l	1.73
Nitratos meq/l	0.01
Carbonatos meq/l	0.00
SUMA DE ANIONES	6.04
SAR	0.51
CLASIFICACION	C2-S1
Boro mg/L	0.11

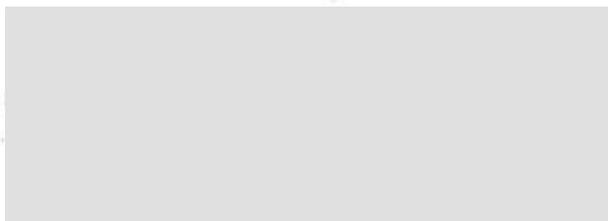


Figura 39: Análisis de agua realizado en el laboratorio de agua, suelo, medio ambiente y fertilización de la facultad de ingeniería agrícola de la UNALM

ANEXO 2: Resultados del análisis del suelo reportado por el laboratorio

a) Análisis de suelo antes de la siembra

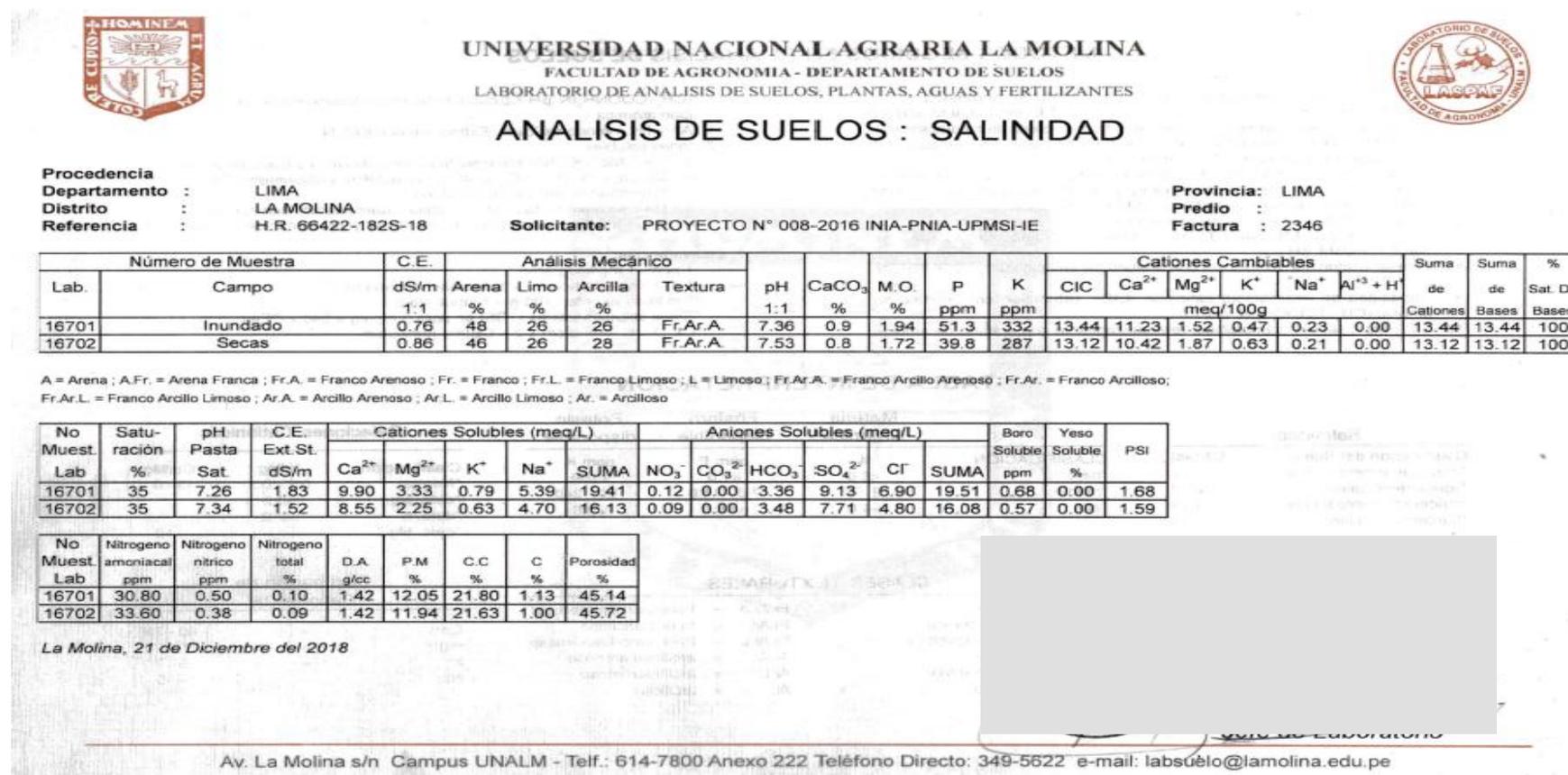


Figura 40: Análisis de suelo antes de la siembra realizado en el laboratorio de análisis de suelo, plantas, aguas y fertilizantes de la facultad de agronomía de la UNALM

b) Análisis de suelo después de la siembra



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



INFORME DE ANALISIS DE SUELO - FERTILIDAD

SOLICITANTE : GERARDO FRISANCHO LARICO

PROCEDENCIA : LIMA/ LIMA/ LA MOLINA

REFERENCIA : H.R. 68474

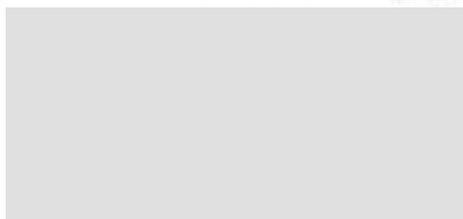
BOLETA : 3023

FECHA : 04/06/2019

Número Muestra		pH	CE _(1:1)	CaCO ₃	M.O.	P	K	Al ³⁺ + H ⁺
Lab	Claves	(1:1)	dS/m	%	%	ppm	ppm	meq/100
135	T1 inundado	8.01	0.56	0.70	1.30	24.4	313	0.00
136	T2 secas	7.84	0.85	0.60	1.42	23.1	276	0.00

Número Muestra		Fe	Cu	Mn	Zn	B
Lab	Claves	total	total	total	total	total
		ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
135	T1 inundado	25202.07	49.57	605.85	243.04	29.13
136	T2 secas	28841.56	52.50	629.70	263.07	33.94

Número Muestra		N	Nitrógeno	Nitrógeno	C
Lab	Claves	%	amoniacal	nitrico	%
			ppm	ppm	
135	T1 inundado	0.09	14.00	0.76	0.75
136	T2 secas	0.09	15.40	1.50	0.82



Av. La Molina s/n Campus UNALM
Telf.: 614-7800 Anexo 222 Teléfono Directo: 349-5622
e-mail: labsuelo@lamolina.edu.pe

Figura 41: Análisis de suelo después de la siembra realizado en el laboratorio de análisis de suelo, plantas, aguas y fertilizantes de la facultad de agronomía de la UNALM

ANEXO 3: Datos climáticos durante la campaña evaluada

Tabla 7: Datos climáticos ingresados al programa Aquacrop

Fecha	Precipitación (mm)	T° min.	T° max.	Hum. %	Vel. Viento (m/s)	Heliofania (horas y decim.)
27/11/2018	0	17.9	25.1	75.9	0.9	8.7
28/11/2018	0	16.2	24.8	77.5	0.6	4.6
29/11/2018	0	15.1	23.8	79.2	0.8	9.2
30/11/2018	0	17.7	23.9	81.0	0.8	3.1
1/12/2018	0	18.3	24.9	79.2	0.8	5.7
2/12/2018	0	16.1	24.4	81.0	0.7	7.1
3/12/2018	0	18.1	23.9	81.6	0.8	2.5
4/12/2018	0	16.9	25.2	77.1	0.8	8.3
5/12/2018	0	18.2	25.2	78.0	0.8	5.1
6/12/2018	0	15.4	23.5	88.7	0.2	10.4
7/12/2018	0.2	18.1	24.7	76.5	0.9	7.2
8/12/2018	0	16.4	24.2	85.5	0.5	4.5
9/12/2018	0	17.4	24.4	80.2	0.8	8.9
10/12/2018	0	16.4	25.6	79.6	0.8	9.2
11/12/2018	0	17.1	25.2	82.7	0.6	2
12/12/2018	0	17.2	26.2	81.5	0.7	2.9
13/12/2018	0	16.9	25.9	82.1	0.8	3.3
14/12/2018	0	18.2	27.7	77.2	0.8	10.5
15/12/2018	0	19.1	26.9	79.9	0.8	8.7
16/12/2018	0	18.3	26.9	81.4	0.7	9.3
17/12/2018	0	18.6	26.2	82.0	0.9	4.6
18/12/2018	0	19.1	25.4	79.9	1.0	6.5
19/12/2018	0	18	29.6	77.4	1.0	10.1
20/12/2018	0	19.2	27.9	76.8	1.1	8.6
21/12/2018	0	19.2	26.9	80.4	1.1	5.6
22/12/2018	0	19.3	27.8	83.2	1.1	4.6
23/12/2018	0	18.9	26.1	85.8	1.1	3.7
24/12/2018	0	19.2	21.3	91.0	0.8	0
25/12/2018	0	18.9	27.4	76.2	1.2	2.3
26/12/2018	0	17.8	27.7	78.8	1.0	3.9
27/12/2018	0	16.8	27.8	80.0	1.0	6.7
28/12/2018	0	18.2	28	82.0	0.9	6
29/12/2018	0	19.9	27.4	79.6	1.0	5.5
30/12/2018	0	20.1	27	77.4	1.1	5.8
31/12/2018	0	19.3	24.6	84.0	1.0	0
1/01/2019	0	19.9	25.4	83.3	0.8	4.4
2/01/2019	0	19.7	26.6	80.0	0.8	8
3/01/2019	0	20	25.5	81.5	0.6	0.7
4/01/2019	0	19.6	27.1	80.1	0.8	0
5/01/2019	0	20.4	27.4	80.3	0.8	7.6
6/01/2019	0	20.4	24.6	81.3	0.5	0

“Continuación”

7/01/2019	0	20.9	28.4	74.9	0.6	2.2
8/01/2019	0	19.1	28	75.8	0.6	2.1
9/01/2019	0	20.6	28.9	73.6	0.8	6.5
10/01/2019	0	21.3	25.3	81.2	0.4	0
11/01/2019	0	21.2	29.1	76.2	0.6	2.1
12/01/2019	0	21	27.4	76.9	0.8	1
13/01/2019	0	20.1	26.8	84.1	0.8	2.3
14/01/2019	0	19.7	26.7	83.8	0.7	1.2
15/01/2019	0	20.2	27.4	80.8	0.8	5.6
16/01/2019	0	19.6	25.5	86.0	0.6	0.5
17/01/2019	0	19.2	24.5	87.0	0.7	3.6
18/01/2019	0.4	19.6	25.9	85.0	0.6	0.4
19/01/2019	0	19	27.3	83.2	0.7	8.5
20/01/2019	0	18.8	27.4	82.9	0.7	5.8
21/01/2019	0.2	19.7	27.3	81.2	0.6	0.5
22/01/2019	0	20.6	28.9	76.3	0.6	6.2
23/01/2019	0	20.5	28.7	79.1	0.7	5.2
24/01/2019	0	20.4	28	82.8	0.8	5.4
25/01/2019	0	20.9	28.9	81.3	0.8	6.4
26/01/2019	0	21.3	29.1	74.1	0.8	7.3
27/01/2019	0	21.4	28.6	80.5	0.8	5.7
28/01/2019	0	22.4	30.7	74.9	0.6	3.1
29/01/2019	0	23.3	29.9	70.2	0.6	1.2
30/01/2019	0	22.4	31.3	70.1	0.6	3.6
31/01/2019	0	21.9	29.2	74.4	0.7	7
1/02/2019	0	22.5	30.4	71.9	0.7	6.8
2/02/2019	0	21.8	29.4	75.3	0.8	8
3/02/2019	0	22.2	29.4	78.8	0.9	8.3
4/02/2019	0.2	23	28.6	82.0	0.6	0
5/02/2019	0.2	22.3	30.4	78.0	0.7	7
6/02/2019	0.2	22.4	28.7	84.1	0.7	1.5
7/02/2019	0	22.4	30.6	79.5	0.8	5.6
8/02/2019	0	22.2	27.2	83.9	0.6	0
9/02/2019	0	22	30.7	76.7	0.7	5
10/02/2019	0	22.8	31.4	75.8	0.9	7
11/02/2019	0	22.4	28.1	82.2	0.7	1.7
12/02/2019	0	22.4	29.3	84.3	0.5	0.6
13/02/2019	0	22.2	29.9	84.3	0.6	2
14/02/2019	0	22.1	29.9	81.4	0.7	6.1
15/02/2019	0	22	30.9	77.2	0.6	0.5
16/02/2019	0	22.2	30.7	74.4	0.8	9.9
17/02/2019	0	20.9	29.8	76.6	0.7	6.1
18/02/2019	0	22.3	29.9	73.9	0.6	0.4
19/02/2019	0	22.1	29.9	73.6	0.7	5.4
20/02/2019	0	23.3	32.1	63.3	0.7	4.2

“Continuación”

21/02/2019	0	21.9	33.5	57.6	0.7	7.9
22/02/2019	0	21.4	28.4	77.8	0.8	8.4
23/02/2019	0	21.6	28.4	79.7	0.9	8.3
24/02/2019	0	21	28.6	75.8	0.7	4.9
25/02/2019	0	22.8	30.3	71.0	0.5	1.1
26/02/2019	0	22.9	29.9	68.9	0.6	3.7
27/02/2019	0	21.3	30.6	71.0	0.6	8.8
28/02/2019	0	21.2	31.2	70.2	0.7	6.9
1/03/2019	0	22	30.7	71.5	0.7	8.9
2/03/2019	0	22.1	31	69.1	0.7	10.3
3/03/2019	0	21.2	29.9	71.6	0.7	10
4/03/2019	0	20.9	29.4	74.3	0.6	3.1
5/03/2019	0	21.6	30	73.6	0.7	8.7
6/03/2019	0	21.1	29.2	77.1	0.5	1.3
7/03/2019	0.2	20.9	29.3	77.8	0.6	7.3
8/03/2019	0	21.6	30.3	73.7	0.7	7.9
9/03/2019	0	21.8	29.9	72.3	0.7	6.4
10/03/2019	0	22.6	29.7	74.3	0.7	5.6
11/03/2019	0	21.8	30.2	70.7	0.7	10.7
12/03/2019	0	21.4	30	74.0	0.7	9.4
13/03/2019	0	21.3	30.9	74.4	0.7	10
14/03/2019	0	21.2	30.5	74.9	0.7	4.9
15/03/2019	0	20.9	28.9	78.6	0.6	6.7
16/03/2019	0	20.5	29.2	77.4	0.7	10.5
17/03/2019	0	19.7	29.5	75.9	0.8	8.1
18/03/2019	0	19.8	29	76.5	0.7	6.7
19/03/2019	0	19.4	28.9	75.6	0.7	10
20/03/2019	0	19.5	28.3	74.9	0.7	8.2
21/03/2019	0	19.1	27.8	75.3	0.7	8.3
22/03/2019	0	19.3	27.1	76.0	0.8	8.5
23/03/2019	0	19	27.6	75.8	0.8	9
24/03/2019	0	19.6	28.4	76.9	0.8	5.8
25/03/2019	0	18.9	28.1	77.5	0.8	9.5
26/03/2019	0	18.4	27.3	79.7	0.7	8
27/03/2019	0	18.5	27.8	77.9	0.6	8.3
28/03/2019	0	20.3	27.6	78.2	0.6	2.5
29/03/2019	0	19	27.2	79.8	0.6	3.9
30/03/2019	0	19.2	28.3	77.9	0.6	7.5
31/03/2019	0	19.6	27.6	76.5	0.7	9.4
1/04/2019	0	18.5	24.8	82.0	0.7	0.7
2/04/2019	0	18.4	26	83.3	0.7	5.2
3/04/2019	0	18.9	26.9	79.3	0.7	9.2
4/04/2019	0	19.9	26.4	81.2	0.6	4.5
5/04/2019	0	19.7	27.4	81.8	0.8	7.6
6/04/2019	0	20.6	28.5	79.4	0.7	4.7

“Continuación”

7/04/2019	0	19.2	26.6	82.6	0.6	5.9
8/04/2019	0	19.7	28.4	78.1	0.8	9.7
9/04/2019	0	18.7	26.2	78.8	0.7	9.7
10/04/2019	0	17.4	26.1	79.4	0.7	9.5
11/04/2019	0	17.6	26.6	76.5	0.6	9.7
12/04/2019	0	18.2	27.6	76.0	0.6	9.5
13/04/2019	0	17.9	26.3	78.1	0.6	9.6
14/04/2019	0	18	27.2	78.1	0.6	7.2
15/04/2019	0	17.5	28	75.7	0.6	9.5
16/04/2019	0	18.4	27.6	77.4	0.6	7.7
17/04/2019	0	18.7	27.9	77.7	0.6	8.6
18/04/2019	0	18	26.1	79.8	0.5	5.7
19/04/2019	0	18.4	27.3	78.4	0.6	9
20/04/2019	0	18.5	27.9	77.9	0.6	9.7
21/04/2019	0	18.7	27.9	77.0	0.5	9.6
22/04/2019	0	18.7	27.4	77.0	0.6	7.5
23/04/2019	0	19	27.7	77.5	0.7	9.9
24/04/2019	0	19.6	26.1	80.5	0.6	2.1
25/04/2019	0	19.2	26.7	82.3	0.7	3.3
26/04/2019	0	18.8	27.1	83.7	0.6	4.5
27/04/2019	0	17.9	25.3	84.9	0.6	6.2
28/04/2019	0	17.4	24.8	85.1	0.5	3.2
29/04/2019	0	17.9	26.4	81.8	0.5	3.5
30/04/2019	0	17.9	26.1	79.6	0.6	8.6
1/05/2019	0	17.9	25.8	81.5	0.6	7
2/05/2019	0	17	25.5	83.5	0.5	8
3/05/2019	0	17.1	22.7	82.9	0.6	0
4/05/2019	0	16.5	26.4	78.8	0.5	5.8
5/05/2019	0	18	27.5	78.6	0.6	4.5
6/05/2019	0	18.2	26.2	82.4	0.7	3.3
7/05/2019	0	17.4	21	89.3	0.4	0
8/05/2019	0	17.7	23.7	84.5	0.6	1.7
9/05/2019	0	16.9	24.6	82.6	0.6	7.7
10/05/2019	0	17.3	21.7	88.1	0.5	0

ANEXO 4: Lámina de riego para el cultivo de arroz

Tabla 8: Lámina de riego en mm regadas para T1 y T2

DDS	Fecha	T1	T2	DDS	Fecha	T1	T2	DDS	Fecha	T1	T2	DDS	Fecha	T1	T2
1	27/11/2018	0.00	23.93	43	8/01/2019	33.40	0.00	85	19/02/2019	16.70	60.90	127	2/04/2019	39.23	21.75
2	28/11/2018	0.00	21.75	44	9/01/2019	57.48	43.50	86	20/02/2019	25.33	0.00	128	3/04/2019	0.00	21.75
3	29/11/2018	0.00	21.75	45	10/01/2019	29.51	0.00	87	21/02/2019	56.55	0.00	129	4/04/2019	46.30	30.45
4	30/11/2018	14.14	25.01	46	11/01/2019	35.70	0.00	88	22/02/2019	20.32	0.00	130	5/04/2019	35.87	26.10
5	1/12/2018	0.00	28.28	47	12/01/2019	12.37	0.00	89	23/02/2019	18.56	0.00	131	6/04/2019	0.00	21.75
6	2/12/2018	0.00	37.52	48	13/01/2019	15.02	0.00	90	24/02/2019	7.07	0.00	132	7/04/2019	44.89	26.10
7	3/12/2018	35.00	23.93	49	14/01/2019	0.00	0.00	91	25/02/2019	28.27	60.90	133	8/04/2019	14.14	26.10
8	4/12/2018	9.94	21.75	50	15/01/2019	23.15	0.00	92	26/02/2019	42.41	26.10	134	9/04/2019	40.64	26.10
9	5/12/2018	6.36	65.25	51	16/01/2019	19.62	60.90	93	27/02/2019	15.90	0.00	135	10/04/2019	0.00	26.10
10	6/12/2018	34.61	51.66	52	17/01/2019	20.32	0.00	94	28/02/2019	31.81	0.00	136	11/04/2019	0.00	26.10
11	7/12/2018	34.90	34.80	53	18/01/2019	43.83	0.00	95	1/03/2019	14.14	0.00	137	12/04/2019	0.00	0.00
12	8/12/2018	16.49	26.10	54	19/01/2019	26.68	0.00	96	2/03/2019	0.00	0.00	138	13/04/2019	0.00	21.75
13	9/12/2018	28.27	52.20	55	20/01/2019	30.57	0.00	97	3/03/2019	76.87	0.00	139	14/04/2019	66.27	21.75
14	10/12/2018	29.60	52.20	56	21/01/2019	19.14	0.00	98	4/03/2019	89.24	69.60	140	15/04/2019	0.00	21.75
15	11/12/2018	44.89	34.80	57	22/01/2019	16.26	60.90	99	5/03/2019	35.34	26.10	141	16/04/2019	0.00	0.00
16	12/12/2018	35.96	34.80	58	23/01/2019	13.25	26.10	100	6/03/2019	41.94	26.10	142	17/04/2019	0.00	0.00
17	13/12/2018	26.42	36.36	59	24/01/2019	34.02	0.00	101	7/03/2019	86.59	26.10	143	18/04/2019	49.48	21.75
18	14/12/2018	38.70	35.45	60	25/01/2019	36.58	0.00	102	8/03/2019	35.78	21.75	144	19/04/2019	-	26.1
19	15/12/2018	31.72	34.80	61	26/01/2019	25.62	0.00	103	9/03/2019	14.14	26.10	145	20/04/2019	-	0
20	16/12/2018	30.93	34.80	62	27/01/2019	28.80	0.00	104	10/03/2019	23.41	26.10	146	21/04/2019	-	21.75
21	17/12/2018	26.68	0.00	63	28/01/2019	18.26	0.00	105	11/03/2019	34.46	0.00	147	22/04/2019	-	21.75
22	18/12/2018	28.01	34.80	64	29/01/2019	11.75	60.90	106	12/03/2019	59.20	26.10	148	23/04/2019	-	21.75
23	19/12/2018	28.27	21.75	65	30/01/2019	15.02	0.00	107	13/03/2019	0.00	29.58	149	24/04/2019	-	21.75
24	20/12/2018	20.00	17.40	66	31/01/2019	13.25	0.00	108	14/03/2019	0.00	26.10	150	25/04/2019	-	21.75
25	21/12/2018	17.67	26.10	67	1/02/2019	45.59	0.00	109	15/03/2019	21.21	26.10	151	26/04/2019	-	21.75
26	22/12/2018	32.40	0.00	68	2/02/2019	6.19	0.00	110	16/03/2019	41.88	30.45	152	27/04/2019	-	21.75
27	23/12/2018	11.78	21.75	69	3/02/2019	15.90	0.00	111	17/03/2019	17.67	21.75	153	28/04/2019	-	21.75
28	24/12/2018	11.78	34.80	70	4/02/2019	30.04	0.00	112	18/03/2019	38.88	21.75	154	29/04/2019	-	0
29	25/12/2018	20.00	26.10	71	5/02/2019	14.05	60.90	113	19/03/2019	154.63	26.10	155	30/04/2019	-	21.75
30	26/12/2018	21.21	0.00	72	6/02/2019	19.44	0.00	114	20/03/2019	38.88	21.75	156	1/05/2019	-	-
31	27/12/2018	17.67	0.00	73	7/02/2019	12.10	0.00	115	21/03/2019	16.35	30.45	157	2/05/2019	-	-
32	28/12/2018	0.00	25.56	74	8/02/2019	37.99	0.00	116	22/03/2019	0.00	26.10	158	3/05/2019	-	-
33	29/12/2018	16.56	0.00	75	9/02/2019	12.55	0.00	117	23/03/2019	37.11	21.75	159	4/05/2019	-	-
34	30/12/2018	16.79	0.00	76	10/02/2019	14.84	0.00	118	24/03/2019	28.27	26.10	160	5/05/2019	-	-
35	31/12/2018	0.00	26.10	77	11/02/2019	28.19	0.00	119	25/03/2019	44.77	30.45	161	6/05/2019	-	-
36	1/01/2019	25.00	17.40	78	12/02/2019	4.86	0.00	120	26/03/2019	33.58	26.10	162	7/05/2019	-	-
37	2/01/2019	18.84	0.00	79	13/02/2019	0.00	60.90	121	27/03/2019	8.84	21.75	163	8/05/2019	-	-
38	3/01/2019	51.34	0.00	80	14/02/2019	9.72	0.00	122	28/03/2019	0.00	26.10				
39	4/01/2019	18.02	0.00	81	15/02/2019	13.17	0.00	123	29/03/2019	0.00	26.10				
40	5/01/2019	30.04	15.23	82	16/02/2019	28.63	0.00	124	30/03/2019	26.51	21.75				
41	6/01/2019	33.58	0.00	83	17/02/2019	17.67	0.00	125	31/03/2019	37.82	21.75				
42	7/01/2019	48.53	13.05	84	18/02/2019	27.69	0.00	126	1/04/2019	5.30	26.10				

ANEXO 5: Resultados de la calibración en el programa Aquacrop

T1: Resultados finales de la calibración para biomasa y rendimiento del programa Aquacrop

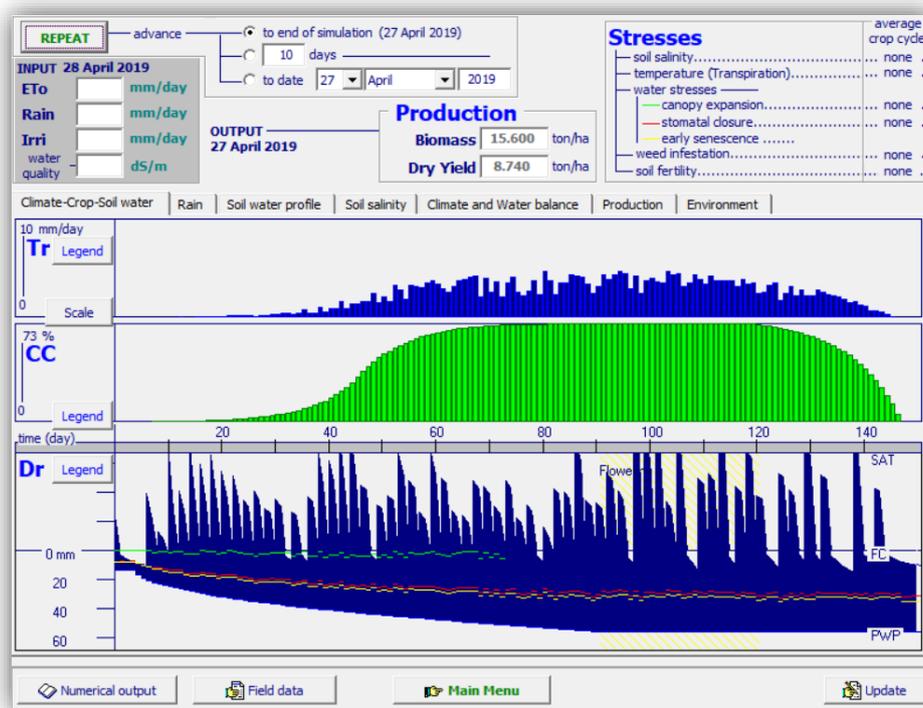
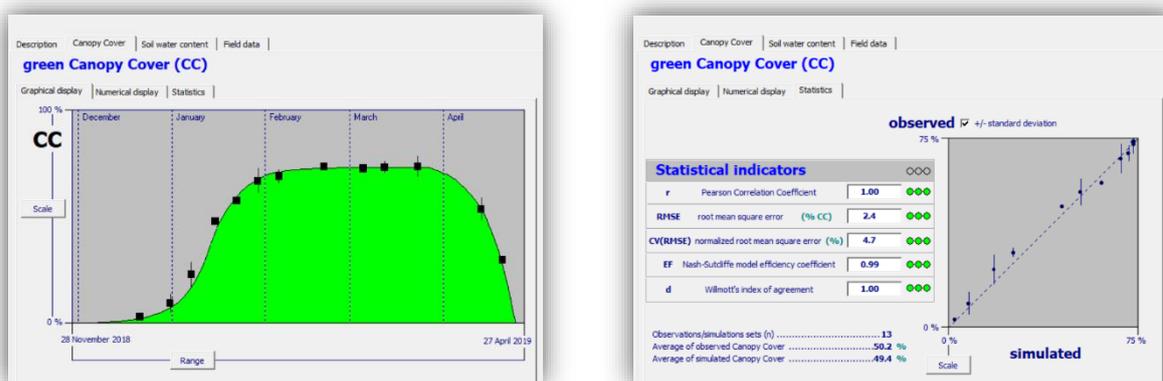


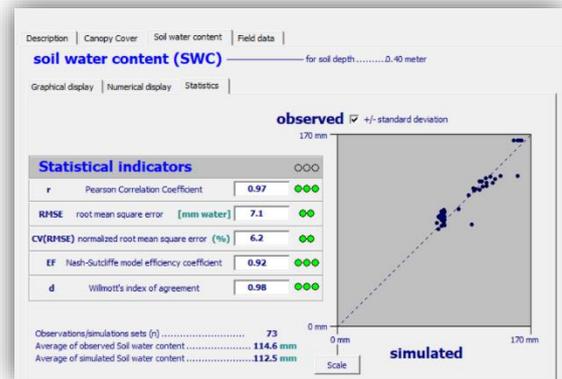
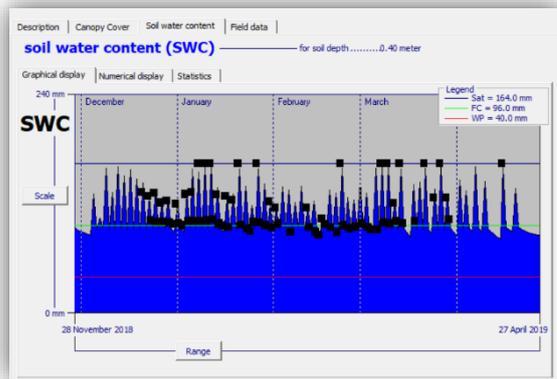
Figura 42: Interfaz del programa Aquacrop dónde se muestra la biomasa, rendimiento transpiración y cobertura del dosel de T1



a) Resultados observados y simulados de la cobertura del dosel para T1.

b) Resultados de los parámetros estadísticos de la cobertura del dosel para T1.

Figura 43: Resultados calibrados de la cobertura del dosel del programa Aquacrop para T1



a) Resultados observados y simulados de la humedad del suelo para T1.

b) Resultados de los parámetros estadísticos de la humedad del suelo para T1.

Figura 44: Resultados calibrados de la humedad del suelo del programa Aquacrop para T1
T2: Resultados finales de la calibración para biomasa y rendimiento del programa Aquacrop

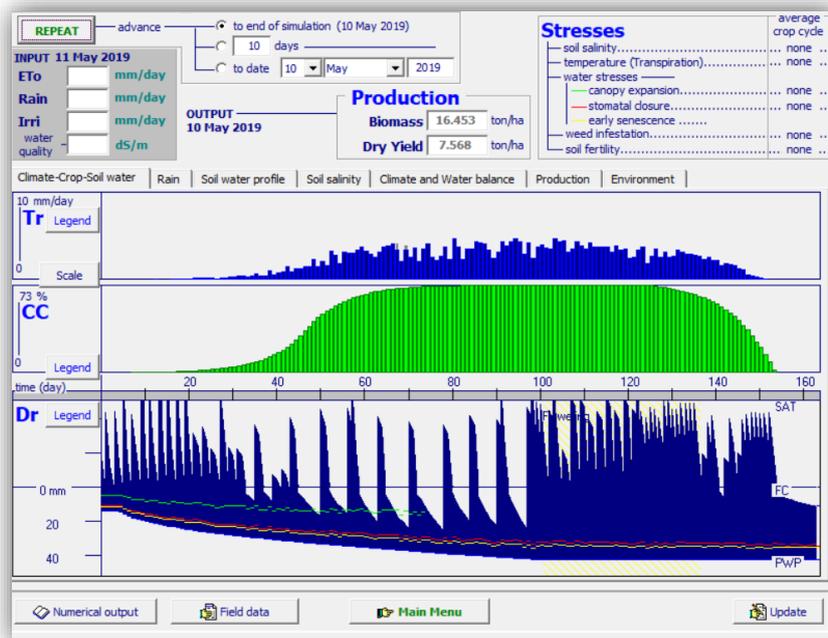
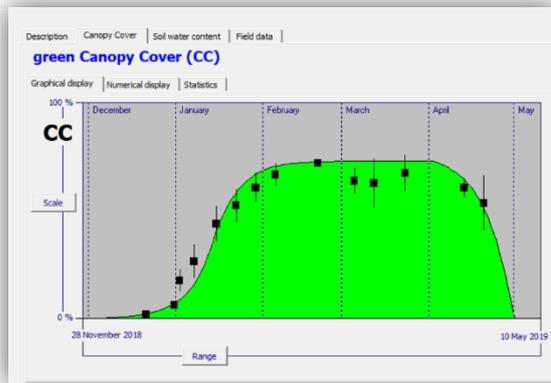
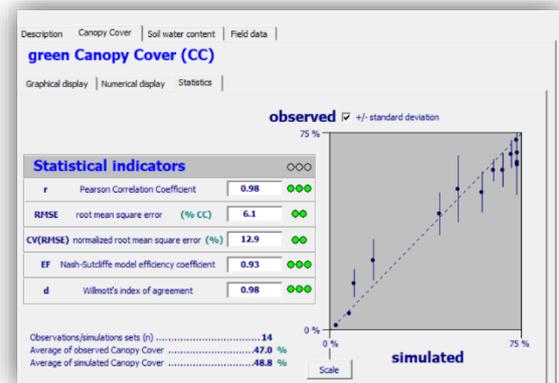


Figura 45: Interfaz del programa Aquacrop dónde se muestra la biomasa, rendimiento transpiración y cobertura del dosel de T2

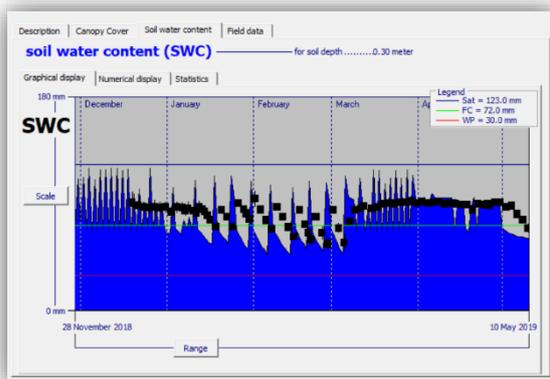


a) Resultados observados y simulados de la cobertura del dosel para T2.

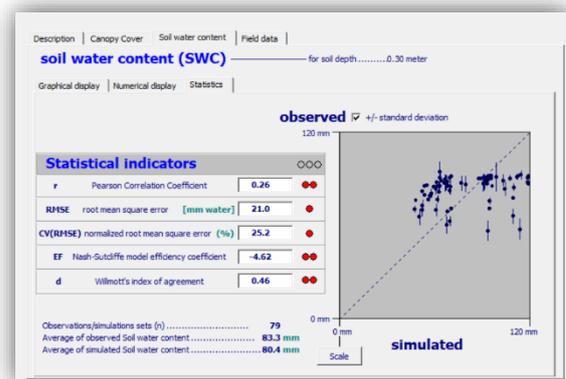


b) Resultados de los parámetros estadísticos de la cobertura del dosel para T2.

Figura 46: Resultados calibrados de la cobertura del dosel del programa Aquacrop para T2



a) Resultados observados y simulados de la humedad del suelo para T2.



b) Resultados de los parámetros estadísticos de la humedad del suelo para T2.

Figura 47: Resultados calibrados de la humedad del suelo del programa Aquacrop para T2