

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN RIEGO Y DRENAJE**



**“COEFICIENTE DEL CULTIVO (K_c) DEL ARROZ A PARTIR DE
LISÍMETROS DE DRENAJE EN LA MOLINA, LIMA-PERÚ”**

**Presentada por:
ELFER NEIRA HUAMÁN**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE
MAGISTER SCIENTIAE EN RIEGO Y DRENAJE**

**Lima – Perú
2019**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN RIEGO Y DRENAJE**

**“COEFICIENTE DEL CULTIVO (K_c) DEL ARROZ A PARTIR
DE LISÍMETROS DE DRENAJE EN LA MOLINA, LIMA-PERÚ”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE
MAGISTER SCIENTIAE EN RIEGO Y DRENAJE**

**Presentada por:
ELFER NEIRA HUAMÁN**

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Dr. Néstor Montalvo Arquíñigo
PRESIDENTE

Dra. Lía Ramos Fernández
PATROCINADORA

Mg.Sc. Luis Razuri Ramírez.
CO-PATROCINADOR

Ph.D. Absalón Vásquez Villanueva
MIEMBRO

Mg.Sc. Miguel Sánchez Delgado
MIEMBRO

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres Sindulfo Neira H. y María Teo Huamán H., responsables de inculcarme la pasión por la agricultura.

De igual manera a mi hijo Jesús Adrián Neira S. mi esposa Maribel Saldaña, por ser la fuente de mi motivación para seguir adelante.

A mis hermanos Olivia y Aníbal quienes son mis fieles confidentes en el camino de la vida.

Agradecimiento

*Agradezco a Dios por otorgarme su bendición en cada proyecto.
A mis padres, hijo, esposa y hermanos, por su incondicional apoyo y constante motivación.
Al Programa Nacional de Innovación Agraria (PNIA) que otorgo los recursos económicos
y al programa de maestría Riego y Drenaje que hizo posible.
A mi patrocinadora Dra. Lía Ramos Fernández, por su invitación al formar parte del
equipo de investigación en el Área Experimental de Riego-UNALM, por su dedicación y
velar que el presente documento sea un aporte científico y técnico en favor al agro.
A mi copatrocinador MSc. Luis Razuri Ramírez por su incondicional apoyo en la revisión
del presente documento y sus enseñanzas en el programa de maestría Riego y Drenaje.*

ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1.	EL ARROZ EN PERÚ Y EL MUNDO.....	3
2.2.	FENOLOGÍA DEL ARROZ.....	4
2.3.	EL RIEGO EN EL CULTIVO DE ARROZ.....	6
2.4.	EVAPOTRANSPIRACIÓN	8
2.4.1.	Evapotranspiración de referencia (ET _o) por el método FAO Penman-Monteith	8
2.4.2.	Evapotranspiración del cultivo (ET _c) por balance hídrico	10
2.4.3.	Coefficiente del cultivo (K _c)	11
2.4.4.	Lisímetro	15
III.	METODOLOGÍA	16
3.1.	ZONA DE ESTUDIO	16
3.1.1.	Clima.....	16
3.1.2.	Agua de riego y suelo.....	17
3.2.	MATERIALES Y EQUIPOS.....	19
3.2.1.	Componentes en la construcción del lisímetro drenaje.....	21
3.3.	PROCEDIMIENTO	21
3.3.1.	Actividades preliminares e instalación del experimento.....	21
3.3.2.	Estimación de la evapotranspiración de referencia ET _o	23
3.3.3.	Estimación de la evapotranspiración del cultivo ET _c	23
3.3.4.	Determinación del coeficiente de cultivo (K _c)	24
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	25
4.1.	EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA (ET _o).....	25
4.2.	EVAPOTRANSPIRACION DEL CULTIVO DE ARROZ (ET _c) IR71706.....	28
4.3.	COEFICIENTE DE CULTIVO (K _c) DEL ARROZ IR 71706	37

4.3.1. Kc del arroz IR 71706 según las etapas definidas por la FAO	38
4.3.2. Eficiencia del uso del agua (EUA).....	40
V. CONCLUSIONES	42
VI. RECOMENDACIONES	43
VII. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS	44
VIII. ANEXOS	48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Área cosechada y producción de arroz por departamento años 2015 - 2016.....	4
Tabla 2: Valores de Kc del arroz propuesto por la FAO	12
Tabla 3: Kc del arroz en estación seca y estación húmeda.....	13
Tabla 4: Kc del arroz inundado en nueve regiones de Corea	13
Tabla 5: Condiciones climáticas en la UNALM (2000-2010)	17
Tabla 6: Resultados del análisis de suelo	17
Tabla 7: Parámetros hídricos del suelo.....	18
Tabla 8: Características del agua de riego	18
Tabla 9: Materiales, equipos y herramientas computacionales	20
Tabla 10: Componentes en la construcción del lisímetro drenaje	21
Tabla 11: Datos meteorológicos monitoreados durante la investigación	25
Tabla 12: Evapotranspiración obtenida por el método FAO Penman – Monteith	27
Tabla 13: Variables registradas para la obtención de la ETc y Kc.....	29
Tabla 14: Altura de planta y número de macollos del arroz IR 71706.....	32
Cuadro 15: Kc obtenido por etapas fenológicas	37
Tabla 16: Kc obtenido comparado con otros investigadores.....	39
Tabla 17: Eficiencia del uso de agua (EUA)	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Desarrollo fenológico del cultivo de arroz.....	5
Figura 2: Características del cultivo de referencia	9
Figura 3: Kc del arroz reportados por la FAO (2006) y otros investigadores	14
Figura 4: Ubicación de la zona de estudio.....	16
Figura 5: Lisímetro de drenaje: vista en 3D (izquierda) y perfil (derecha).....	22
Figura 6: Variación temporal de la temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación Solar del 20/12/17 al 30/04/18.....	26
Figura 7: Variación temporal de la ETo del 20/12/17 al 30/04/18.....	28
Figura 8: variables monitoreadas para el balance de humedad del suelo	33
Figura 9: Variación temporal de la ETo, ETc y transpiración.....	34
Figura 10: Comportamiento de la ETo, ETc, transpiración y evaporación acumulada	35
Figura 11: Variación temporal de la Alt. planta y macollamiento del arroz IR 71706	35
Figura 12: Ciclo del cultivo del arroz variedad IR 71706	36
Figura 13: Variación temporal del Kc diario (panel superior) y por etapa fenológica (panel inferior).....	38
Figura 14: Kc según las etapas definidas por la FAO	39
Figura 15: Kc obtenido comparado con el Kc de la FAO y otros	40

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: TRANSPIRACIÓN Y EVAPORACIÓN	48
ANEXO 2: CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL SENSOR GS1	51
ANEXO 3: CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL SENSOR TDR-350.....	52
ANEXO 4: ANALISIS DEL SUELO	53
ANEXO 5: CAPACIDAD DE CAMPO Y PUNTO DE MARCHITEZ DEL SUELO.....	55
ANEXO 6: ANALISIS DEL AGUA DE RIEGO.....	56
ANEXO 7: PANEL FOTOGRÁFICO	58

RESUMEN

La presente investigación se realizó en el Área Experimental de Riego (AER) de la UNALM, ubicada en el distrito de la Molina – Lima, a una altitud de 243.7 m.s.n.m. Al respecto, se estimó la evapotranspiración de referencia (ET_o) con el método FAO Penman-Monteith (Allen *et al.*, 2006) a partir de información obtenida de una estación meteorológica automática Davis y la evapotranspiración del cultivo (ET_c) de arroz variedad IR 71706 de duración entre diciembre del 2017 a abril del 2018, se calculó con información obtenida de un lisímetro de drenaje. Se registraron lecturas diarias de riego, variación de humedad del suelo y precipitación para realizar el balance de humedad del suelo y determinar así la evapotranspiración del cultivo y obtener los valores del coeficiente del cultivo durante el ciclo del cultivo. Así se obtuvo la ET_c, cuyo valor máximo diario fue de 9.19 mm *día*⁻¹ en la fase reproductiva (estado de huso y floración) y el mínimo de 1.35 mm *día*⁻¹ en la etapa final del cultivo y un promedio de 5.02 mm *día*⁻¹. La ET_c total durante la investigación fue de 658.23 mm para 587 macollos m⁻² y una altura promedio de 80 cm. Los coeficientes del cultivo K_c inicial, K_c medio y K_c final, variaron en el rango de (0.9, 1.70, 0.84) respectivamente.

Palabras claves: arroz, evapotranspiración del cultivo, evapotranspiración de referencia, coeficiente del cultivo, balance de humedad del suelo.

ABSTRACT

The present investigation was carried out in the Experimental Area of Irrigation (EAI) of the UNALM- District of La Molina - Lima, at an altitude of 243.7 m.s.n.m. In this regard, the reference evapotranspiration (ET_o) was estimated with the FAO Penman-Monteith method (Allen et al, 2006) from information obtained from a Davis automatic weather station and the crop evapotranspiration (ET_c) of rice variety IR 71706 of duration between December 2017 to April 2018, was calculated with information obtained from a drainage lysimeter. Daily irrigation readings, variation of soil moisture and precipitation were recorded to perform the soil moisture balance and thus determine the crop evapotranspiration and obtain the values of the crop coefficient during the crop cycle. Thus the ET_c was obtained, whose maximum daily value was 9.19 mm *day*⁻¹ in the reproductive phase (state of spindle and flowering) and the minimum of 1.35 mm *day*⁻¹ in the final stage of cultivation and an average of 5.02 mm *day*⁻¹. The total ET_c during the investigation was 658.23 mm for 587 tillers m⁻² and an average height of 80 cm. The coefficients of the initial K_c culture, medium K_c and final K_c, varied in the range of (0.9, 1.70, 0.84) respectively.

Key words: *rice, crop evapotranspiration, reference evapotranspiration, crop coefficient, soil moisture balance.*

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años el problema de la escasez de agua ha cobrado mayor importancia, lo cual ha generado preocupación y un debate creciente, a pesar que la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), ubica al Perú en el puesto 17 del ranking de los países del mundo con mayor disponibilidad de agua, donde el 86 por ciento del agua dulce es para satisfacer la demanda agrícola (Tabra 2013).

Existen problemas con respecto a la dotación y aplicación del riego en gran medida por el desconocimiento del coeficiente del cultivo (K_c) y la eficiencia de aplicación del riego para condiciones locales. Dentro del sistema agua-suelo-planta, parte del agua aportada ya sea por precipitación o por riego, se pierde por percolación profunda, escorrentía superficial y por evapotranspiración; siendo la evapotranspiración la pérdida de agua debido a la evaporación directa de la superficie del suelo y la transpiración como respuesta de las necesidades hídricas de la planta para su crecimiento y desarrollo (Allen *et al.* 2006). El riego es importante y su optimización mejora la productividad del cultivo, por ello se debe contar con técnicas que permitan ahorrar agua mejorando la eficiencia de aplicación de manera especial en el cultivo de arroz por la alta demanda hídrica y la importancia en la alimentación mundial.

Un método directo para la evaluación del balance hídrico en el sistema, agua-suelo-planta es aislar una parte del sistema mediante lisímetros que permiten para medir el ingreso y salida de agua del suelo.

El uso del lisímetro aportará información útil para estimar la evapotranspiración del cultivo (ET_c) y cuantificar el K_c a lo largo de todo el ciclo del cultivo y satisfacer las necesidades hídricas del arroz, racionalizando su uso y su disponibilidad hídrica en el suelo. Es decir, la estimación del K_c basado en el clima local, la variedad y las condiciones de manejo del riego para el arroz permitirá tener información para optimizar la programación del riego y la eficiencia del uso del agua (EUA) seguido de buenos rendimientos del cultivo.

En el Perú, los últimos diez años, la producción nacional de arroz cascara aumentó de 1 962,000 toneladas a 2 783,000 toneladas, representando una tasa anual promedio del 4.2 por ciento con un consumo de agua entre $12\ 000\ m^3\ ha^{-1}$ y $20\ 000\ m^3\ ha^{-1}$ (Heros 2012).

Por otro lado, es trascendental establecer con precisión los momentos críticos del cultivo con respecto a las necesidades hídricas, clima local y el estado fenológico del cultivo para aportar el riego en oportunidad y cantidad adecuada. En ese sentido, determinar el Kc del arroz para las condiciones locales es de suma importancia para elaborar la “programación del riego”.

OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

El cambio climático, el acelerado crecimiento poblacional y la alta demanda de agua en la agricultura han motivado la presente investigación que consiste en cuantificar el coeficiente del cultivo (Kc), a partir de un lisímetro de drenaje en el Área Experimental de Riego (AER) de la UNALM. Esto se cumplió con los siguientes objetivos específicos.

- Determinar la evapotranspiración de referencia (ET_o) mediante el método FAO Penman-Monteith.
- Determinar la evapotranspiración del cultivo (ET_c) a partir de las medidas de un lisímetro de drenaje.
- Cuantificar el coeficiente del cultivo (Kc) empleando un lisímetro de drenaje.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 EL ARROZ EN PERÚ Y EL MUNDO

El arroz constituye la fuente de alimentación de 3 000 millones de personas en todo el mundo. La FAO ha aumentado su pronóstico de la producción mundial de arroz en 2017 en 2,9 millones de toneladas a 759,6 millones de toneladas, de las cuales, el 90 por ciento es producido y consumido en Asia. En todo el mundo, existen cerca de 158 millones de hectáreas de arroz inundado, de las cuales 101 millones de hectáreas corresponden a cosechas de arroz de riego y constituyen el 75 por ciento de la producción mundial de arroz, mientras que los 57 millones de hectáreas restantes corresponden a arroz de secano y contribuyen con el 19 por ciento de la producción mundial de arroz (FAO 2018, Bouman y Toung 2012).

En el Perú se tuvo en el 2016 un área cultivada de 419 563 hectáreas, con una producción de 3 165 749 toneladas. Este cultivo se desarrolla en 18 regiones, siendo las más importantes San Martín, Piura, Lambayeque, La Libertad y Amazonas, con 22.4, 18.6, 12.6, 10.6, 9,7 por ciento respectivamente de la producción nacional, como se muestra en la Tabla 1. Se espera que para la campaña 2017 - 2018 se siembre, 446 966 hectáreas según las intenciones de siembra (SIEA-MINAGRI 2016).

MINAG (2010) menciona que a nivel internacional los principales países consumidores de arroz son: Brunei (245 kg. /persona/año), Vietnam (166 kg. /persona/año), Laos (163 kg. /persona/año) y Bangladesh (160 kg. /persona/año). En el continente americano los más importantes consumidores de arroz son Cuba (64 kg. /persona/ año), Panamá (60 kg. /persona/año), Perú (56 kg. /persona/año) y Costa Rica (52 kg. /persona/año).

Tabla 1: Área cosechada y producción de arroz por departamento años 2015 - 2016

Región	Superficie cosechada (ha)			Producción (t)		
	2015	2016	%	2015	2016	%
Nacional	399 501	419 563	100	3 151 408	3 165 749	100
Amazonas	46 021	41 567	10	351 620	307 947	9.7
Ancash	4 190	6 795	2	49 530	65 150	2.1
Arequipa	20 339	19 939	5	263 434	250 051	7.9
Ayacucho	148	80	0	345	201	0
Cajamarca	25 393	24 886	6	200 309	195 641	6.2
Cusco	1 692	1 476	0	3 250	2 598	0.1
Huánuco	7 576	9 151	2	34 554	48 301	1.5
Junín	1 381	1 214	0	4 575	3 959	0.1
La Libertad	32 641	32 857	8	344 536	334 920	10.6
Lambayeque	49 452	49 831	12	455 188	399 038	12.6
Loreto	31 526	33 046	8	92 286	96 716	3.1
Madre de Dios	2 549	2 559	1	5 052	5 425	0.2
Pasco	3 065	2 777	1	4 783	3 881	0.1
Piura	57 559	67 373	16	503 241	589 687	18.6
Puno	255	283	0	463	516	0
San Martín	90 069	101 255	24	682 497	710 287	22.4
Tumbes	15 526	14 654	3	129 016	124 497	3.9
Ucayali	10 120	9 821	2	26 729	26 934	0.9

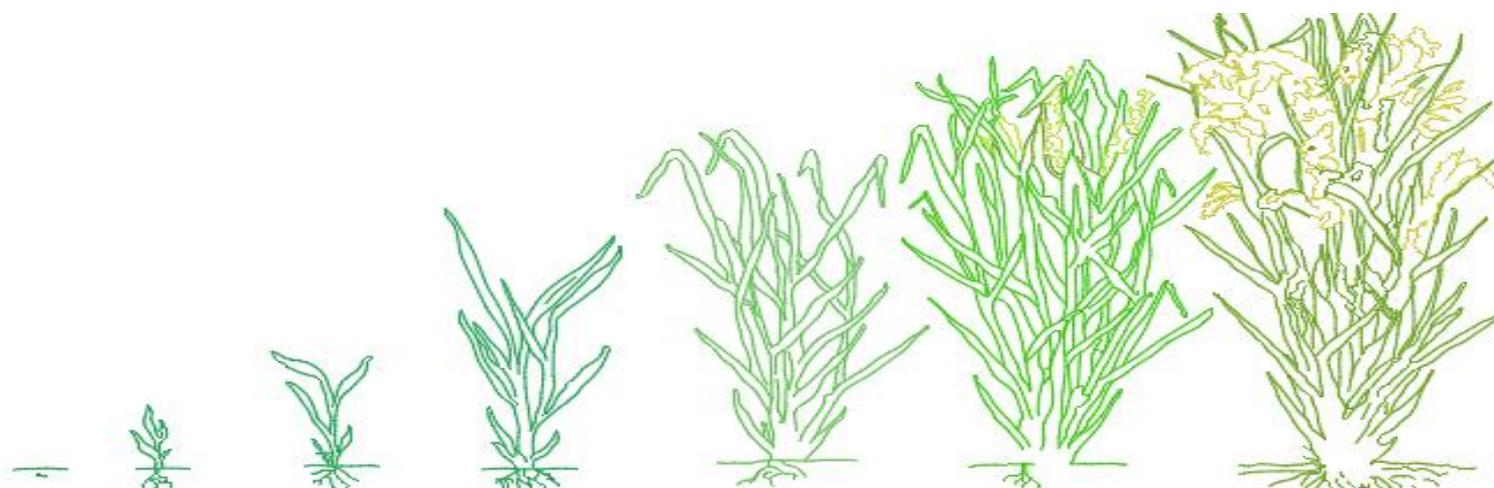
Fuente: SIEA-MINAGRI (2016)

2.2 FENOLOGIA DEL ARROZ

El arroz se cultiva por trasplante y siembra directa. El método por trasplante consiste en un establecer un vivero que las semillas se siembran al voleo en una superficie de suelo húmedo o inundada, a una proporción de 500 a 800 $kg\ ha^{-1}$.

Al momento del trasplante (12-25 días después del establecimiento para las variedades modernas, o de 40 días o más para las variedades tradicionales), se siembra de dos a tres plántulas separadas entre 0.15 y 0.30 m. Cada planta desarrolla de tres a siete hijuelos, dependiendo del estado de los nutrientes, la variedad y la densidad de las plántulas. En un buen cultivo, la cantidad de panículas con granos llegará a 400-600 por m^2 en la estación seca de 300 a 400 por m^2 en la estación húmeda (Bouman y Tuong 2012).

En la Figura 1 se ilustra el desarrollo fenológico de la planta de arroz y el número de días desde la plantación



Periodo fenológico	Crecimiento vegetativo				Crecimiento reproductivo			Maduración		
	Emergencia (1)	Plántula (2)	Macollaje (3)	Elongación del tallo (4)	Inicio de panoja (5)	Desarrollo de panoja (6)	Floración (7)	Maduración lechosa (8)	Maduración pastosa (9)	Maduración córnea (10)
Parte aérea	Emergencia (1)	Plántula (2)	Macollaje (3)	Elongación del tallo (4)	Inicio de panoja (5)	Desarrollo de panoja (6)	Floración (7)	Maduración lechosa (8)	Maduración pastosa (9)	Maduración córnea (10)
Parte radicular	Formación de raíces y tallos	Desarrollo y crecimiento de raíces								
Ocurrencia de la fase (dds*)	4-18	6-30	27-35	35-60	93-110	110-115	119-125	131-144	145-157	158-175
Temperatura óptima	28°C a 35°C	25°C a 30°C	25°C a 28°C	28°C a 31°C	28°C a 31°C	28°C a 31°C	30°C a 33°C	20°C a 25°C	20°C a 25°C	20°C a 25°C
Temperatura crítica	>10°C a 45°C	<12°C a 35°C	<16°C a 35°C	<12°C a 45°C	<15°C a 45°C	<15°C a 38°C	<22°C a 35°C	<22°C a 30°C	<12°C a 30°C	<12°C a 30°C
Humedad óptima	>65%	>65%	>65%	>65%	>65%	>65%	>65%	>65%	>65%	>65%
Déficit hídrico	Sensible	Sensible	Sensible	Sensible	Sensible	Sensible	Sensible	Tolerante	Tolerante	Tolerante

*dds: días después de la siembra

Figura 1. Desarrollo fenológico del cultivo de arroz

Fuente: Área Experimental de Riego-AER de la UNALM

Según el manual de observaciones fenológicas elaborado por el SENAMHI (Izarra y López 2011) el crecimiento fenológico del cultivo de arroz está caracterizado por las siguientes etapas:

- Emergencia: Cuando las semillas pre germinadas luego de haber sido voleadas en el almacigo, pasado un tiempo, empiezan a emitir su primera hoja a través del coleóptilo.
- Plántula: Las plantitas del almacigo presentan más de una hoja. En esta fase cuatro hojas emergen totalmente y la primera hoja muere al doceavo día.
- Macollaje: Aparece el primer macollo o hijuelo a partir de la yema axilar en uno de los nudos más inferiores de las plántulas trasplantadas. El momento de registro de la fase se da cuando el macollo tiene una longitud aproximada de un centímetro.
- Elongación del tallo: El cuarto entrenudo del tallo principal, debajo de la panoja empieza a hacerse notable en longitud, hasta cuando está totalmente elongado o hasta cuando la fase fenológica de inicio de la panoja comienza.
- Inicio de la panoja: Se aprecia el primordio de la panoja al removerse cuidadosamente la vaina de la hoja bandera que este alrededor del tallo principal o de un macollo, donde se podrá ver un cono blanco veloso de 1.0 a 1.5 mm de longitud, denominado “punto de algodón”.
- Desarrollo de la panoja: La panoja diferenciada es visible (se puede distinguir las espiguillas de la panoja) hasta cuando la punta de ella está justo por debajo del cuello de la hoja bandera.
- Floración: Momento en que la panoja emerge fuera de la vaina de la hoja bandera, seguido de la floración, luego las espiguillas de las panojas se abren para que las flores contenidas en su interior puedan polinizar y fecundar.
- Maduración lechosa: Los granos al ser presionados presentan un líquido acuoso o lechoso.
- Maduración pastosa: Los granos al ser presionados se extraen de ellos una masa blanda de color blanco.
- Maduración córnea: Los granos al ser presionados están duros.

2.3 EL RIEGO EN EL CULTIVO DE ARROZ

Heros (2012) indica que la mayor producción de arroz, se obtiene en el sistema irrigado por inundación. Este manejo de agua permite un mejor control de malezas, pero en la costa genera un problema, porque el agua en algunos años está en desbalance con el área sembrada,

en especial en los años secos. El riego por inundación tiene dos modalidades; el arroz puede manejarse con inundación intermitente en la fase vegetativa luego aplicar inundación permanente desde el inicio de la fase reproductiva hasta la maduración. En la costa la junta de usuarios de riego, en el 2007, estableció los módulos de riego siguientes: para el valle Chancay-Lambayeque $12\ 000\ m^3\ ha^{-1}$, para el valle Chira, $20\ 000\ m^3\ ha^{-1}$, para la parte alta y $15\ 000\ m^3\ ha^{-1}$ para la parte media y baja, para Tumbes ha establecido $14\ 000\ m^3\ ha^{-1}$, y para Camana y Majes $17\ 500\ m^3\ ha^{-1}$.

En el continente asiático bajo riego por aspersión obtuvieron 6,17 a 6,89 kg de grano por mm de agua y bajo riego por goteo de 6,09 a 6,71 kg de grano por mm de agua, valores significativamente mayores a los reportados con riego por inundación de 5,32 a 5,68 kg de grano por mm de agua, lográndose una reducción del agua de riego aplicada del 48 por ciento de agua (Kumar *et al.* 2017). En España establecieron valores de ETc del arroz bajo riego por aspersión de $7\ 500\ m^3\ ha^{-1}$ a $8\ 000\ m^3\ ha^{-1}$. Sin embargo, la mayor parte del área cultivada de arroz en el mundo, se riega por inundación, y es en este ambiente anaeróbico, en que se registra la mayor producción tal como lo muestra el resultado de una investigación en Honduras en que se evaluó tres sistemas de riego en dos especies de arroz, reportando $12.02\ t\ ha^{-1}$, en comparación al 7.1 y $4.93\ t\ ha^{-1}$, producidas bajo riego por aspersión y goteo respectivamente (Martínez y Moratiel 2011, Blanco 2014)

Chaudhary *et al.* (2003) refieren que el nivel recomendado de agua en el suelo para el cultivo de arroz es esencial para mantener un adecuado manejo de los nutrientes, de las malezas y de las plagas y enfermedades. Bajo condiciones de secano la lluvia es un factor crítico, de lo contrario el cultivo sufre por falta o exceso de agua. Los efectos del déficit de agua sobre el crecimiento y el rendimiento del cultivo de arroz son el enrollado de las hojas, las hojas resecas, el macollaje limitado, el raquitismo, el retraso de la floración, la esterilidad de las espiguillas y un llenado incompleto de los granos. La falta de agua en las etapas vegetativas reduce la altura, el macollaje y el área foliar, reduce el rendimiento al aumentar la esterilidad de la espiguilla. La planta de arroz es muy sensible a la sequía desde la etapa de la iniciación de la panoja hasta la espigazón.

2.4 EVAPOTRANSPIRACIÓN

La evapotranspiración (ET) es la pérdida de agua que ocurre en una superficie como consecuencia de la combinación de los procesos de evaporación de una superficie evaporante y la transpiración de la planta (Allen et al. 2006). La ET es un componente del balance hídrico, y un parámetro importante en la definición de las necesidades hídricas de los cultivos y por consiguiente en la programación de riego (Droogers 2000).

Se emplea el término ET debido a la dificultad de diferenciar entre los procesos de evaporación y transpiración, los cuales se producen de manera simultánea. El agua que se pierde por transpiración entra a la planta a través de la raíz, pasa al follaje y luego a la atmósfera por medio de la apertura de las estomas. Entre tanto, la pérdida de agua a través de la evaporación se presenta por el paso directo del agua disponible en el suelo a la atmósfera (Brown 2000).

2.4.1 Evapotranspiración de referencia (ET_o) por el método FAO Penman-Monteith

La evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), es un parámetro relacionado con el clima que expresa el poder evaporante de la atmósfera. Se define como la tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, que ocurre sin restricciones de agua.

El Método FAO Penman-Monteith fue estandarizado por investigadores de la FAO para el cálculo de la evapotranspiración de referencia de tal manera de uniformizar los diferentes métodos que existen para determinar la ET_o. Fue desarrollado haciendo uso de la definición del cultivo de referencia que es un cultivo hipotético con una altura asumida de 0,12 m, con una resistencia superficial de 70 s m^{-1} y un albedo de 0,23 de acuerdo a la Figura 2, que representa a la evapotranspiración de una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo activamente y adecuadamente regado. El cultivo o superficie de referencia fue introducido para obviar la necesidad de definir los parámetros únicos de evaporación para cada cultivo y etapa de crecimiento del mismo. A continuación, se presenta la ecuación del método FAO Penman-Monteith:

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (1)$$

Donde Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), R_n es la radiación neta en la superficie del cultivo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), G es el flujo del calor de suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), γ es la constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), T es la temperatura media del aire a 2 m de altura ($^\circ\text{C}$), u_2 es la velocidad del viento a 2 m de altura (m s^{-1}), e_s es la presión de vapor de saturación (kPa) y e_a es la presión real de vapor (kPa).

Allen *et al.* (2006) refieren que la ecuación de FAO Penman-Monteith es una representación clara, precisa y simple de los factores físicos - fisiológicos que gobiernan el proceso de la evapotranspiración (Figura 2). La ecuación utiliza datos climáticos de radiación solar, temperatura del aire, humedad y velocidad del viento. Para asegurar la precisión del cálculo, los datos climáticos deben ser medidos o ser convertidos a 2 m de altura, sobre una superficie extensa de pasto verde, cubriendo completamente el suelo y sin limitaciones de agua.

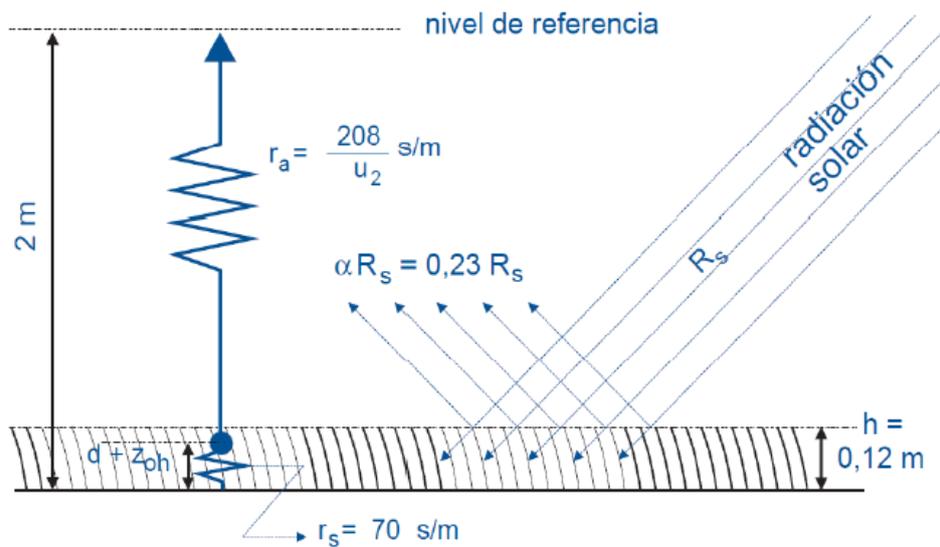


Figura 2: Características del cultivo de referencia

Fuente: Allen *et al.* (2006).

También es necesario mencionar que los únicos factores que afectan E_{To} son los parámetros climáticos. Por lo tanto, la E_{To} es también un parámetro climático que puede ser calculado a partir de datos meteorológicos por ejemplo con el método FAO Penman-Monteith o con la evaporación del tanque evaporímetro Clase A (Allen et al. 2006). Dado que los métodos directos (lisímetros) de determinación de la evapotranspiración son bastantes costosos, se usan métodos indirectos, basadas en formulas empíricas en el balance de energía, balance aerodinámico, o combinando los dos criterios. Formula de Penman, formula de Van Bavel, formula de Blaney y Criddle, formula de Hargreaves entre otras (Mejía 2012).

2.4.2 Evapotranspiración del cultivo (ETc) por balance hídrico

La evapotranspiración de un cultivo será diferente a la del cultivo de referencia (ETo) en la medida en que las características de cobertura del suelo, la vegetación y resistencia aerodinámica difieran de las correspondientes al pasto (Allen *et al.* 2006).

La evapotranspiración que ocurre en una superficie cultivada puede ser medida directamente a través de los métodos de transferencia de masa o del balance de energía. También se puede obtener la misma a partir de estudios del balance de agua en el suelo en campos cultivados o a través de lisímetros.

El balance hídrico en el suelo según Allen *et al.* citado por Padilla (2016) consiste en evaluar los flujos de agua que entran y salen de la zona radicular del cultivo dentro de un determinado periodo de tiempo. El riego (R) y la precipitación (P) proporcionan agua a la zona radicular; Parte del R y P pueden perderse por escurrimiento superficial (ES), y percolación profunda (D) la cual eventualmente recargará la napa freática. La evaporación del suelo y la transpiración del cultivo pueden agotar el agua de la zona radicular. Si todos los otros flujos aparte de la evapotranspiración (ET) pueden ser evaluados, la evapotranspiración se puede deducir a partir del cambio en el contenido de agua en el suelo (ΔSW) a lo largo de un periodo de tiempo.

Triana *et al.* citado por Padilla (2016) indican que, si no se consideran todas las variables poco significativas, difíciles para medir y en caso no exista una exagerada pendiente, la ecuación del balance dependerá básicamente de las siguientes variables: riego, lluvia, percolación profunda y variación de humedad en el suelo. Por tanto, la ecuación de balance hídrico en el suelo sería la siguiente:

$$ETc = R + P - D \pm \Delta SW \quad (2)$$

Para medir la variación de humedad en el suelo (ΔSW) existen equipos electrónicos en el mercado, tenemos la Sonda de Humedad del Suelo GS1 que son sensores capacitivos del tipo FDR (Reflectometría en el dominio de la frecuencia) que determina el contenido volumétrico de agua (VWC) midiendo la constante dieléctrica del medio utilizando la tecnología de capacitancia y dominio de frecuencia. La frecuencia de 70 MHz minimiza la salinidad y los efectos de la textura, lo que hace que el GS1 sea preciso en casi cualquier suelo o medio sin suelo, además viene con calibraciones genéricas para suelos minerales

(Decagon Devices 2015). Por otro lado, el Medidor de humedad del suelo FieldScout TDR 350 (Reflectometría en el Dominio del Tiempo) es una tecnología probada para determinar de forma rápida y precisa la humedad volumétrica del suelo, conductividad eléctrica y temperatura de la superficie del suelo (Spectrum Technologies 2017).

La información de la humedad del suelo obtenido con los sensores FDR y TDR deben ser validados mediante el método gravimétrico que representa el método estándar para determinar el contenido de humedad del suelo, y el único usado para la calibración de cualquier equipo. Su desventaja es el tiempo que demora su aplicación y el costo (Vásquez *et al.* 2017).

2.4.3 Coeficiente del cultivo (Kc)

Allen *et al.* (2006), refieren que las diferencias en la evaporación y transpiración entre los cultivos de campo y el pasto de referencia pueden ser integradas en un coeficiente único del cultivo llamado Kc. De acuerdo al enfoque del coeficiente del cultivo la evapotranspiración del cultivo (ETc) se calcula como el producto de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo) y el coeficiente del cultivo (Kc):

$$ETc = Kc * ETo \quad (3)$$

Donde ETc evapotranspiración del cultivo [$mm \text{ día}^{-1}$], Kc coeficiente del cultivo [adimensional] y ETo evapotranspiración del cultivo de referencia [$mm \text{ día}^{-1}$].

La mayoría de los efectos de los diferentes factores meteorológicos se encuentran incorporados en la estimación de la ETo. Por lo tanto, mientras ETo representa un indicador de la demanda climática, el valor de Kc varía principalmente en función de las características particulares del cultivo, variando solo en una pequeña proporción en función del clima. Esto permite la transferencia de valores estándar del coeficiente del cultivo entre distintas áreas geográficas y climas.

Las características principales que diferencian a un cultivo en particular del cultivo de referencia son:

- **Altura del cultivo:** La altura del cultivo tiene influencia en el valor de la resistencia aerodinámica (R_a), de la ecuación de Penman-Monteith, así como en la transferencia turbulenta del vapor del agua desde el cultivo hacia la atmósfera.
 - **Albedo (reflectancia) de la superficie del cultivo y suelo:** El valor del albedo está afectado por la porción del suelo cubierta por la vegetación, así como por la humedad presente en la superficie del suelo. El albedo afecta el valor de la radiación neta de la superficie, R_n , la cual constituye la fuente principal de energía para el proceso de evapotranspiración.
 - **Resistencia del cultivo,** a la transferencia del vapor de agua es afectada por el área foliar (cantidad de estomas), edad y condición de la hoja, así como por el grado de control estomático.
 - **Evaporación que ocurre en el suelo,** especialmente en la parte expuesta del mismo.
- Durante el periodo de crecimiento del cultivo, la variación del K_c expresa los cambios en la vegetación y en el grado de cobertura del suelo. Esta variación del K_c a lo largo del crecimiento del cultivo está representada por la curva K_c . Para describir y construir la curva del K_c se necesitan solamente tres valores. Allen *et al* (2006) en el manual FAO 56 indican los valores correspondientes a la etapa inicial (K_c Inicial), la etapa de mediados de temporada (K_c Medio) y la etapa final (K_c Final), en la Tabla 2 se presentan los valores de K_c en arroz.

Tabla 2: Valores de K_c del arroz propuesto por la FAO

	K_c Inicial	K_c Medio	K_c Final	Altura Max. Cultivo (h) (m)
K_c húmedo	1,10	1,20	1.05	1
K_c seco	0.5	1.05	0.7	1

Fuente: Elaborado con información de Allen *et al.* (2006) y Cropwat 8.0

Choudhury y Kumar (2016) estimaron valores de K_c en arroz encharcado trasplantado en la India en el rango de [(1.15-1.58), (1.44-1.75), (1.90-1.96), (1.59-1.82) y (1.0-1.41)] para las etapas fenológicas de macollamiento (14-18 DDT), iniciación de la panícula (27-34 DDT), floración (62-65 DDT), madurez fisiológica (97-101 DDT) y cosecha (112-113 DDT), respectivamente.

Mohán y Arumugam (1994) reportan valores de Kc en la India para tierras bajas entre 0.95 - 1.65 para temporada seca y 1.01 -1.69 para temporada húmeda. Ver Tabla 3.

Tabla 3: Kc del arroz en estación seca y estación húmeda

Estación	Porcentaje del periodo de crecimiento desde el trasplante										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Est.seca	0.95	1.15	1.27	1.35	1.46	1.65	1.55	1.4	1.29	1.10	0.92
Est.húmeda	1.01	1.18	1.28	1.45	1.59	1.69	1.60	1.39	1.18	1.09	0.96

Fuente: Elaborado con información de Mohán y Arumugam (1994)

Seung (2006) determino la ETc en nueve regiones de Corea y la ETo la obtuvo mediante el método Penman Modificado de la FAO. Los coeficientes de cultivo (Kc) para el arroz inundado trasplantado se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4: Kc del arroz inundado en nueve regiones de Corea

Método	Días Después del Trasplante												Prom.
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	
PM	0.78	0.97	1.07	1.16	1.28	1.45	1.5	1.58	1.46	1.45	1.25	1.01	1.27
FMP	0.65	0.8	0.9	0.98	1.09	1.25	1.3	1.35	1.24	1.22	1.06	0.83	1.07

Fuente: Elaborado con información de Seung (2006)

La información ha sido graficada en la Figura 3 además de la reportada por la FAO.

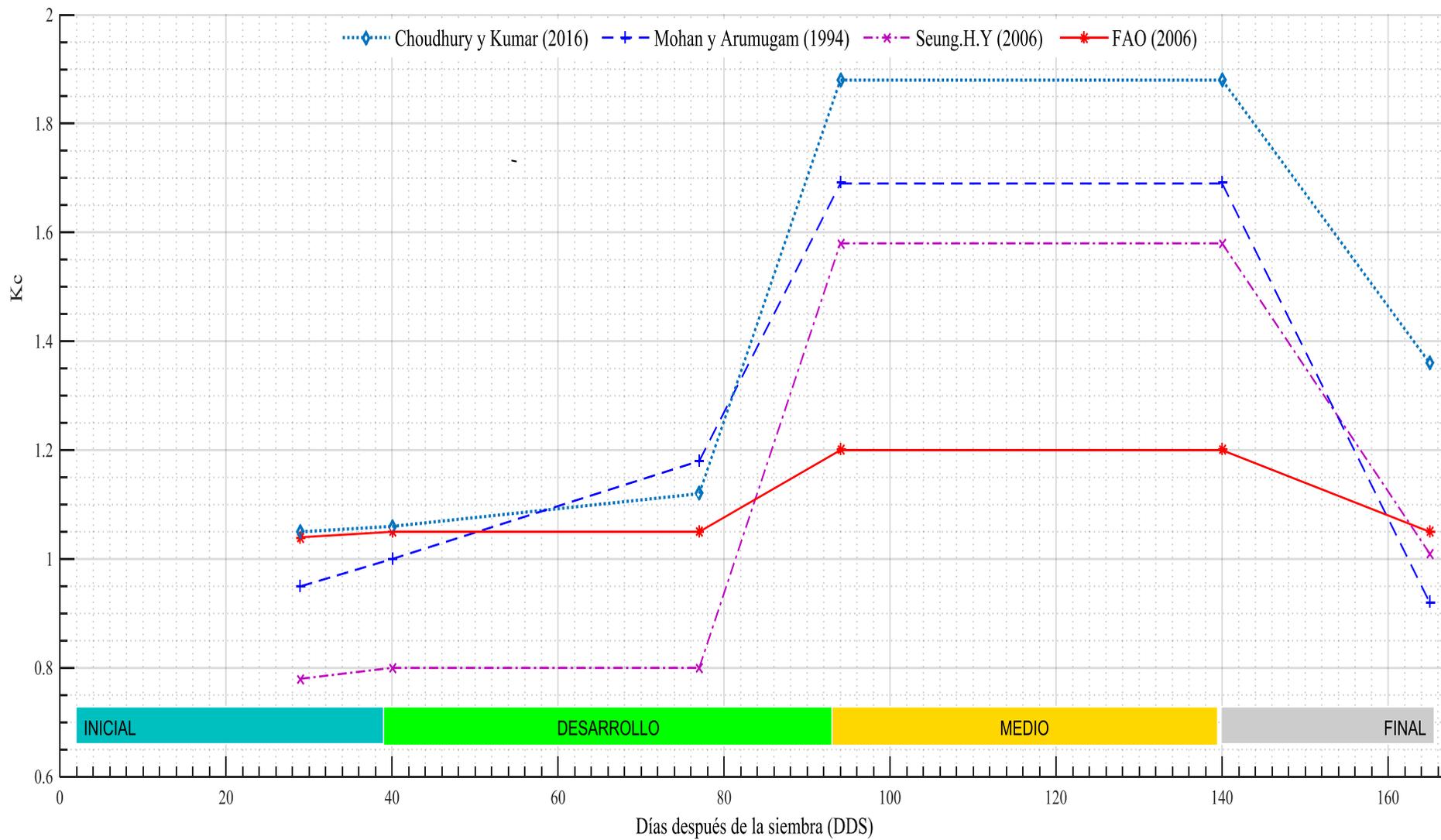


Figura 3: Kc del arroz reportados por la FAO (2006) y otros autores

Por otro lado, en España obtuvieron una ET_c del arroz bajo riego por aspersión de 750 a 800 mm con K_c inicial, medio y final de 0.92, 1.06 y 1,03 y duración de las etapas fenológicas de 55, 45 y 25 días respectivamente (Moratíel y Martínez, 2011).

2.4.4 Lisímetro

Un lisímetro mide las variaciones de pérdida o ganancia de agua en el suelo y la planta debido a la evapotranspiración, precipitación y procesos de drenaje. La ET_c puede ser determinada si son conocidas la precipitación P , la cantidad de agua drenada D y la variación de la cantidad de agua ΔSW acumulada en el suelo. El valor de ΔSW , en ciertos instrumentos, es obtenido por pesaje, a través de una balanza registradora en la cual está montada la caja lisimétrica; también pueden ser medidas de humedad de suelo a diferentes profundidades (Mejía 2012).

Según Cisneros (2003) propone la siguiente clasificación de lisímetros:

- Según finalidad: agronómicos, hidrológicos e hidrogeológicos
 - Según estado de suelo: alterada o inalterada (monolíticos).
 - Según sistema de medición: de drenaje y pesada (mecánicos, hidráulicos ó electrónicos).
 - Según colocación: superficiales (agrícolas e hidrológicos) y subterráneos (hidrogeológicos).
 - Según su localización: de campo o de invernadero.
- a. **lisímetro de drenaje:** Para Mejía (2012) prácticamente el único instrumento usado en la medición de la evapotranspiración real, está constituido por un depósito enterrado, abierto en la parte superior y conteniendo el suelo que se quiere estudiar, en condiciones no perturbadas. La muestra del suelo recibe las precipitaciones del lugar, que son medidas en un pluviómetro; el suelo contenido en el lisímetro es drenado por el fondo midiéndose la cantidad de agua.
- b. **Lisímetro de pesada:** Muchos y distintos lisímetros han sido desarrollados pero tal vez, el más común es el lisímetro de pesaje. El cambio de contenido de humedad dentro del sistema planta-suelo-agua son registrados con variaciones de peso.

Armfield (2015) ha desarrollado un modelo portable de lisímetro, el cual puede ser usado en laboratorio. Aun limitado en su aplicación al trabajo de investigación primaria, el equipo es ideal para propósitos demostrativos y proyectos de trabajo estudiantil.

III. METODOLOGÍA

3.1 ZONA DE ESTUDIO

El experimento se realizó en el Área Experimental de Riego (AER) de la Universidad Nacional Agraria la Molina (UNALM), del 15 de noviembre del 2017 al 30 de abril del 2018, ubicada en el valle de Ate Bajo del distrito de la Molina, provincia de Lima y departamento de Lima. Se encuentra situada en las coordenadas latitud sur $12^{\circ}4'41.77''S$, longitud oeste $76^{\circ}56'45.20''O$ y altitud 248 m.s.n.m. de la zona geográfica 18L.

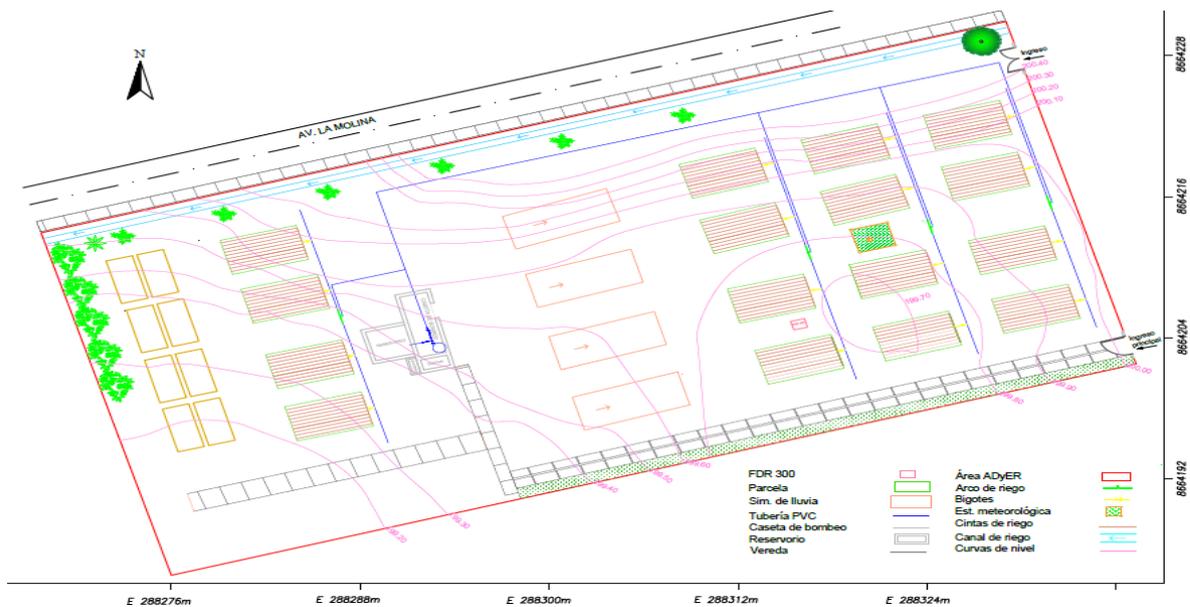


Figura 4: Ubicación de la zona de estudio

Fuente: AER

3.1.1. Clima

El clima de la zona es desértico, se colectó información histórica de los años 2000 al 2010 de la estación Von Humboldt, estación cercana a la zona de estudio. Ver Tabla 5

La información de temperatura máxima y mínima, Humedad relativa, velocidad del viento se colectó de una estación meteorológica automática Davis modelo Vantage Pro 2 ubicada en la zona de estudio

Tabla 5: Condiciones climáticas en la UNALM (2000-2010)

Mes	T. Max (°C)	T. Min (°C)	HR (%)	Vel. Viento (m/s)	Horas Sol diario	ETo (mm/día)
Enero	27.41	19.44	79.6	1.26	5.32	3.71
Febrero	28.92	20.33	75.85	1.26	5.95	4.09
Marzo	28.65	19.75	75.63	1.15	7.02	4.16
Abril	26.86	17.75	79.07	1.11	7.62	3.72
Mayo	23.27	15.5	83.24	0.92	5.62	2.65
Junio	19.89	14.2	87.63	0.77	2.66	1.79
Julio	18.91	14.16	88.7	0.85	2.04	1.69
Agosto	18.31	13.92	88.53	0.88	2.4	1.89
Septiembre	19.98	13.95	88.07	0.99	3.23	2.33
Octubre	21.18	14.52	86.09	1.08	4.37	2.85
Noviembre	22.69	15.67	84.25	1.1	5.01	3.16
Diciembre	25.06	17.41	82.74	1.14	4.89	3.32
Promedio	23.43	16.38	83.28	1.04	4.68	2.95

Fuente: Elaborada con información meteorológica de la Est. Von Humboldt-UNALM

3.1.2. Agua de riego y suelo

Se realizaron muestreos de suelo y del agua de riego. Las muestras de suelo y agua se analizaron en el Laboratorio de Agua, Suelo, Medio Ambiente y Fertirriego de la Facultad de Ingeniería Agrícola.

a. Características del suelo

Las características físicas del suelo indican una textura franco arenoso con una densidad aparente de 1.54 g cm^{-3} . Al analizar las características químicas del suelo se debe mencionar que se clasificó como ligeramente salino (CE menor a 2 dS/m), moderadamente alcalino (pH entre 7,9 – 8,4), un nivel medio de materia orgánica (entre 2 a 4 por ciento), alta presencia de fósforo (P menor a 70 ppm), contenido alto de potasio (P mayor a 240 ppm) y baja disponibilidad (CaCO_3 menor al 1 por ciento).

Tabla 6: Resultados del análisis de suelo

C.E	Textura	Da	pH	M.O	P	K	Ca CO_2
1.81	FA	1.54	7.98	2.30	48.69	372	0.99

Fuente: Elaborado con reporte del laboratorio de Agua, Suelo, Medio Ambiente y Fertirriego – FIA-UNALM

Tabla 7: Parámetros hídricos del suelo

Características hídricas	W (% masa)	θ (% volumen)
Capacidad de campo	23.34	35.94
Punto de marchitez permanente	13.08	20.14

Fuente: Elaborado con reporte del laboratorio de Agua, Suelo, Medio Ambiente y Fertilización – FIA-UNALM

Los parámetros hídricos del suelo fueron obtenidos por el método gravimétrico.

En el Tabla 6 y 7 se aprecia el resumen de los análisis, la CE ($dS\ m^{-1}$ Relación 1:1), clase textural Franco arenoso (FA), densidad aparente ($g\ cm^{-3}$), pH Relación 1:1, Mo (%) y P, K (ppm). Para mayor información, ver Anexo 4 y 5.

b. Características del agua de riego

El agua de riego es derivada del reservorio del sistema de riego de las áreas verdes de la UNALM.

Tabla 8: Características del agua de riego

Parámetro	Unidades	Valor
CE	dS/m	0.63
pH		7.4
Calcio	meq/l	4.6
Magnesio	meq/l	0.65
Sodio	meq/l	0.91
Potasio	meq/l	0.10
Suma de cationes		6.25
Cloruro	meq/l	0.98
Sulfato	meq/l	2.70
Bicarbonato	meq/l	2.80
Nitratos	meq/l	0.00
Carbonatos	meq/l	0.00
Suma de Aniones		6.49
SAR		0.56
Clasificación		C2-S1
Boro ppm	ppm	0.02
Dureza total	mg Ca CO ₃ /L	156.81
Alcalinidad total	mg Ca CO ₃ /L	140.19
Sólidos suspendidos	mg/L	6.00
Turbidez	mg/L	10.20

Fuente: Elaborado con reporte del laboratorio de Agua Suelo, Medio Ambiente y Fertilización – FIA-UNALM

De acuerdo a los análisis realizados en la investigación se identificó que el pH del agua fue de 7,4; es considerada neutra. La salinidad fue de 0,63 dS/m, por ello el agua utilizada perteneció a la clasificación C2, es decir la salinidad en el agua fue moderada. La cantidad de sodio nos indica el efecto que puede tener el agua en la permeabilidad del suelo, es decir puede afectar el drenaje del agua en el suelo. Para poder clasificar el contenido de sodio en el agua, se utiliza la relación de adsorción de sodio (RAS) que para este experimento fue de 0,56. Valores que pertenecen a la clasificación S1, la cual indica que no presenta peligro de toxicidad por sodio. Por consiguiente, al considerar la salinidad y la presencia de sodio en el agua, deducimos que se desarrolló la investigación con un agua de tipo C2 – S1, lo que significa un agua de riego de buena calidad para los cultivos que toleran moderadamente la concentración de sales, y sin afectación de permeabilidad ni la estructura del suelo.

En la Tabla 8 se muestra los resultados obtenidos de los análisis realizados en el Laboratorio de Agua, Suelo, Medio Ambiente y Fertirriego de la Facultad de Ingeniería Agrícola. Para mayor detalle ver Anexo 6.

3.2.MATERIALES Y EQUIPOS

En la etapa de campo se emplearon, sensores de humedad volumétrica del suelo y equipos de medición de variables climatológicas (humedad relativa y temperatura del aire, velocidad del viento, horas sol, radiación y precipitación), así como, materiales para la conducción del cultivo, que se detallan en el Tabla 9. Además, se indicó el software empleado en la etapa de gabinete para el procesamiento de información y elaboración de gráficos.

Tabla 9: Materiales, equipos y herramientas computacionales

Equipo o insumo	Características técnicas	Uso- aplicación
Estación meteorológica automática Davis*.	Modelo Vantage Pro 2	Permitió obtener los datos meteorológicos necesarios para obtener los valores de ETo.
FDR/Sensor de humedad GS1	Dos sensores capacitivos del tipo FDR (Reflectometría en el dominio de la frecuencia) y un registrador de datos de la serie Decágon EM50.	Sensores para la medición de humedad volumétrica del suelo.
FieldScout TDR 350	Un sensor de reflectometría de dominio de frecuencia (FDR, por sus siglas en inglés "Frequency-Domain Reflectometer")	
Insumos	Semilla: variedad IR 71706, 1.5 kg. Fertilizante: N, P, K (200-90-160) Sistema presurizado de riego: Electrobomba, tablero eléctrico, válvulas plasson, válvulas esféricas, válvulas check horizontal, filtro de anillos, manómetros. puntos de toma de presión, reservorio de 12 m ³ , emisores (goteros) de 4 l/h. Herramientas: Pico, palana, wincha, carretilla, rótulos, libreta de campo.	Insumos para la instalación y conducción del cultivo de arroz.
Software	Características técnicas	Uso-aplicación
Matlab 2015	Herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio.	Lenguaje de programación para elaborar gráficos ilustrativos de fácil interpretación.
WeatherLink 6.0.3	Monitoreo del clima	Descarga de información meteorológica

3.2.1. Componentes en la construcción del lisímetro drenaje.

Para su diseño se contempló que los materiales sean económicos, pero sin dejar de considerar las exigencias técnicas que el dispositivo implica. Los componentes para la construcción del lisímetro drenaje se muestran en el Tabla 10.

Tabla 10: Componentes en la construcción del lisímetro drenaje

Componente	Cantidad
Contenedor 1000L HDPE tanque IBC cuadrado 1m x 1m x 1.1.15m	01
Bolsa de cemento	01
Tubos PVC de ¾ y 2 pulg.	02
Unión y adaptaciones de 2 pulg.	03
Tee 2 pulg.	03
Tapón 2 pulg.	01
Reducción 2 x ¾ pulg.	02
Pegamento PVC 4 oz azul	01
Bosch Taladro Percutor Easy Impact 550	01
Bolsa de yeso cerámico	01
Sacos de 40 kg de arena fina, arena gruesa, confitillo y grava	08
Galón de 18 litros para coleccionar el agua drenada	01

3.3 PROCEDIMIENTO

3.3.1 Actividades preliminares e instalación del experimento

El lisímetro se ubicó al aire libre para garantizar el ingreso de la radiación solar y el viento, así mismo con el fin de evitar efectos de borde, se sembró en los contornos permaneciendo así el lisímetro en el centro de un área con cultivo. El proceso constructivo del lisímetro se detalla a continuación:

- Excavación de un hoyo de $1.15 \times 1.15 \text{ m}^2$ x 1 m de profundidad y una canaleta para la tubería de drenaje.
- Adecuación del contenedor (HDPE), al objetivo de la investigación para ello se eliminó parte superior del contenedor, dejando una altura de 80 cm.
- Construcción del sistema colector, con tubos de PVC perforados y empotrados en la superficie inferior del contenedor, apoyado sobre una base de cemento con pendiente del cinco por ciento tal como se muestra en la Figura 5 (margen izquierda).

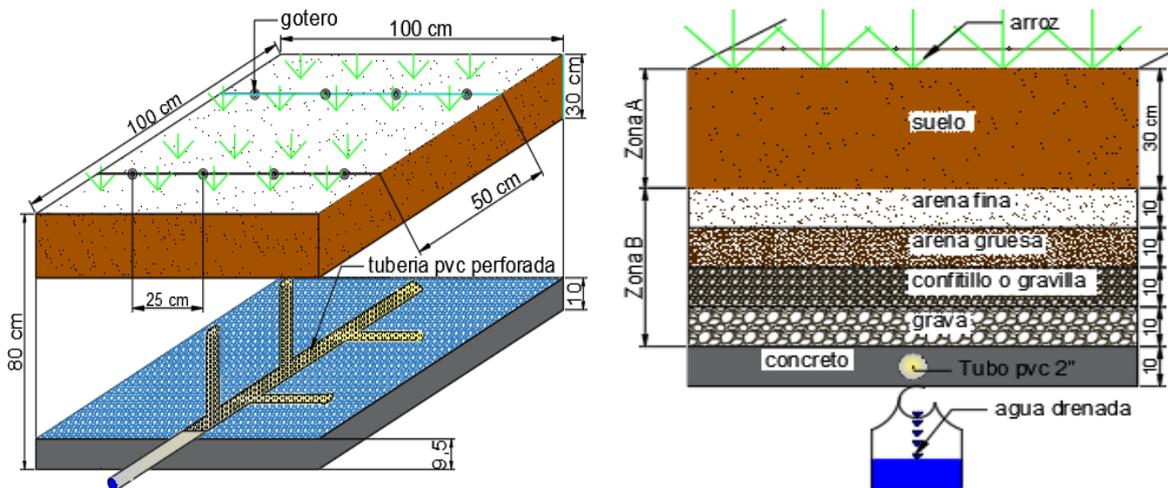


Figura 5: Lisímetro de drenaje: vista en 3D (izquierda) y perfil (derecha)

- Zona de filtrado (B); primera capa se llenó con grava hasta 10 cm de altura a continuación 10 cm de confitillo, 10 cm de arena gruesa y 10 cm de arena fina tal como se muestra en la Figura 5 (margen derecha).
- Zona de crecimiento radicular (A): Se incorporó 30 cm de altura de suelo cultivable para la zona de crecimiento radicular.
- Instalación del tubo receptor del agua drenada hacia un depósito para su almacenamiento y posterior medición volumétrica.
- Identificación de dos laterales de riego sobre el área del lisímetro con cuatro goteros cada uno, en total se contabilizo ocho goteros marca katif de caudal 3.75 l/h
- Finalmente, instalación de dos sensores de humedad GS1 a 12 y 24 cm de profundidad.

Luego de instalado el lisímetro se preparó el almácigo con tierra cernida y compost, también se preparó el terreno para el trasplante con dos por ciento de compost y fórmula de fertilización de 200-90-90 (NPK) del cual se aplicó el 30 por ciento como fertilización de fondo el complemento se aplicó mediante fertirriego y foliar. Después se ubicaron las tuberías principales, secundarias arcos de riego y laterales con goteros auto-compensados a espaciamiento de 50 x 25 entre laterales y emisores. Así mismo se llevó a cabo la prueba de funcionamiento del sistema de riego y lisímetro.

Treinta días después de la siembra (DDS) se realizó el trasplante a un distanciamiento de 50 x 25 con dos hileras por lateral de riego. En el trasplante se consideró de tres a cuatro plantas por punto de siembra, quedando así en el interior del lisímetro de drenaje dieciocho puntos

de siembra. El seguimiento y evaluación de las variables para el balance hídrico se inició cinco días después del trasplante.

3.3.2 Estimación de la evapotranspiración de referencia ETo

La presente investigación se realizó con datos meteorológicos de la estación automática (Davis) del AER. Se obtuvo la información meteorológica de los meses de diciembre del 2017, enero, febrero, marzo y abril del 2018 y los valores de ETo se calcularon con el método FAO Penman-Monteith.

La estación meteorológica automática (Davis) estuvo ubicada dentro del Área Experimental de Riego (AER) sobre un área cubierta con pasto, rodeada de un cerco perimétrico de malla metálica pintado de color blanco. Posteriormente se encargaron de la configuración de la consola, para ello se realizaron las mediciones de latitud, longitud y elevación mediante un GPS. Se configuró con ayuda del software Weather Link, los datos básicos requeridos para el monitoreo, tales como el intervalo de medición, definido en 30 minutos, la hora y las unidades de medición, entre otros parámetros.

3.3.3 Estimación de la evapotranspiración del cultivo ETc

La ETc se obtuvo del balance hídrico en el lisímetro, midiendo en campo, la lámina drenada (D), y la variación de humedad del suelo (ΔSW) entre cada evento de riego, la precipitación (P).

La lámina de riego aplicada se estimó en función de la ETc ($mm\ dia^{-1}$) del día anterior deducida mediante el balance hídrico en el lisímetro y de la lectura de la humedad volumétrica de los sensores, es decir, la lámina de riego consistió en la reposición de la ETc diaria calculada. La lámina de riego dependió del clima y del estado fenológico del cultivo, el riego se suministró entre las 6 y 7 am. La precipitación fue monitoreada por la estación meteorológica, y se consideró como un aporte al riego.

El volumen de agua drenada se evaluó veinticuatro horas después del riego o inmediatamente antes del siguiente riego. El drenaje dependió del volumen de riego aplicado, dicho volumen drenado se convirtió en láminas al dividirlos entre el área del lisímetro.

Para determinar la variación de humedad del suelo del lisímetro de drenaje (ΔSW) se colectó información de valores de humedad volumétrica registrados por los sensores GS1 y TDR-350, así mismo fue importante realizar la calibración de cada uno de los sensores mediante el método gravimétrico. Los valores de humedad más importantes para el presente balance hídrico fueron los colectados antes y después de cada riego. Las humedades del suelo registradas estuvieron próximos a capacidad de campo. El monitoreo de la humedad del suelo se llevó a cabo a través de sondas de capacitancia eléctrica (FDR) modelo GS1 que registraron valores de humedad volumétrica, a una profundidad de 12 cm y 24 cm. Los datos fueron programados para ser registrados y almacenados cada 5 minutos mediante un registrador de datos EM50 y un medidor digital Arduino. El sensor TDR-350 portátil registro valores instantáneos de humedad volumétrica del suelo.

Se realizó la conversión de unidades teniendo en cuenta el área del lisímetro de drenaje de $1m^2$ y una profundidad efectiva para el desarrollo radicular de 0.30 m. La densidad del agua de riego para la presente investigación se consideró $1g\ cm^{-3}$.

3.3.4 Determinación del coeficiente de cultivo (Kc)

El coeficiente del cultivo (Kc) es básicamente el cociente entre la evapotranspiración del cultivo (ET_c) y la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o). Se procedió a obtener el valor del Kc mediante la siguiente ecuación:

$$Kc = ET_c ET_o^{-1} \quad (4)$$

Allen *et al.* (2006), refieren que mientras la ET_o representa un indicador de la demanda climática, el valor de Kc varía principalmente por el efecto integrado de las características particulares del cultivo.

IV. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA (ETO)

En Tabla 11. Se presenta la información meteorológica de la estación automática (Davis), ubicada en la zona de investigación.

Tabla 11: Datos meteorológicos monitoreados durante la investigación

Mes	T. prom °C	T. min °C	T. máx. °C	$U_2(m s^{-1})$	HR %	P (mm)	$R_s (MJ m^{-2} día^{-1})$
Dic	22.5	20.2	24.8	0.7	83	0.4	15.5
Ene	24.5	22.8	26.2	0.6	78	1.4	17.6
Feb	25.8	23.9	27.8	0.6	76	1.8	17.8
Mar	24.8	22.9	26.7	0.5	78	1.6	18.1
Abr	23.8	22.2	25.5	0.5	77	1.2	17.1

Fuente: Elaborado con reporte de la estación automática instalada en el Área Experimental de riego (AER)

Chaudhary *et al* (2003) refieren que la temperatura óptima para el cultivo de arroz oscila entre 20 y 35 °C para la fase vegetativa y reproductiva y de 20 a 25 °C para la fase final. Por tanto, la investigación se llevó a cabo durante la estación más calurosa del año.

De todos los datos meteorológicos monitoreados se debe resaltar el mes de febrero en que se registró la mayor temperatura promedio 25.8 °C. En la Figura 6 se aprecia la variación temporal de las variables climáticas.

En la zona de estudio la presencia aledaña de infraestructura (edificios), redujo la ventilación y favoreció una mayor temperatura. Es por ello que la velocidad del viento tuvo valores bajos entre 0.5 a 0.7 $m s^{-1}$ en abril y diciembre respectivamente, con valores de temperaturas altas, respecto a la estación Von Humboldt. Al respecto, la velocidad del viento (U_2) depende de la temperatura y la humedad relativa, estos últimos inversamente proporcional entre ellos (Wherley *et al.* 2009).

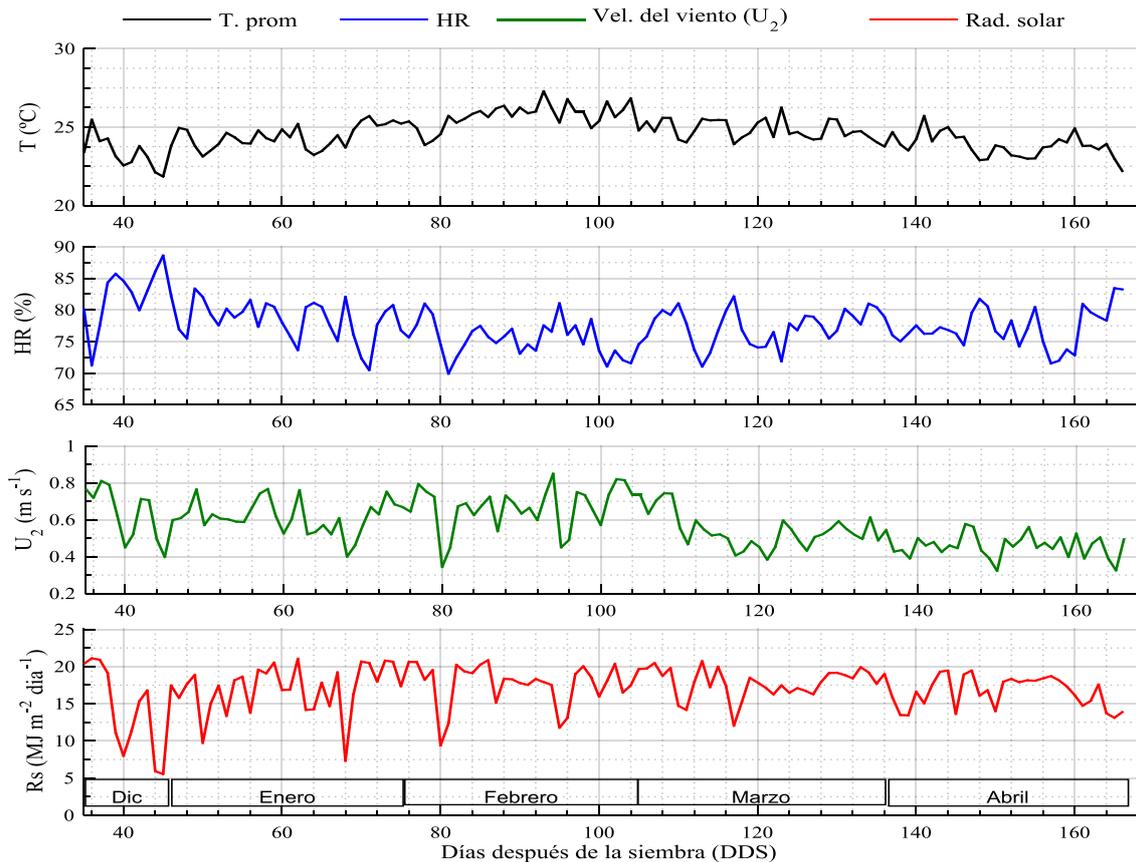


Figura 6: Variación temporal de la temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación Solar del 20/12/17 al 30/04/18

Las precipitaciones fueron esporádicas y mínimas registrándose valores mensuales entre 0.4 y 1.8 mm, no significativas en el balance hídrico diario. La humedad relativa fluctuó entre 70 y 89 por ciento, la radiación solar aumentó notoriamente por el cambio estacional en los meses de enero, febrero y marzo (ver Tabla 11).

El comportamiento de la humedad relativa es opuesto al comportamiento de la temperatura (Figura 6). Por tanto, es indiscutible que en el mes de diciembre y abril el requerimiento hídrico del cultivo sea menor que los otros meses, debido a que el vapor de agua contenido en el aire es mayor al 80 por ciento.

Con respecto a la radiación solar (Rs) apreciamos que la tendencia mostrada en la Figura 6 es muy parecida a la ETo (Figura 7). Por lo que, se puede inferir que el comportamiento de la radiación solar rige con más severidad que las otras variables climáticas el comportamiento de la ETo.

La ETo diaria (mm) se determinó por el método FAO Penman – Monteith, se procesó la información meteorológica con ayuda de hojas de cálculo Excel, los resultados se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12: Evapotranspiración obtenida por el método FAO Penman – Monteith

Dia	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril
1	3.4	3.7	4.0	4.6	3.6
2	4.1	3.7	4.3	4.9	2.3
3	4.4	4.3	2.3	4.5	2.8
4	3.1	2.3	2.9	4.0	3.4
5	2.1	3.2	3.4	2.8	3.5
6	2.3	3.7	3.6	2.6	3.9
7	3.2	3.1	3.4	4.1	4.3
8	3.7	3.5	3.5	5.0	4.1
9	3.5	4.0	3.5	3.7	2.5
10	3.7	3.1	3.3	4.8	4.1
11	2.2	4.5	3.7	4.1	4.1
12	4.4	4.0	3.2	2.3	3.0
13	4.0	4.5	3.3	3.3	3.1
14	4.6	3.7	4.0	4.1	3.0
15	3.3	2.7	3.8	4.2	4.1
16	2.1	5.2	4.1	3.4	4.0
17	2.7	3.1	4.2	2.9	3.9
18	4.3	3.0	2.6	4.1	3.9
19	3.1	4.0	2.9	3.4	3.8
20	4.2	2.9	4.4	4.0	3.7
21	4.9	4.3	4.9	3.0	4.0
22	4.8	2.5	4.1	3.6	4.0
23	4.4	3.6	3.7	3.9	3.6
24	2.7	5.0	4.4	3.3	3.6
25	2.2	4.8	4.6	4.5	3.0
26	2.3	4.4	4.0	4.2	3.4
27	2.9	4.9	4.2	4.3	3.6
28	3.3	4.6	4.3	4.4	2.6
29	2.2	3.7		4.5	1.8
30	2.1	4.9		3.8	2.6
31	3.7	4.9		4.3	4.3
ETo mm/mes	103.9	119.4	104.8	120.4	103.2
ETo Prom.	3.4	3.9	3.7	3.9	3.4
ETo Min	2.1	2.3	2.3	2.3	1.8
ETo Max	4.9	5.2	4.9	5.0	4.3

También se puede observar que la ETo ha ido variando en función al cambio estacional, el valor máximo diario se presentó en el mes de enero y marzo con 5.2 y 5 mm $día^{-1}$, y el mínimo en el mes de diciembre y abril con 2.1 y 1.8 mm $día^{-1}$ respectivamente, del mismo modo los meses con mayor ETo promedio fueron enero, marzo y febrero y los más bajos diciembre y abril. Ver Tabla 12 y Figura 7

La ETo total durante la investigación desde el 20 de diciembre del 2017 hasta el 29 de abril del 2018 fue de 481.88 mm equivalente a $4818.8 m^3 ha^{-1}$.

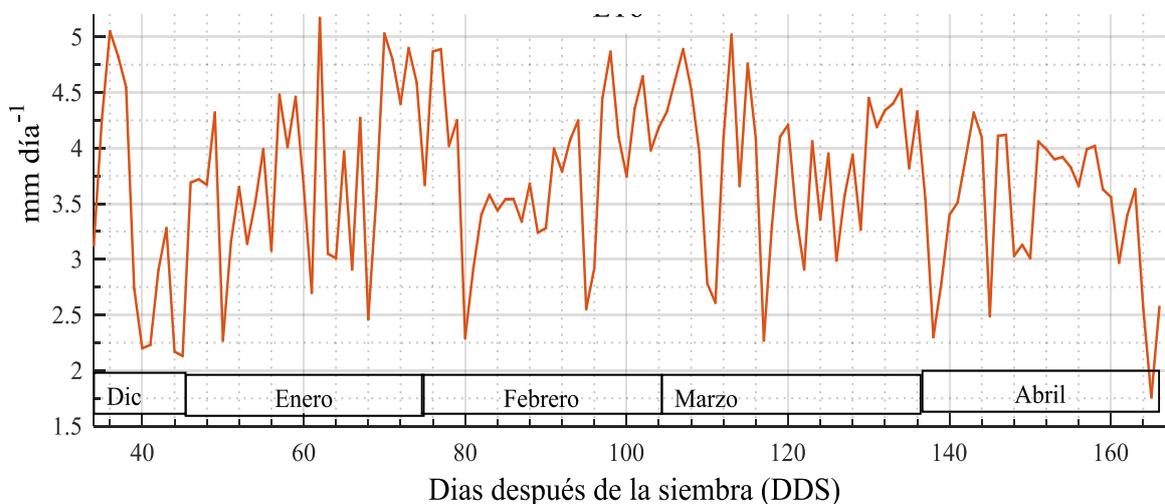


Figura 7: Variación temporal de la ETo del 20/12/17 al 30/04/18

4.2 EVAPOTRANSPIRACION DEL CULTIVO DE ARROZ (ETC) IR 71706

En la Tabla 13 se presenta las variables evaluadas en campo involucradas en el balance hídrico; lámina de riego (mm), lamina drenada (mm), variación de humedad del suelo (mm) y precipitación (mm). El balance de humedad se inició cinco días después del trasplante exactamente a los 35 días después de la siembra (DDS), también se evaluó una vez por semana el macollamiento y la altura de planta. Ver Tabla 14

Tabla 13: Variables registradas para la obtención de la ETc y Kc

Fecha	DDS	R (mm)	P(mm)	D (mm)	Hum (Θ)	Δ Hum S°(mm)	ETc(mm)	ETo(mm)	Kc
Dic-20	35	8.2	0	0.1	40.0	-4.29	3.78	4.2	0.90
Dic-21	36	8.2	0	1.3	41.4	-2.50	4.44	4.93	0.90
Dic-22	37	8.2	0	0.9	42.3	-3.01	4.28	4.75	0.90
Dic-23	38	8.2	0	5.7	43.3	1.50	4.00	4.43	0.90
Dic-24	39	8.2	0	10.2	42.8	6.37	2.39	2.65	0.90
Dic-25	40	0.0	0		40.6		1.96	2.17	0.90
Dic-26	41	10.9	0	6.9	40.6	-1.95	2.03	2.25	0.90
Dic-27	42	8.2	0	5.4	41.3	-0.21	2.61	2.88	0.91
Dic-28	43	8.2	0	4.7	41.4	-0.30	3.24	3.28	0.99
Dic-29	44	8.2	0	5.4	41.5	-0.74	2.06	2.18	0.95
Dic-30	45	10.9	0	7.8	41.7	-0.97	2.13	2.09	1.02
Dic-31	46	5.5	0	3.1	42.0	1.35	3.75	3.67	1.02
Ene-01	47	8.2	0	5.2	41.6	0.42	3.40	3.56	0.96
Ene-02	48	8.2	0	6.0	41.4	1.17	3.35	3.72	0.90
Ene-03	49	8.2	0	6.0	41.1	3.65	3.74	4.22	0.89
Ene-04	50	0.0	0		39.8		2.03	2.29	0.89
Ene-05	51	8.2	0	5.0	39.8	-0.10	3.15	3.16	1.00
Ene-06	52	8.2	0	6.3	39.9	4.83	3.66	3.67	1.00
Ene-07	53	0.0	0		38.3		3.07	3.08	1.00
Ene-08	54	10.9	0	6.8	38.3	-0.81	3.31	3.32	1.00
Ene-09	55	8.2	0	1.1	38.5	-3.13	3.97	3.98	1.00
Ene-10	56	8.2	0.4	6.4	39.6	5.34	3.07	3.08	1.00
Ene-11	57	0.0	0		37.8		4.45	4.46	1.00
Ene-12	58	8.2	0	2.2	37.8	-1.72	4.33	4	1.08
Ene-13	59	8.2	0	7.3	38.4	3.83	4.78	4.42	1.08
Ene-14	60	8.2	0	0.5	37.1	-3.84	3.89	3.6	1.08
Ene-15	61	8.2	0	2.6	38.4	-2.25	3.31	2.7	1.23
Ene-16	62	8.2	0	1.3	39.1	-0.48	6.39	5.16	1.24
Ene-17	63	8.2	0	8.5	39.3	4.14	3.82	3.06	1.25
Ene-18	64	8.2	0	1.1	37.9	-3.28	3.82	3.03	1.26
Ene-19	65	8.2	0.2	4.0	39.0	0.59	5.02	3.94	1.27
Ene-20	66	8.2	0	5.3	38.8	0.89	3.75	2.92	1.28
Ene-21	67	10.9		6.7	38.5	1.33	5.52	4.26	1.30
Ene-22	68	8.2	0.2	3.3	38.1	-1.86	3.23	2.47	1.31
Ene-23	69	5.4	0	1.3	38.7	0.63	4.78	3.62	1.32
Ene-24	70	10.9	0	3.6	38.5	-0.38	6.97	5	1.39
Ene-25	71	8.2	0	3.2	38.6	2.03	7.03	4.82	1.46
Ene-26	72	8.2	0	0.6	37.9	-0.96	6.67	4.4	1.52
Ene-27	73	8.2	0	1.9	38.2	1.11	7.42	4.86	1.53
Ene-28	74	8.2	0	2.4	37.9	1.00	6.84	4.45	1.54
Ene-29	75	8.2	0	1.3	37.5	-1.16	5.77	3.73	1.55
Ene-30	76	8.2	0	2.1	37.9	1.42	7.56	4.86	1.56

Continuación

Ene-31	77	8.2	0	1.3	37.4	0.74	7.63	4.89	1.56
Feb-01	78	8.2	0	1.6	37.2	-0.40	6.24	4	1.56
Feb-02	79	8.2	0	1.9	37.3	0.35	6.61	4.24	1.56
Feb-03	80	8.2	0	3.3	37.2	3.41	3.65	2.34	1.56
Feb-04	81	0.0	0		36.1		4.71	3.02	1.56
Feb-05	82	10.9	0	1.7	36.1	-3.80	5.43	3.49	1.56
Feb-06	83	8.2	0	0.8	37.3	-1.64	5.77	3.56	1.62
Feb-07	84	8.2	0	1.2	37.9	-1.20	5.80	3.45	1.68
Feb-08	85	8.2	0	1.9	38.3	-0.23	6.09	3.49	1.75
Feb-09	86	8.2	0	1.4	38.4	0.00	6.83	3.51	1.95
Feb-10	87	8.2	0	1.2	38.4	-0.74	6.30	3.39	1.86
Feb-11	88	8.2	0	1.8	38.6	0.07	6.45	3.65	1.77
Feb-12	89	8.2	0	1.7	38.6	-0.38	6.10	3.24	1.88
Feb-13	90	8.2	0	1.6	38.7	-0.75	5.87	3.34	1.76
Feb-14	91	8.2	0	1.8	39.0	0.90	7.30	4	1.83
Feb-15	92	8.2	0	1.3	38.7	0.00	6.87	3.79	1.81
Feb-16	93	8.2	0	2.4	38.7	1.73	7.52	4.07	1.85
Feb-17	94	8.2	0	2.6	38.1	6.33	7.74	4.25	1.82
Feb-18	95	0.0	0		36.0		4.21	2.55	1.65
Feb-19	96	10.9	0	2.2	36.0	-3.49	5.24	2.92	1.80
Feb-20	97	8.2	0	2.1	37.1	1.75	7.88	4.45	1.77
Feb-21	98	8.2	0	1.4	36.6	1.73	8.50	4.87	1.74
Feb-22	99	8.2	0	1.4	36.0	-1.08	5.76	3.35	1.72
Feb-23	100	8.2	0	2.1	36.3	-1.38	4.75	2.79	1.70
Feb-24	101	8.2	0	2.5	36.8	1.42	7.16	4.2	1.70
Feb-25	102	8.2	0	1.3	36.3	-0.83	6.11	3.58	1.71
Feb-26	103	8.2	0	1.4	36.6	-0.58	6.27	3.67	1.71
Feb-27	104	8.2	0	1.7	36.8	-0.24	6.25	3.65	1.71
Feb-28	105	8.2	0	2.5	36.9	1.31	7.03	4.14	1.70
Mar-01	106	8.2	0	1.8	36.4	1.36	7.78	4.61	1.69
Mar-02	107	8.2	0	1.5	36.0	1.47	8.12	4.85	1.67
Mar-03	108	8.2	0	1.8	35.5	7.98	7.63	4.48	1.70
Mar-04	109	0.0	0		32.8		6.77	3.97	1.70
Mar-05	110	10.9	0	1.0	32.8	-5.30	4.64	2.81	1.65
Mar-06	111	8.2	0	1.1	34.6	-2.68	4.47	2.66	1.68
Mar-07	112	8.2	0	1.5	35.5	0.62	7.35	4.1	1.79
Mar-08	113	8.2	0	0.8	35.3	1.77	9.19	5.02	1.83
Mar-09	114	8.5	0	0.0	34.7	-1.38	7.09	3.79	1.87
Mar-10	115	8.2	0.2	0.9	35.2	1.37	8.85	4.73	1.87
Mar-11	116	8.2	0	0.5	34.7	0.14	7.79	4.08	1.91
Mar-12	117	8.2	0	0.7	34.6	-3.39	4.06	2.32	1.75
Mar-13	118	8.2	0	1.6	35.8	-0.33	6.32	3.39	1.86
Mar-14	119	8.2	0	1.5	35.9	0.91	7.66	4.21	1.82
Mar-15	120	8.2	0	0.9	35.6	0.17	7.51	4.23	1.77
Mar-16	121	8.2	0	3.4	35.5	1.29	6.09	3.48	1.75

Continuación

Mar-17	122	8.2	0	5.1	35.1	2.18	5.28	3.06	1.73
Mar-18	123	5.5	0	1.0	34.4	2.45	6.95	4.08	1.70
Mar-19	124	1.6	0	0.0	33.6	4.22	5.82	3.47	1.68
Mar-20	125	10.9	0	4.3	32.1	0.07	6.67	4.03	1.65
Mar-21	126	8.2	0	3.4	32.1	0.12	4.92	3.02	1.63
Mar-22	127	8.2	0	3.9	32.1	1.43	5.73	3.57	1.61
Mar-23	128	10.9	0	3.1	31.6	-1.57	6.23	3.94	1.58
Mar-24	129	8.2	0	3.6	32.1	0.41	5.01	3.33	1.50
Mar-25	130	8.2	0	2.1	32.0	0.30	6.39	4.48	1.43
Mar-26	131	7.0	0	1.6	31.9	0.28	5.71	4.23	1.35
Mar-27	132	8.2	0	2.5	31.8	0.17	5.90	4.39	1.34
Mar-28	133	8.2	0	2.4	31.7	0.18	5.93	4.44	1.34
Mar-29	134	8.2	0	2.4	31.7	0.17	5.97	4.49	1.33
Mar-30	135	8.2	0	3.3	31.6	0.07	5.00	3.78	1.32
Mar-31	136	8.2	0	1.8	31.6	-0.83	5.62	4.27	1.32
Abr-01	137	5.5	0	3.5	31.9	2.51	4.56	3.54	1.29
Abr-02	138	8.2	0	2.7	31.0	-2.58	2.95	2.34	1.26
Abr-03	139	8.2	0	3.7	31.9	-0.99	3.54	2.88	1.23
Abr-04	140	5.5	0	3.1	32.2	1.72	4.12	3.43	1.20
Abr-05	141	5.5	0	2.2	31.7	0.62	3.92	3.32	1.18
Abr-06	142	8.2	0	3.5	31.5	-0.08	4.61	3.98	1.16
Abr-07	143	10.9	0	3.9	31.5	-2.08	4.89	4.29	1.14
Abr-08	144	4.4	0	2.3	32.2	2.46	4.54	4.06	1.12
Abr-09	145	8.2	0	3.5	31.4	-1.89	2.78	2.53	1.10
Abr-10	146	8.2	0	4.5	32.0	0.80	4.49	4.17	1.08
Abr-11	147	5.5	0	2.7	31.7	1.51	4.35	4.12	1.06
Abr-12	148	5.5	0	4.2	31.2	1.92	3.21	3.08	1.04
Abr-13	149	5.5	0	6.7	30.6	2.04	3.23	3.13	1.03
Abr-14	150	5.5	0		29.9		3.10	3.08	1.01
Abr-15	151	0.0	0	0.8	29.9	4.88	4.06	4.08	1.00
Abr-16	152	10.9	0	4.2	28.3	-2.80	3.89	3.96	0.98
Abr-17	153	0.0	0	1.2	29.2	8.82	3.84	3.95	0.97
Abr-18	154	0.0	0		26.3		3.81	3.97	0.96
Abr-19	155	0.0	0	0.2	26.3	7.28	3.60	3.8	0.95
Abr-20	156	0.0	0		23.8		3.44	3.68	0.94
Abr-21	157	10.9	0	0.4	23.8	-3.02	3.76	4.07	0.92
Abr-22	158	0.0	0		24.8		3.72	4.08	0.91
Abr-23	159	10.9	0	3.2	24.8	-1.21	3.30	3.67	0.90
Abr-24	160	0.0	0		25.2		3.23	3.63	0.89
Abr-25	161	0.0	1.2	0.69	25.2	8.03	2.64	3.05	0.86
Abr-26	162	0.0	0		22.6		2.90	3.45	0.84
Abr-27	163	0.0	0		22.6		3.00	3.67	0.82
Abr-28	164	0.0	0	0	22.6	2.06	2.06	2.6	0.79
Abr-29	165	0.0	0	0	21.9	1.35	1.35	1.75	0.77
Total		917.46	2.20	317.13		55.69	658.23	481.88	

Tabla 14: Altura de planta y numero de macollos del arroz IR 71706

Fecha	DDS	Altura de planta (cm)	macollos m^{-2}
20-Dic	35	20	143
30-Dic	45	23	172
10-Ene	56	30	197
17-Ene	63	33	251
25-Ene	71	43	370
31-Ene	77	57	445
7-Feb	84	61	503
14-Feb	91	66	577
22-Feb	99	70	587
9-Mar	114	80	587
25-Mar	130	80	587
1-Abr	137	80	587
15-Abr	151	80	587
29-Abr	165	80	587

En la Tabla 13 se observa que los valores máximos de ET_c (9.19 y 8.85 mm día^{-1}) se presentaron el 8 y 10 de marzo que se corresponden con los valores máximos de ET_o (5.02 y 4.73 mm día^{-1}) así como también con la etapa fenológica de alta actividad fisiológica (estado de huso y floración). El promedio de la ET_c diario durante el periodo de investigación fue de 5.03 mm día^{-1} . El total de la lámina de riego aplicada durante la investigación (131 días) fue de 917.46 mm , la precipitación de 2.2 mm , el drenaje de 317.13 mm y una variación de humedad total positiva ΔSW de 55.69 mm , información que permitió obtener una ET_c total de 658.23 mm , que expresado en volumen es igual a $6582 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ con un número de macollos de 587 mac m^{-2} y una altura promedio de planta de 80 cm .

Con respecto a la variación de humedad (ΔSW) presentados en la Tabla 13 con fines del presente balance, los valores negativos de ΔSW indica que el suelo ha almacenado agua con respecto al día anterior, valores positivos ΔSW significa que ha disminuido el volumen de agua almacenado en el suelo como consecuencia de la ET_c . Por tanto, el valor de ΔSW en la ecuación del balance hídrico en el primer caso se resta y el segundo caso se suma.

En la Figura 8 se aprecia la variación temporal de la lámina de riego aplicado, la lámina drenada y la variación de la humedad en el suelo durante la investigación. El suministro del riego se basó en mantener la humedad del suelo a capacidad de campo y reponer la lámina

consumida el día anterior. En la fase vegetativa y reproductiva la humedad estuvo por encima de 41 y 32 por ciento respectivamente y en la fase final del cultivo estuvo entre 32 y 25 por ciento de humedad volumétrica.

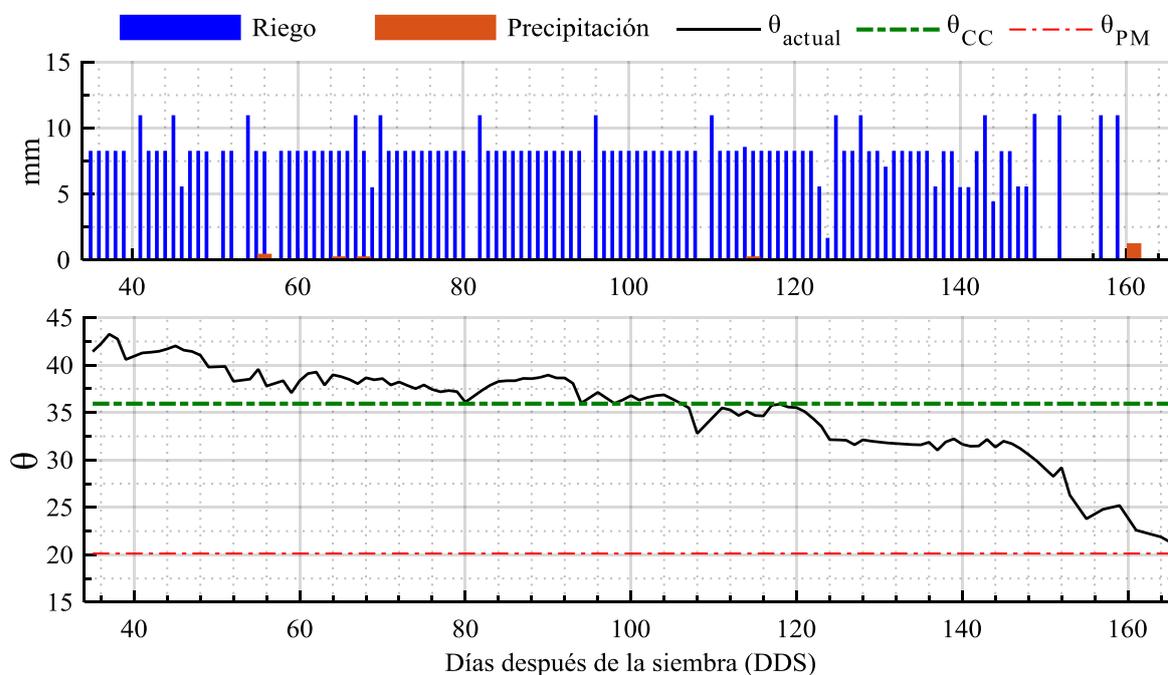


Figura 8: Variación temporal de la lámina de riego, precipitación y humedad volumétrica del suelo.

De la Figura 9 (panel superior) se puede apreciar que la ET_c está relacionada con el comportamiento de la ET_o , por tanto, las tendencias de la ET_o , ET_c y Transpiración siguen un mismo patrón de variación influenciado por el clima y las características propias del cultivo. Esto permite afirmar que la ET_c varía de acuerdo a la ET_o y al requerimiento hídrico del estado fenológico.

Para tener una idea clara de la capacidad de transpiración del arroz IR 71706 la investigación se complementó con lisímetros de pesada en los que se cubrió el suelo con plástico para evitar la evaporación, lo cual permitió medir únicamente la transpiración (los resultados completos se detallan en el Anexo 1. En la Figura 9 (panel inferior) se puede observar la variación temporal de la ET_c frente a la transpiración y evaporación del suelo.

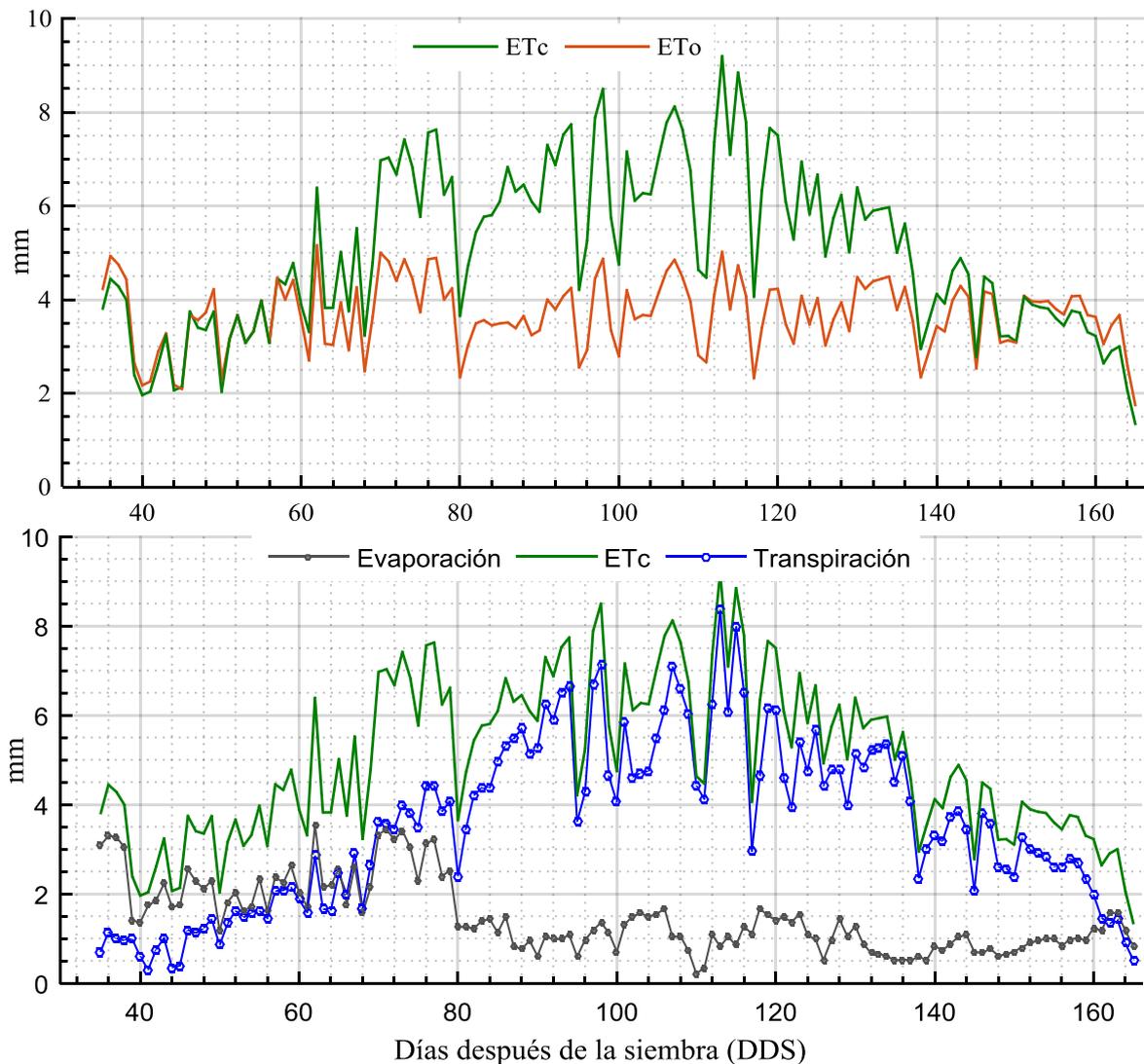


Figura 9: Variación temporal de la ETo, ETc, transpiración y evaporación

De la ETc y transpiración acumulada en el tiempo se observa una curva SIGMOIDE (Figura 10) que guarda una estrecha semejanza con la Figura 11 donde se expresa el crecimiento del arroz IR 71706 en base a la altura de planta y número de macollos evaluado en el tiempo. Lallana, H (2004) sostiene que la característica sigmoideal del crecimiento es una constante que se mantiene no solo para cualquier tipo de planta, sino también para los otros seres vivos y para cualquier período de medida. Por otro lado, la ETo acumulada responde a una recta debido a que depende únicamente del clima, finalmente esto nos permite afirmar una vez más que la ETc depende del crecimiento del cultivo y de las condiciones locales del clima.

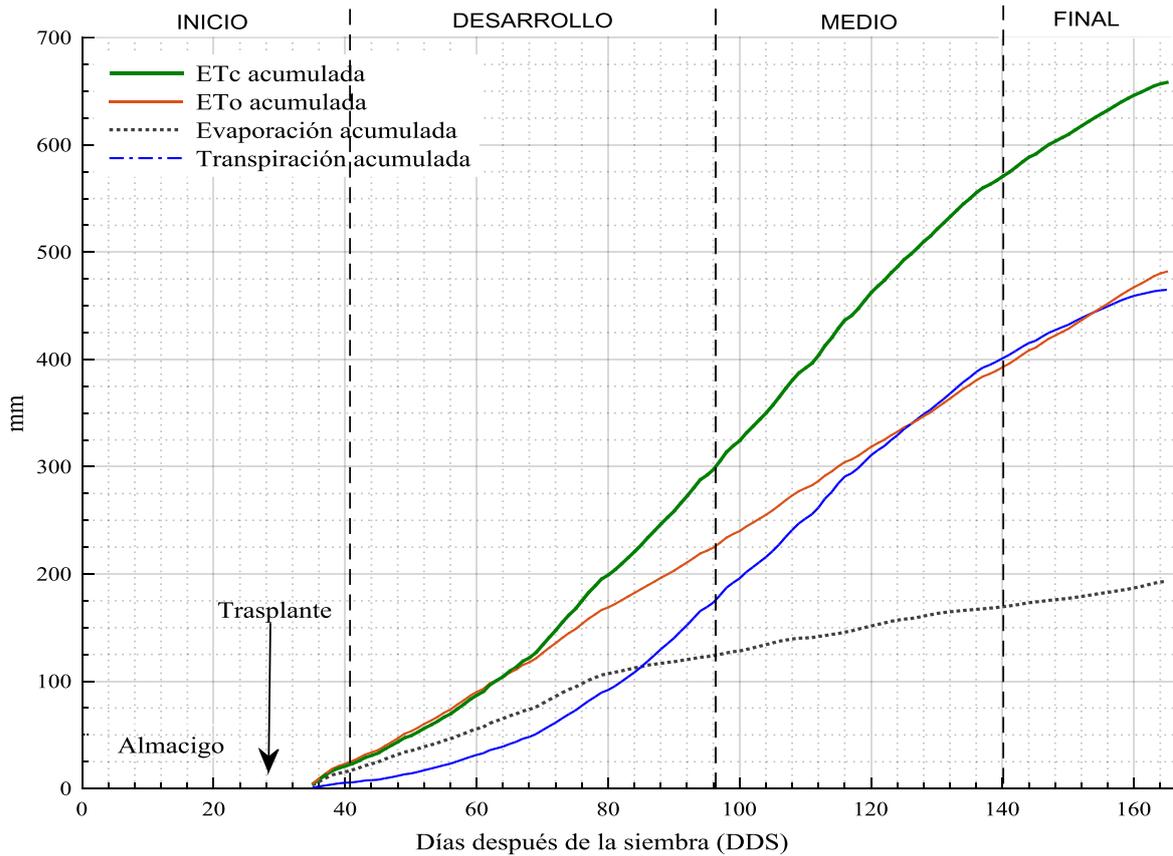


Figura 10: Comportamiento de la ETo, ETc, transpiración y evaporación acumulada

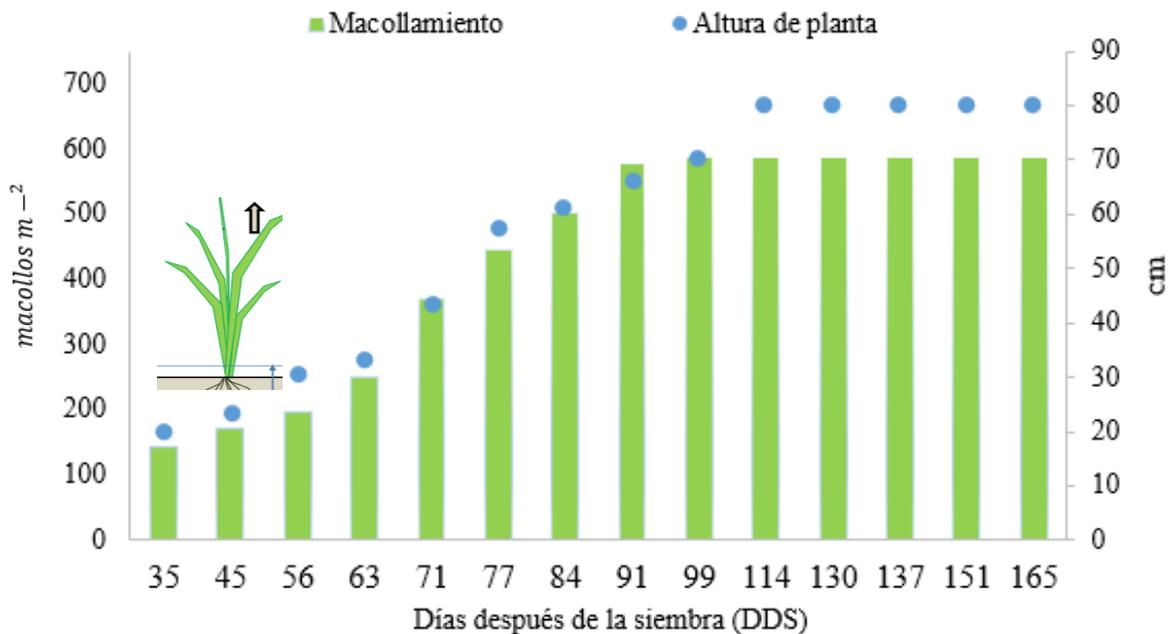


Figura 11: Variación temporal de la Alt. planta y macollamiento del arroz IR 71706

En la Figura 12 se presenta el ciclo del cultivo del arroz IR 71706 con las fases fenológicas reconocidas en campo, elaborado con el apoyo del equipo de investigación del Área Experimental de Riego (AER).



Figura 12: Ciclo del cultivo del arroz variedad IR 71706

Fuente: Área Experimental de Riego (AER)

4.3 COEFICIENTE DE CULTIVO (Kc) DEL ARROZ IR 71706

El coeficiente de cultivo del del arroz IR 71706 se obtuvo al relacionar el valor de la ETc y la ETo. En la Tabla 15 se presenta el Kc obtenido por etapa fenológica observándose que los valores de Kc inicial y medio aumentan de acuerdo al crecimiento del cultivo hasta la fase reproductiva (floración-antesis). Según Allent *et al* (2006), la variación del Kc depende del área foliar (macollamiento), que implica un mayor número de estomas y por otro lado la edad, altura de planta y la evaporación de la humedad del suelo. El Kc final declina por la senescencia propia del cultivo. Ver Figura 13

Es importante recalcar que el lisímetro de drenaje no se vio afectado por el efecto de borde porque se ubicó en el centro de un área mayor de cultivo.

Cuadro 15: Kc obtenido por etapas fenológicas

Etapa fenológica	DDS	ETo (mm)	ETc (mm)	Kc
Plántula	40	3.86	3.48	0.90
Macollamiento	77	3.65	4.37	1.17
Máximo macollamiento	94	3.58	6.19	1.73
Inicio del primordio floral	104	3.60	6.21	1.72
Estado de huso	113	4.07	7.00	1.71
Floración-antesis	126	3.68	6.54	1.77
Grano lechoso	140	3.79	5.19	1.36
Grano pastoso	151	3.62	3.93	1.08
Grano ceroso	158	3.93	3.72	0.95
Madurez fisiológica	165	3.12	2.64	0.84

Allent *et al* (2006) indican que mientras la ETo representa un indicador de la demanda climática, el valor de ETc y Kc varía principalmente en función de las características particulares del cultivo, variando solo en una pequeña proporción en función del clima. La variación del coeficiente del cultivo Kc expresa los cambios en la vegetación y en el grado de cobertura del suelo.

La Figura 13 muestra la variación temporal del Kc y se puede apreciar que las tendencias de los valores de Kc siguen el comportamiento típico del Kc obtenido por otros autores y la FAO. Desde la etapa de iniciación del primordio floral hasta el estado de huso, se presentó un problema fitosanitario causado por la enfermedad quemado del arroz (*Pyricularia oryzae*) que finalmente fue superado, sin embargo, es posible que haya tenido incidencia en el Kc.

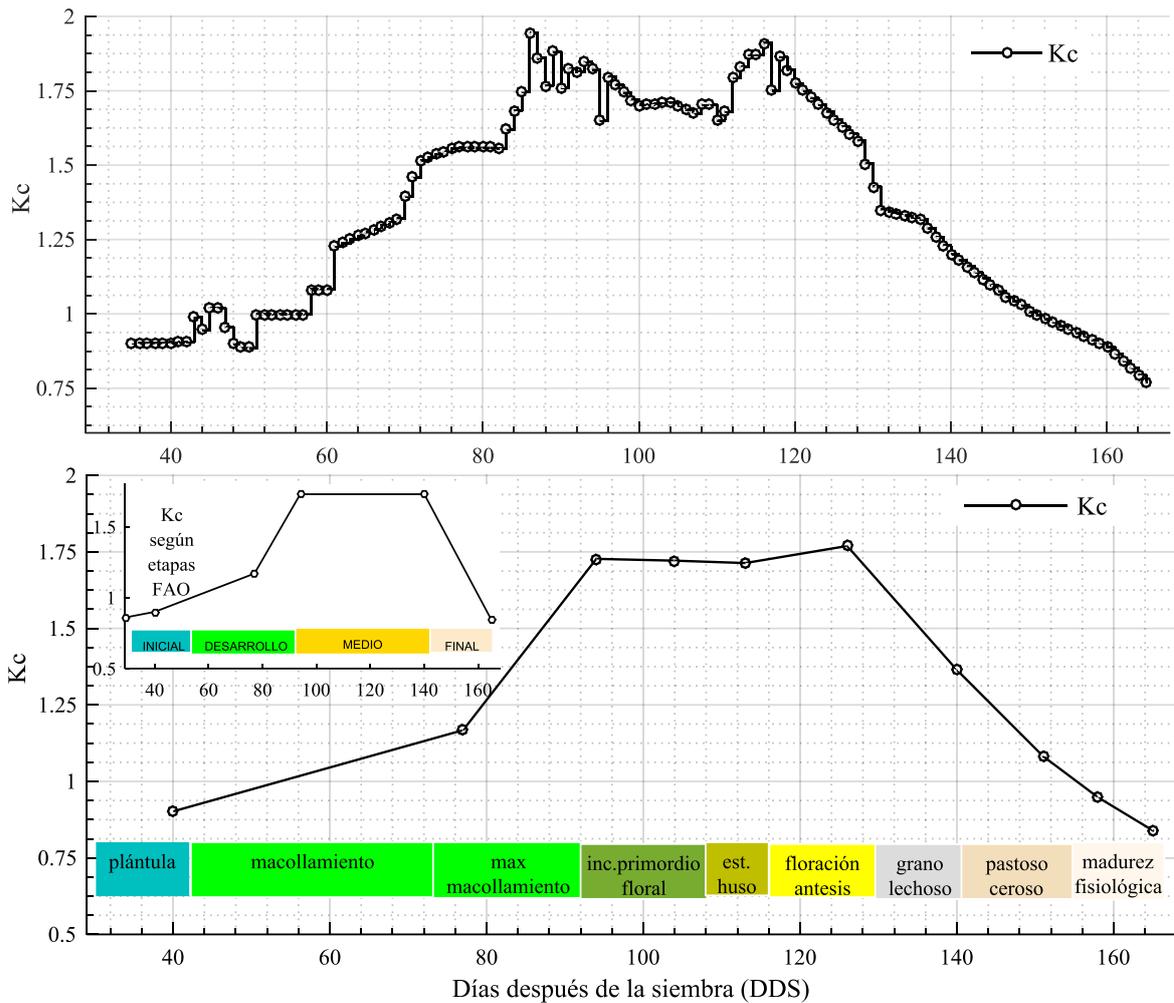


Figura 13: Variación diaria del Kc (panel superior) y variación por etapa fenológica (panel inferior)

4.3.1 Kc del arroz IR 71706 según las etapas definidas por la FAO

La importancia de presentar un Kc según las etapas de la FAO radica en la fácil interpretación y aplicación en campo por los agricultores. LA FAO presenta cuatro etapas de crecimiento del cultivo: inicial, desarrollo, medio y final con tres valores de coeficiente único (promedio temporal) Kc- inicial, Kc-medio y Kc-final (Allent *et al* 2006). Ver Figura 14.

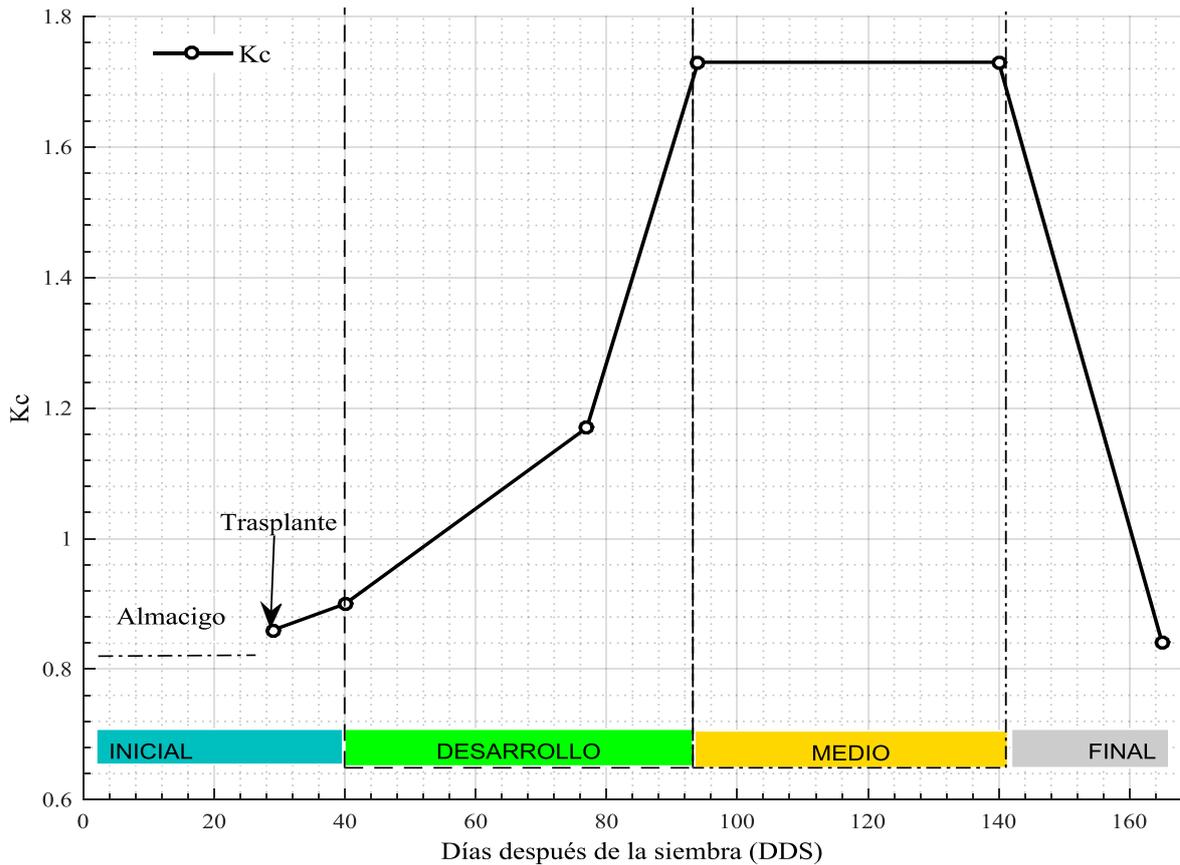


Figura 14: Kc según las etapas definidas por la FAO

En el Tabla 16 se muestra el Kc obtenido en la presente investigación y los reportados en la revisión de literatura con la finalidad de comparar los resultados. Como podemos apreciar los valores de Kc recomendados por la FAO son menores a los obtenidos en la presente investigación. Mohan y Arumugam (1994) reporta valores de Kc en el rango de 0.95 -1.69 que guardan estrecha relación con el Kc obtenido en el rango de 0.9 a 1.7. Por otro lado, Seung, H.Y (2006) reporta valores de Kc menores y Choudhry y Kumar (2016) reporta valores de Kc superiores al Kc obtenido. Ver Figura 15

Tabla 16: Kc obtenido comparado con otros investigadores

Etapa	Kc Inicial	Kc Media	Kc Final
Kc obtenido	0.9-1.17	1.70	1.08-0.84
Kc FAO	1.05	1.20	0.9-0.6
Choudhury y Kumar (2016)	1.06-1.12	1.73-1.88	1.36-1.45
Seung, H.Y (2006)	0.78-1.07	1.35-1.58	0.83-1.01
Mohan, y Arumugam (1994)	0.95-1.18	1.65-1.69	0.92-0.96

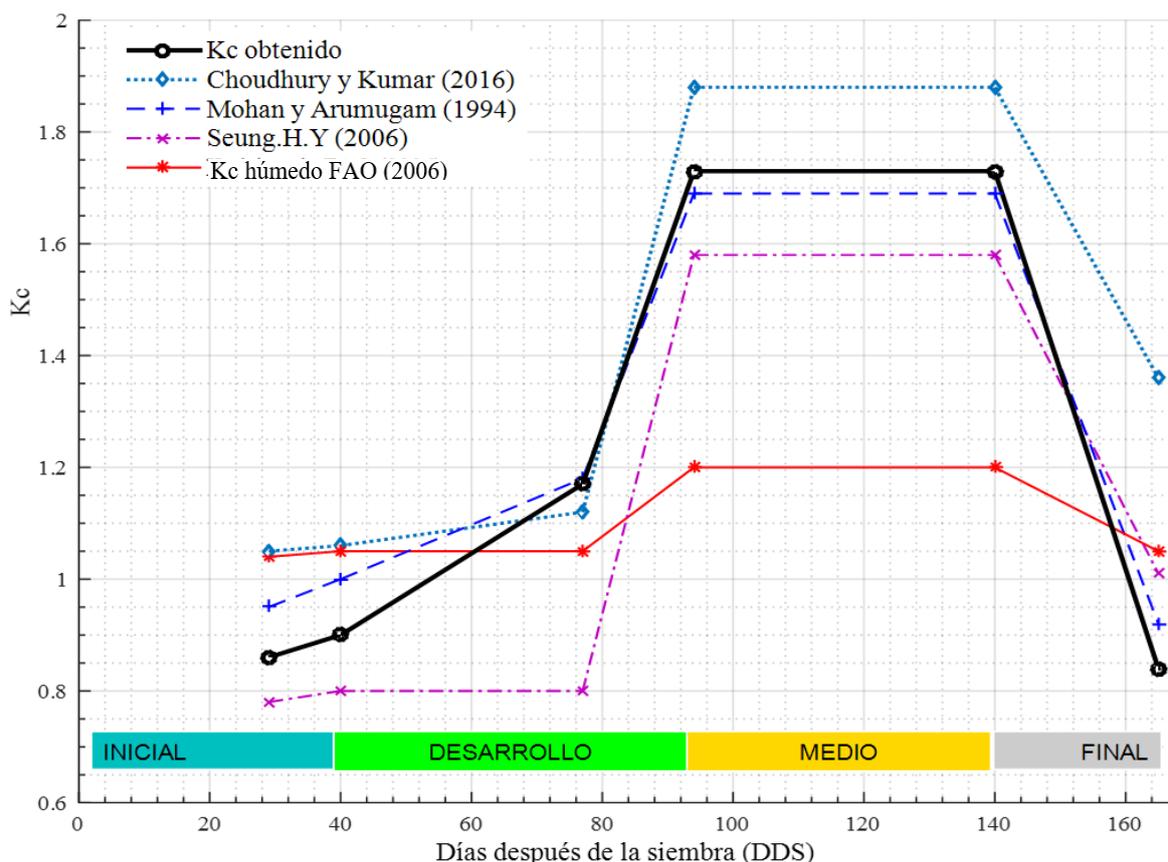


Figura 15: Kc obtenido comparado con el Kc de la FAO y otros

De acuerdo con la comparación de los coeficientes de cultivo (K_c), se puede notar que tienden claramente a diferir unos de otros, las diferencias se atribuyen a los patrones de cultivo y las variedades, los cambios en las condiciones climáticas locales, y las diferencias estacionales en la etapa de crecimiento del cultivo.

4.3.2 Eficiencia del uso del agua

Según González *et al* (2015) refiere que la eficiencia del uso del agua es usada exclusivamente para denotar la cantidad o el valor del producto sobre el volumen o valor de agua consumida, se puede expresar la producción en términos de peso de grano y la cantidad de agua en valores de ET_c o agua aplicada.

La eficiencia del uso de agua aplicada fue de 0.82 kg de grano por m^3 y un consumo específico del agua aplicada de 1219.5 m^3 por tonelada de grano. La productividad del agua consumida como ET_c fue de 1.14 kg de grano por m^3 y un consumo específico de agua consumida de 877.2 m^3 por tonelada de grano cosechado. (ver Tabla 17).

González *et al* (2015) utilizando riego por aspersión reporta una eficiencia del uso de agua aplicada de 0.8 kg de arroz por m^3 y un consumo específico de 1250 m^3 por tonelada de arroz cosechado y Jacob, W (2003) sobre la productividad del agua como ETc en arroz reporta valores en el rango de 0.5 a 1.1 kg/m^3 .

Tabla 17: Eficiencia del uso de agua

Lámina de riego aplicado (mm)	ETc total (mm)	Rendimiento ($t\ ha^{-1}$)	Eficiencia del uso de agua aplicada ($kg\ m^{-3}$)	Productividad del agua consumida como ETc ($kg\ m^{-3}$)	Consumo Específico ($m^3\ t^{-1}$) (agua aplicada)	Consumo Específico ($m^3\ t^{-1}$) (agua consumida)
917.46	658.23	7.49	0.82	1.14	1219.5	877.2

V. CONCLUSIONES

1. Los coeficientes del cultivo del arroz IR 71706 según las etapas definidas por la FAO (Kc inicial, Kc medio y Kc final) fueron de 0.9, 1.70 y 0.84 respectivamente bajo riego por goteo.
2. La evapotranspiración de referencia (ET_o) obtenida por el método FAO Penman-Monteith varió de 1.75 a 5.16 mm $día^{-1}$ con valor promedio de 3.78 mm $día^{-1}$ y 481.88 mm de ET_o para todo el periodo vegetativo.
3. Del balance de humedad del suelo se obtuvo la ET_c, el máximo valor diario fue de 9.19 mm $día^{-1}$ en la etapa de estado de huso y floración y el mínimo de 1.35 mm $día^{-1}$ en la etapa final del cultivo y un promedio de 5.02 mm $día^{-1}$. La ET_c total fue de 658.23 mm para 587 macollos m^{-2} y una altura promedio de 80 cm.
4. La eficiencia de uso del agua aplicada fue de 0.82 kg de grano por m^3 y un consumo específico del agua aplicada de 1219.5 m^3 por tonelada de grano. La productividad del agua consumida como ET_c fue de 1.14 kg de grano por m^3 y un consumo específico de agua consumida de 877.2 m^3 por tonelada de grano.

VI. RECOMENDACIONES

1. Los valores de K_c obtenidos en la presente investigación mediante el lisímetro de drenaje deben ser usados en las programaciones de riego de las zonas arroceras.
2. Hacer otras investigaciones en K_c del arroz con tres repeticiones como mínimo y bajo riego por aspersión, inundación y alternancia de humedecimiento - secado y condiciones climáticas diferentes.
3. Obtener el valor de capacidad de campo del suelo mediante el uso del sensor GS1 tipo FDR.
4. Determinar la evapotranspiración de referencia (E_{To}) mediante lisímetro sembrando Grass como cultivo de referencia.

VII. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, R.; Pereira, L.; Raes, D.; Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación (FAO). Roma. 298 p.
- Armfield. (2015). Instruction Manual Lysimeter. Armfield Limited. 24 p. Manual
- Blanco, O. (2014). Agronomía del cultivo del arroz en riego por aspersión: variedades, riego, fertilización y control de malas hierbas. Tesis Dr. Lleida-España. Universitat de Lleida. 1-94 p.
- Bouman, B.A.M.; Tuong, T.P. (2012). Field water management to save water and increase its productivity in irrigated rice. *Agric. Water manage.* 49 (1):11-30
- Brown, P. (2000). Basics of evaporation and evapotranspiration. Turf irrigation management series: I. the University of Arizona – College of Agriculture. Arizona.
- Chaudhary, R.C; Nanda, J.S; Tran, D.V. 2003. Guía para identificar las limitaciones del campo en la producción de arroz. Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación (FAO). Roma. 73 p.
- Choudhury, B.U; Kumar, A.S. 2016. Estimation of crop coefficient of irrigated transplanted puddled rice byfield scale water balance in the semi-arid Indo-Gangetic Plains, India. *Revista Agricultural Water Management (176-2016):142-150.*
- Cisneros, A. 2003. Apuntes de la materia de riego y drenaje. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 164 pp. Disponible en <http://www.ingenieria.uaslp.mx>
- Decagon Devices, Inc. 2015. Operator's Manual GS1 soil moisture sensor. 22 p.
- Droogers, P. 2000. Estimating actual evapotranspiration using a detailed agro-hydrological model. *Journal of Hydrology* 229: 50–58.

- Enciso, J.M; Porter, D; Périès, X. 2007. Uso de sensores de humedad del suelo para efficientizar el riego. Texas, USA.
- Fernández, R; Yruela, MC; Milla, M; García, JP; Oyonarte, NA; Ávila, R; Gavilán, P. 2010. Manual de riego para agricultores: Riego Localizado. Junta de Andalucía. Sevilla. 155 p. Módulo 4.
- Fernández. F; Arregocés O. 1980. Crecimiento y etapas del desarrollo de la planta de arroz. Centro internacional de agricultura tropical CIAT. Serie 04SR-05.04. Cali- Colombia. 28 pp
- Gonzales, R. López, S. Herrera, P. 2015. Indicadores de la productividad del agua por cultivos y técnicas de riego en Cuba. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias 1010-2760. Vol. 24, No. 4: 57-63
- Gupta, R.K; Chauhan, H.S; Singh, R.V. 1986. Estimation and prediction of evapotranspiration of paddy crop using climatic data. JI. OfInstitution of Engineers (India)-AG 67: 90-93.
- Heros, E. 2012. Guía técnica: “Manejo técnico del manejo integrado del arroz”. UNALM. 45 pp.
- Izarra, W. J. López, F. M. 2011. Manual de observaciones fenológicas. SENAMHI. Lima, Perú. 99 p.
- Jacob, W. 2003. Descubrir el potencial del agua para la agricultura. Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación (FAO). 62 p
- Kumar, R; Rana, N. S; Saharawat, Y.S; Mishra, A; Kumar, V; Gathala, M. K; Kumar, R; Dwivedi, A. 2017. Improvement in Water Productivity without Yield Penalty of Direct Seeded Rice under Micro Irrigation Systems and Tillage Options in Indo-Genetic Plain of India. EE.UU.
- Lourence, F.J; Pruitt, W.O. 1971. Energy balance and water use of rice grown in the central valley of California. Agron. J. 63: 827-832.
- Lallana, H. 2004. Fisiología vegetal-Unidad temática crecimiento. Universidad Nacional de Entre Ríos. Paraná, Argentina. 21 p

- Mejía, J. 2012. Hidrología Aplicada. Universidad Nacional Agraria la Molina. 222pp
- MINAG (Ministerio de Agricultura). (2010). Arroz en el Perú. Oficina de Estudios Económicos y Estadísticos - OEEE. Lima. 6 pp. Disponible en <http://www.minagri.gob.pe>
- Moratiel, R; Martinez, A. (2011). Evapotranspiration and crop coefficients of rice (*Oryza sativa* L.) under sprinkler irrigation in a semiarid climate determined by the surface renewal method. *Revista Irrig Sci* (2013) 31:411–422
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (abril, 2018). Seguimiento del mercado del arroz de la FAO. Volumen XXI edición N°.1: 1-9.
- Padilla Soldevilla, JG. 2006. Coeficiente del cultivo para Césped americano utilizando lisímetros de drenaje, durante la estación de otoño. Tesis Ing. Agrícola Ciudad de Lima, Perú, UNALM. 144 p.
- Rao, A.S; Thomas R; Prabha, H. 1988. Evapotranspiration rates of rice varieties Culture-20 and Pattami-20 in a humid tropical climate. *Mausam* 39(1): 111-112.
- Sahu S.K; Dholbehera M.M; Senapathi S.C; Sharma S.D. 1989. Establishment of a model for evapotranspiration from pan evaporation for upland paddy, *Ind. J. of Power and River Valley Development* 237-240.
- Seung, H. 2006. Estimation of Paddy Rice Crop Coefficients for Penman-Monteith and FAO Modified Penman Method. *Revista ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers)* 062209. 1-12pp
- Shaxon, F; Barber, R. 2005. FAO (Food and Agriculture Organization). 2005. Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal. Roma, Italia.
- SIEA (Sistema integrado de estadísticas agrarias, PE); MINAGRI (Ministerio de agricultura y riego, PE). 2016. Resultado final de la encuesta nacional de intenciones de siembra 2017 – 2018 (en línea). Lima – Perú. Consultado 19 ago. 2017. Disponible en <http://siea.minag.gob.pe>.
- Spectrum Technologies, Inc. 2017. Product Manual Fieldscout TDR 350 soil moisture meter. 36 p.

- Studeto, P; Hsiao, T; Fereres, E; Raes, D. 2012. Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación. Roma. 510 pp.
- Tabra, S. 2013. La preocupante y desigual situation del agua en el Perú. SERVINDI. Boletin 2013-1.1-6
- Tomar, V.S; O'Toole J.C. 1980. Water use in lowland rice cultivation in Asia: A review of evapotranspiration. Revista Agric. Water Management 3: 83-106.
- Vásquez, V. Issaak; V. Cristian; V. Miguel, C. 2017. Fundamentos de ingeniería de riegos.1° Ed. Lima, Perú. 442 p
- Wherley, B; Sinclaer, T; Dukes, M. D; Miller, G; Sinclair, T. 2009. Design, construction, and field evaluation of a lysimeter system for determining turfgrass water use. University of Florida, Agronomy. 122: 373- 376 P.

VIII. ANEXOS

ANEXO 1: TRANSPIRACIÓN Y EVAPORACIÓN

Fecha	DDS	ETc (mm)	Transpiración		Evaporación	
			mm	%	mm	%
Dic-20	35	3.78	0.70	0.18	3.09	0.82
Dic-21	36	4.44	1.15	0.26	3.29	0.74
Dic-22	37	4.28	1.00	0.23	3.28	0.77
Dic-23	38	4.00	0.96	0.24	3.04	0.76
Dic-24	39	2.39	0.99	0.41	1.41	0.59
Dic-25	40	1.96	0.60	0.31	1.36	0.69
Dic-26	41	2.03	0.30	0.15	1.74	0.85
Dic-27	42	2.61	0.76	0.29	1.85	0.71
Dic-28	43	3.24	1.01	0.31	2.23	0.69
Dic-29	44	2.06	0.35	0.17	1.71	0.83
Dic-30	45	2.13	0.39	0.18	1.74	0.82
Dic-31	46	3.75	1.20	0.32	2.55	0.68
Ene-01	47	3.40	1.12	0.33	2.28	0.67
Ene-02	48	3.35	1.24	0.37	2.11	0.63
Ene-03	49	3.74	1.43	0.38	2.31	0.62
Ene-04	50	2.03	0.85	0.42	1.18	0.58
Ene-05	51	3.15	1.34	0.42	1.82	0.58
Ene-06	52	3.66	1.62	0.44	2.04	0.56
Ene-07	53	3.07	1.47	0.48	1.60	0.52
Ene-08	54	3.31	1.58	0.48	1.73	0.52
Ene-09	55	3.97	1.63	0.41	2.34	0.59
Ene-10	56	3.07	1.46	0.47	1.62	0.53
Ene-11	57	4.45	2.06	0.46	2.39	0.54
Ene-12	58	4.33	2.08	0.48	2.24	0.52
Ene-13	59	4.78	2.15	0.45	2.63	0.55
Ene-14	60	3.89	1.87	0.48	2.02	0.52
Ene-15	61	3.31	1.59	0.48	1.72	0.52
Ene-16	62	6.39	2.85	0.45	3.54	0.55
Ene-17	63	3.82	1.67	0.44	2.16	0.56
Ene-18	64	3.82	1.63	0.43	2.19	0.57
Ene-19	65	5.02	2.46	0.49	2.56	0.51
Ene-20	66	3.75	1.98	0.53	1.77	0.47
Ene-21	67	5.52	2.90	0.53	2.62	0.47

Continuación

Ene-22	68	3.23	1.66	0.51	1.57	0.49
Ene-23	69	4.78	2.63	0.55	2.15	0.45
Ene-24	70	6.97	3.64	0.52	3.33	0.48
Ene-25	71	7.03	3.59	0.51	3.45	0.49
Ene-26	72	6.67	3.47	0.52	3.21	0.48
Ene-27	73	7.42	4.00	0.54	3.42	0.46
Ene-28	74	6.84	3.80	0.56	3.04	0.44
Ene-29	75	5.77	3.50	0.61	2.27	0.39
Ene-30	76	7.56	4.43	0.59	3.14	0.41
Ene-31	77	7.63	4.43	0.58	3.20	0.42
Feb-01	78	6.24	3.84	0.62	2.40	0.38
Feb-02	79	6.61	4.08	0.62	2.53	0.38
Feb-03	80	3.65	2.39	0.66	1.26	0.34
Feb-04	81	4.71	3.46	0.73	1.26	0.27
Feb-05	82	5.43	4.21	0.77	1.23	0.23
Feb-06	83	5.77	4.37	0.76	1.39	0.24
Feb-07	84	5.80	4.37	0.75	1.43	0.25
Feb-08	85	6.09	4.96	0.81	1.13	0.19
Feb-09	86	6.83	5.33	0.78	1.50	0.22
Feb-10	87	6.30	5.47	0.87	0.84	0.13
Feb-11	88	6.45	5.70	0.88	0.76	0.12
Feb-12	89	6.10	5.14	0.84	0.96	0.16
Feb-13	90	5.87	5.26	0.90	0.61	0.10
Feb-14	91	7.30	6.25	0.86	1.05	0.14
Feb-15	92	6.87	5.89	0.86	0.98	0.14
Feb-16	93	7.52	6.52	0.87	0.99	0.13
Feb-17	94	7.74	6.66	0.86	1.08	0.14
Feb-18	95	4.21	3.61	0.86	0.60	0.14
Feb-19	96	5.24	4.28	0.82	0.97	0.18
Feb-20	97	7.88	6.69	0.85	1.19	0.15
Feb-21	98	8.50	7.14	0.84	1.36	0.16
Feb-22	99	5.76	4.63	0.80	1.13	0.20
Feb-23	100	4.75	4.05	0.85	0.70	0.15
Feb-24	101	7.16	5.84	0.82	1.32	0.18
Feb-25	102	6.11	4.61	0.75	1.50	0.25
Feb-26	103	6.27	4.71	0.75	1.56	0.25
Feb-27	104	6.25	4.76	0.76	1.49	0.24
Feb-28	105	7.03	5.49	0.78	1.55	0.22
Mar-01	106	7.78	6.11	0.79	1.67	0.21
Mar-02	107	8.12	7.09	0.87	1.04	0.13
Mar-03	108	7.63	6.58	0.86	1.05	0.14
Mar-04	109	6.77	6.04	0.89	0.73	0.11
Mar-05	110	4.64	4.42	0.95	0.22	0.05
Mar-06	111	4.47	4.13	0.92	0.34	0.08

Continuación

Mar-07	112	7.35	6.27	0.85	1.08	0.15
Mar-08	113	9.19	8.37	0.91	0.82	0.09
Mar-09	114	7.09	6.05	0.85	1.04	0.15
Mar-10	115	8.85	7.99	0.90	0.85	0.10
Mar-11	116	7.79	6.52	0.84	1.28	0.16
Mar-12	117	4.06	2.96	0.73	1.10	0.27
Mar-13	118	6.32	4.65	0.74	1.67	0.26
Mar-14	119	7.66	6.15	0.80	1.51	0.20
Mar-15	120	7.51	6.09	0.81	1.41	0.19
Mar-16	121	6.09	4.62	0.76	1.48	0.24
Mar-17	122	5.28	3.91	0.74	1.37	0.26
Mar-18	123	6.95	5.40	0.78	1.55	0.22
Mar-19	124	5.82	4.74	0.81	1.08	0.19
Mar-20	125	6.67	5.69	0.85	0.98	0.15
Mar-21	126	4.92	4.40	0.89	0.52	0.11
Mar-22	127	5.73	4.76	0.83	0.97	0.17
Mar-23	128	6.23	4.79	0.77	1.44	0.23
Mar-24	129	5.01	3.96	0.79	1.05	0.21
Mar-25	130	6.39	5.12	0.80	1.28	0.20
Mar-26	131	5.71	4.83	0.85	0.88	0.15
Mar-27	132	5.90	5.22	0.89	0.68	0.11
Mar-28	133	5.93	5.27	0.89	0.66	0.11
Mar-29	134	5.97	5.37	0.90	0.60	0.10
Mar-30	135	5.00	4.50	0.90	0.51	0.10
Mar-31	136	5.62	5.09	0.91	0.53	0.09
Abr-01	137	4.56	4.05	0.89	0.51	0.11
Abr-02	138	2.95	2.35	0.80	0.59	0.20
Abr-03	139	3.54	3.02	0.85	0.52	0.15
Abr-04	140	4.12	3.29	0.80	0.83	0.20
Abr-05	141	3.92	3.18	0.81	0.74	0.19
Abr-06	142	4.61	3.73	0.81	0.88	0.19
Abr-07	143	4.89	3.85	0.79	1.04	0.21
Abr-08	144	4.54	3.46	0.76	1.08	0.24
Abr-09	145	2.78	2.08	0.75	0.70	0.25
Abr-10	146	4.49	3.81	0.85	0.68	0.15
Abr-11	147	4.35	3.58	0.82	0.78	0.18
Abr-12	148	3.21	2.60	0.81	0.61	0.19
Abr-13	149	3.23	2.58	0.80	0.65	0.20
Abr-14	150	3.10	2.39	0.77	0.71	0.23
Abr-15	151	4.06	3.26	0.80	0.80	0.20
Abr-16	152	3.89	2.99	0.77	0.91	0.23
Abr-17	153	3.84	2.89	0.75	0.95	0.25
Abr-18	154	3.81	2.81	0.74	1.00	0.26
Abr-19	155	3.60	2.60	0.72	1.00	0.28

Continuación

Abr-20	156	3.44	2.61	0.76	0.84	0.24
Abr-21	157	3.76	2.79	0.74	0.98	0.26
Abr-22	158	3.72	2.71	0.73	1.02	0.27
Abr-23	159	3.30	2.35	0.71	0.96	0.29
Abr-24	160	3.23	1.99	0.62	1.24	0.38
Abr-25	161	2.64	1.46	0.56	1.17	0.44
Abr-26	162	2.90	1.34	0.46	1.56	0.54
Abr-27	163	3.00	1.42	0.47	1.58	0.53
Abr-28	164	2.06	0.89	0.43	1.17	0.57
Abr-29	165	1.35	0.52	0.39	0.83	0.61

ANEXO 2: CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL SENSOR GS1

Característica	Descripción
Tiempo de medición:	10 ms (milisegundos)
Precisión:	± 0.03 m3 / m3 en suelos típicos, hasta 8 dS/m extracto de saturación EC.
Con calibración específica del suelo:	± 0.01 a 0.02 m3 / m3 en cualquier material.
Resolución:	0.001 m3 / m3 VWC en suelos minerales
Requisitos de alimentación:	3.0 VDC a 15 VDC (máximo absoluto) a 15 mA
Salida:	1,000 a 2,500 mV.
Entorno operativo:	-40 a 50 / °C
Rango de medición:	0 a 57% VWC
Dimensiones del sensor:	5,1 cm x 2,4 cm x 2,1 cm
Longitud de la aguja:	5.2 cm
Tipos de conectores:	Conector de 3.5 mm (estéreo) o cables pelados y estañados (cable flexible)
Longitud del cable:	5 m estándar; Longitudes de cable personalizadas de hasta 40 m disponibles bajo pedido
Compatibilidad del registrador de datos (no exclusivo):	Decagon: Em50, Em50R, Em50G, Em5b y ProCheck. Campbell Scientific: CR10X, CR850, 1000, 3000, etc

Fuente: Decagon Devices, Inc (2015)

ANEXO 3: CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL SENSOR TDR-350

Característica	Descripción
Unidades de medida:	Porcentaje de contenido volumétrico de agua (VWC)
Resolución:	VWC: 0.1% VWC unidades EC: 0.01 mS / cm Temperatura: 0.2 °F (0.1 C)
Exactitud:	VWC: contenido volumétrico de agua de $\pm 3,0\%$ con conductividad eléctrica < 2 mS / cm EC: ± 0.1 mS / cm Temperatura: ± 1.8 F (± 1 C)
Distancia	VWC: 0% a saturación (la saturación es típicamente alrededor del 50% del agua volumétrica) Temperatura: -22 a 140 °F (-30 a 60 C)
Poder:	4 pilas AA Las baterías de litio optimizarán la vida de la batería.
Capacidad del registrador:	50,000 medidas.
Pantalla:	LCD retro iluminada, de alto contraste
GPS:	precisión < 2.5 m
Peso:	4.3 libras. (1.9 kg)
Cabeza de la sonda:	2.4 "x 1.4"
Dimensiones:	(6cm x 3.5cm)
Dimensiones del eje:	Longitud extendida: 38" (96.5cm); Longitud colapsada: 23" (58.4cm); Ancho: 1.4" (3.5cm)
Dimensiones de las varillas disponibles:	Césped 1.5" (3.8cm); Corto 3" (7.6cm); Mediano 4.7" (12cm); Largo 7.9" (20cm) Diámetro: 0.2" (0.5cm) Espaciado: 1.2" (3cm)

Fuente: Spectrum Technologies, Inc (2017)

ANEXO 4: ANALISIS DEL SUELO



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-fia@lamolina.edu.pe

Análisis de Suelo - Salinidad y Sodicidad



Nº 013412

SOLICITANTE : DRA. LIA RAMOS FERNANDEZ
PROCEDENCIA : Lima - ADYAER (Area Demostrativa y Area Experimental de Riego)
RESP. ANALISIS : Ing. Elizabeth Monterrey Porras
FECHA DE ANALISIS : La Molina, 27 de Noviembre de 2017

Número de muestra		CE dS / m Relación 1:1	Análisis Mecánico				pH Relación 1:1	MO %	P ppm	K ₂ O ppm	CaCO ₃ %	Cambiables					
Lab.	Campo		Arena %	Limo %	Arcilla %	Textura						CIC TOTAL	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Al ⁺⁺⁺ +H ⁺
												Cmol (+) / Kg					
13412	M-1	1.81	62.56	22.00	15.44	Franco arenoso	7.67	2.75	50.85	368.00	1.09	10.94	8.65	1.61	0.08	0.60	-

MUESTRA		Saturación %	pH Suelo : Agua 1:3	C.E. dS/m 1:3	CATIONES SOLUBLES (meq/l)					ANIONES SOLUBLES (meq/l)					Yeso Soluble %	Boro Soluble ppm	
Lab	Campo				Ca ⁺⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	SUMA	Cl ⁻	SO ₄ ⁼⁼	CO ₃ ⁼⁼	HCO ₃ ⁼⁼	NO ₃			SUMA
13412	M-1	44.50	7.41	2.86	17.55	5.50	1.54	3.91	28.50	16.92	6.52	0.00	5.15	0.06	28.65	0.07	0.16

Parametros Hidricos	
Cc (%)	15.03
Pm (%)	7.83

gotes.

LABORATORIO DE ANALISIS DE AGUA Y SUELO

Ing. Msc. Teresa Velásquez Bejarano
 JEFE DE LABORATORIO



MÉTODOS SÉGUIDOS EN EL ANÁLISIS

1. Análisis Mecánico: Textura por el Método de Hidrómetro.
2. Conductividad eléctrica: C.E. Lectura de extracto de relación suelo agua 1:1 y extracto de la pasta saturada.
3. pH. Método de potenciómetro, relación suelo-agua 1:1 y en la pasta saturada.
4. Calcáreo total: Método gaso-volumétrico.
5. Materia orgánica: Método de Walkley y Black % M.O. = % C x 1,724
6. Nitrógeno total: Método Micro Kjeldahl.
7. Fósforo: Método de Olsen Modificado, Extracto, NaHCO_3 0.5M, pH = 8.5
8. Potasio Disponible: Extracto Acetato de Amonio 1N, pH 7,0
9. Capacidad de Intercambio Catónico: Acetato de Amonio 1N pH 7,0
10. Cambiables: Determinaciones en extracto Amónico.
 - Ca^{2+} : Espectrofotometría de Absorción Atómica.
 - Mg^{2+} : Espectrofotometría de Absorción Atómica.
 - K^+ : Espectrofotometría de Absorción Atómica.
 - Na^+ : Espectrofotometría de Absorción Atómica.
11. Iones Solubles
 - a. Cationes Solubles:
 - Ca^{2+} : Espectrofotometría de Absorción Atómica.
 - Mg^{2+} : Espectrofotometría de Absorción Atómica.
 - K^+ : Espectrofotometría de Absorción Atómica.
 - Na^+ : Espectrofotometría de Absorción Atómica.
 - b. Aniones Solubles:
 - Cl^- : Volumétrico: Nitrato de Plata.
 - $\text{CO}_3^{=}$: Volumétrico: Ácido Clorhídrico.
 - HCO_3^- : Volumétrico: Ácido Clorhídrico.
 - $\text{SO}_4^{=}$: Tubidimétrico: Sulfato de Bario.
 - NO_3^- : Colorimétrico.
12. Yeso Soluble: Solubilización con agua y precipitación con acetona.
13. Boro Soluble: Colorimétrico, Método de la Curcumina.

INTERPRETACIÓN

C.E. (Sales)
Según respuesta de los cultivos
(dS/m)

Muy ligeramente Salino : < 2
Ligeramente Salino : 2 - 4
Moderadamente Salino : 4 - 8
Fuertemente Salino : 8 - 16
Extremadamente Salino : > 16

DISPONIBLES

Clase	Materia Orgánica	Calcáreo Total $\text{CaCO}_3\%$	Fósforo P (ppm)	Potasio K (ppm)
Bajo	< 2%	< 1%	< 7	< 100
Medio	2 - 4%	1 - 5%	7 - 14	100 - 240
Alto	> 4%	> 5%	> 14	> 240

CIC Efectiva

< 5 meq/100 gr	Muy baja
5 - 10	Baja
10 - 15	Medio
15 - 20	Alto
> 20	Muy alto

Reacción del Suelo (pH)

5.1 - 5.5 Fuertemente ácido.
5.6 - 6.0 Moderadamente ácido.
6.1 - 6.5 Ligeramente ácido.
6.6 - 7.3 Neutro.
7.4 - 7.8 Ligeramente alcalino.
7.9 - 8.4 Moderadamente alcalino.

EQUIVALENCIAS

1 mmhos/cm = 1 ds/m
1 cmol(+)/kg = 1 meq/100gr

* CIC: Capacidad Intercambiable de Cationes.

ANEXO 5: CAPACIDAD DE CAMPO Y PUNTO DE MARCHITEZ DEL SUELO



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



INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN SUELO

SOLICITANTE : ING. LIA RAMOS FERNÁNDEZ
PROCEDENCIA : LIMA/ LIMA/ LA MOLINA
REFERENCIA : H.R. 58706
BOLETA : 351
FECHA : 02/06/2017

Lab	Número Muestra	C.C.	P.M.
	Claves	%	%
4029		23.34	13.08



Dr. Sady García Bendezú
Jefe del Laboratorio

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



ANEXO 6: ANALISIS DEL AGUA DE RIEGO
UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS DRH
LABORATORIO DE AGUA, SUELO, MEDIO AMBIENTE Y FERTIRRIEGO
 Av. La Molina s/n. Telefax: 6147800 Anexo 226 Lima. E-mail: las-fia@lamolina.edu.pe



Nº 008372

ANALISIS DE AGUA - RUTINA

SOLICITANTE : DRA. LIA RAMOS FERNANDEZ
PROCEDENCIA : Lima - ADYAER (Area Demostrativa y Area Experimental de Riego)
RESPONSABLE ANALISIS : Ing. Nore Arévalo Flores
FECHA DE ANALISIS : La Molina, 27 de Noviembre de 2017

Nº LABORATORIO	8372
Nº DE CAMPO	M-1
CE dS/m	0.63
pH	7.40
Calcio meq/l	4.60
Magnesio meq/l	0.65
Sodio meq/l	0.91
Potasio meq/l	0.10
SUMA DE CATIONES	6.25
Cloruro meq/l	0.98
Sulfato meq/l	2.70
Bicarbonato meq/l	2.80
Nitratos meq/l	0.00
Carbonatos meq/l	0.00
SUMA DE ANIONES	6.49
SAR	0.56
CLASIFICACION	C2-S1
Boro ppm	0.02

Dureza total mgCaCO₃/L	156.81
Alcalinidad total mgCaCO₃/L	140.19
Sólidos suspendidos mg/L	6.00
Turbidez mg/L	10.20

LABORATORIO DE ANALISIS DE AGUA Y SUELO

Ing. Msc. Teresa Velásquez Bejarano
 JEFE DE LABORATORIO



CLAVE

PELIGRO DE SALES

C1 - Salinidad baja	(0.00 - 25 dS/m)	:	Buenas para riego de diferentes cultivos. Sólo peligro de salinización de suelos muy impermeables de difícil drenaje interno.
C2 - Salinidad moderada	(0.25 - 0.75 dS/m)	:	De calidad buena para cultivos que se adaptan o toleran moderadamente la sal. Peligro para plantas muy sensibles y suelos impermeables.
C3 - Salinidad entre media y alta	(0.75 - 2.25 dS/m)	:	El suelo debe tener buena permeabilidad. El cultivo seleccionado debe ser tolerante a la sal.
C4 - Salinidad alta	(2.25 - 4.00 dS/m)	:	Sólo para plantas tolerantes y suelos permeables, donde pueden ser necesarios lavados especiales para remover las sales.
C5 - Salinidad muy alta	(4.00 - 6.00 dS/m)	:	Sólo para plantas muy tolerantes, suelos muy permeables y donde se pueden aplicar lavados frecuentes para remover el exceso de sales.
C6 - Salinidad excesiva	(más de 6.00 dS/m)	:	Deben tomarse precauciones para su uso (pueden usarse en suelos muy permeables y/o mezclado con agua de buena calidad).

PELIGRO DE SODIO

S1 - Poco sodio	Sin peligro:
S2 - Medio sódica	Peligro en suelos de textura fina o arcillosa con alta capacidad de cambio especialmente si la permeabilidad es baja, a menos que el suelo contenga yeso. Puede usarse en suelos de textura gruesa entre arenosa y franca u orgánica con permeabilidad adecuada.
S3 - Muy sódica	Peligro en suelos sin yeso, requieren estos suelos buen drenaje, adición de materia orgánica y eventuales enmiendas químicas, tales como yeso o azufre, que no son efectivos si las aguas son de salinidad alta C4.
S4 - Excesivamente sódica	No sirven generalmente para riego. Sólo cuando la salinidad es baja o media, donde la solución de calcio del suelo o el uso del yeso u otras enmiendas pueden hacer factibles el uso de esta agua.

PELIGRO DE BORO, CARBONATO DE SODIO RESIDUAL Y DUREZA

Boro		Na ₂ CO ₃ Residual		Dureza Total	
ppm	Clase	meq/l.	Tipo de agua	mgCaCO ₃ /Lt.	Tipo de agua
< 0.3	Buena	Menor a 1.25	Recomendable	< 75	Agua blanda
		1.25 - 2.50	Poco recomendable	75 - 150	Agua moderada
0.3 - 4.0	Condicionada	Mayor de 2.50	No recomendable	150 - 300	Agua dura
					> 300
> 4.0	No recomendable				

ANEXO 7: PANEL FOTOGRÁFICO

Lisimetro drenaje



Almacigado



30 DDS (trasplante)



50 DDS



80 DDS (macollamiento)



100 DDS



100 DDS (evaluación de transpiración)



140 DDS (Floración)



150 DDS (madurez fisiológica)



160 DDS (Madurez fisiológica)



165 DDS (Cosecha y evaluación)



Rendimiento

