

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE AGRONOMÍA



**“INFLUENCIA DE PERÍODOS DE ESTRÉS HÍDRICO EN DOS
CULTIVARES DE ARROZ (*Oryza sativa* L.) BAJO CONDICIONES
CONTROLADAS”**

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

JOSE MANUEL REYES SAMANIEGO

LIMA - PERÚ

2024

Tesis de grado. Jose Manuel Reyes Samaniego.pdf

INFORME DE ORIGINALIDAD

14%	13%	5%	2%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.lamolina.edu.pe Fuente de Internet	2%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
3	bdigital.unal.edu.co Fuente de Internet	1%
4	biblioteca.inia.cl Fuente de Internet	1%
5	saber.ucv.ve Fuente de Internet	<1%
6	repositorio.unas.edu.pe Fuente de Internet	<1%
7	es.scribd.com Fuente de Internet	<1%
8	purl.org Fuente de Internet	<1%
9	repositorio.unal.edu.co Fuente de Internet	<1%

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE AGRONOMÍA

**“INFLUENCIA DE PERÍODOS DE ESTRÉS HÍDRICO EN DOS
CULTIVARES DE ARROZ (*Oryza sativa* L.) BAJO CONDICIONES
CONTROLADAS”**

JOSE MANUEL REYES SAMANIEGO

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE:
INGENIERO AGRÓNOMO**

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

.....
Ing. M.S. Andrés Virgilio Casas Díaz
PRESIDENTE

.....
Ph. D. Elizabeth Consuelo Heros Aguilar
ASESOR

.....
Ing. Mg. Sc. Héctor Baroni Cantaro Segura
MIEMBRO

.....
Dra. Ruby Antonieta Vega Ravello
MIEMBRO

LIMA – PERÚ

2024

ÍNDICE GENERAL

I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	2
2.1 Importancia del arroz	2
2.2 Taxonomía	2
2.3 Morfología	2
2.3.1 Órganos vegetativos	2
2.3.2 Órganos reproductivos.....	3
2.3.3 Granos.....	3
2.4 Fenología	3
2.4.1 Fase vegetativa	3
2.4.2 Fase reproductiva.....	4
2.4.3 Fase de maduración	4
2.5 Cultivares	5
2.5.1 La Capoteña.....	5
2.5.2 IR-71706.....	5
2.6 Métodos de riego	5
2.6.1 Inundación continua	5
2.6.2 Alternar humedecimiento y secado - AWD	6
2.6.3 Suelo saturado	7
2.6.4 Consumo de agua	7
2.7 Estrés hídrico en arroz	8
2.7.1 Intensidad del estrés	8
2.7.2 Efecto en el rendimiento.....	9
III. METODOLOGÍA	11
3.1 Localización y duración del estudio	11
3.2 Diseño experimental	11
3.3 Caracterización de los tratamientos	12
3.4 Materiales y equipos	13
3.5 Preparación del experimento.....	14
3.6 Manejo del experimento	16
3.7 Manejo de los periodos de estrés hídrico.....	17
3.8 Características de evaluación.....	20

3.8.1	Rendimiento en grano.....	20
3.8.2	Número de panículas por metro cuadrado.....	20
3.8.3	Número de granos por panícula.....	20
3.8.4	Peso de mil granos.....	20
3.8.5	Porcentaje de macollos efectivos con panícula	21
3.8.6	Índice de cosecha.....	21
3.8.7	Altura de planta	21
3.8.8	Número de macollos por maceta	21
3.8.9	SPAD (<i>Soil Plant Analysis Development</i>).....	21
3.8.10	Días a la floración.....	22
3.8.11	Cobertura	22
3.8.12	Fracción transpirable del suelo	22
3.8.13	Evapotranspiración total.....	22
3.8.14	Eficiencia de uso de agua total	22
3.8.15	Eficiencia de uso de agua de grano	23
3.9	Análisis estadístico y colecta de datos	23
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	24
4.1	Objetivo 1: Evaluar la variación del rendimiento y sus componentes en los tratamientos de estrés hídrico leve y moderado en comparación al tratamiento saturado.....	24
4.1.1	Rendimiento en grano.....	24
4.1.2	Análisis del rendimiento a través de los componentes de rendimiento e índice de cosecha	25
4.2	Objetivo 2: Evaluar la variación de los parámetros fisiológicos y morfológicos durante el desarrollo del cultivo en los tratamientos de estrés hídrico leve y moderado en comparación al tratamiento saturado.	28
4.2.1	Índice de cosecha.....	28
4.2.2	Porcentaje de macollos con panícula.....	28
4.2.3	Altura de planta	29
4.2.4	Número de macollos por maceta	30
4.2.5	SPAD (<i>Soil Plant Analysis Development</i>).....	30
4.2.6	Días a la floración.....	31
4.2.7	Cobertura	32

4.3	Objetivo 3: Cuantificar el consumo y la eficiencia de uso de agua en cada uno de los tratamientos.....	33
4.3.1	Evapotranspiración total.....	34
4.3.2	Eficiencia de uso de agua total y de grano.....	34
4.4	Análisis de componentes principales.....	35
4.5	Limitaciones.....	38
V.	CONCLUSIONES.....	41
VI.	RECOMENDACIONES.....	42
VII.	BIBLIOGRAFÍA.....	43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Escala del enrollamiento de hojas de DRS en la fase vegetativa (International Rice Research Institute, 2013)	8
Tabla 2: Escala del secado de hojas de DRS en la fase vegetativa (International Rice Research Institute, 2013)	9
Tabla 3: Escala de la recuperación de plantas después de la sequía (DRR) (International Rice Research Institute, 2013)	9
Tabla 4: Materiales requeridos para la experimentación	14
Tabla 5: Equipos requeridos para la experimentación	14
Tabla 6: Relación entre el peso de la maceta, la humedad volumétrica registrada por el TDR 350 y su conversión a humedad volumétrica a estufa; evaluado durante el periodo de estrés hídrico en la fase vegetativa	18
Tabla 7: Relación entre el peso de la maceta, la humedad volumétrica registrada por el TDR 350 y su conversión a humedad volumétrica a estufa; evaluado durante el periodo de estrés hídrico en la fase reproductiva	19
Tabla 8: Relación entre el rendimiento y evapotranspiración total.....	34

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Croquis del diseño experimental	12
Figura 2: Hojas de arroz con diferentes niveles de estrés hídrico según la escala del enrollamiento de hojas de DRS	13
Figura 3: Relación entre la humedad volumétrica registrada por el TDR 350 y la humedad volumétrica hallada por secado a estufa	15
Figura 4: Relación entre el peso de la maceta y la humedad volumétrica registrada por el TDR 350, evaluado durante el periodo de estrés hídrico en la fase vegetativa	18
Figura 5: Relación entre el peso de la maceta y la humedad volumétrica registrada por el TDR 350, evaluado durante el periodo de estrés hídrico en la fase reproductiva	19
Figura 6: Respuesta agronómica a la cosecha de dos cultivares de arroz manejados sometidos a dos niveles de estrés hídrico	25
Figura 7: Respuesta fisiológica de dos cultivares de arroz manejados sometidos a dos niveles de estrés hídrico	29
Figura 8: Consumo y eficiencia de uso de agua de dos cultivares de arroz sometidos a dos niveles de estrés hídrico	33
Figura 9: Correlación de Pearson para 14 variables evaluadas en 2 cultivares de arroz bajo niveles de riego	36
Figura 10: Análisis de Componentes Principales (PCA) para las variables evaluadas en 2 cultivares de arroz bajo 3 niveles de riego	37

LISTA DE ACRÓNIMOS

AWD	<i>Alternate Wetting and Drying</i> (Alternar humedecimiento y secado)
DDS	Días Después de la Siembra
DRR	<i>Drought Recovery</i> (Recuperación de la Sequía)
DRS	<i>Drought Sensivity</i> (Sensibilidad a la Sequía)
EUAg	Eficiencia de Uso de Agua de grano
EUAt	Eficiencia de Uso de Agua total
FTS	Fracción Transpirable del Suelo
Hv	Humedad volumétrica
IC	Índice de Cosecha
IRRI	International Rice Research Institute
PCA	<i>Principal Component Analysis</i> (Análisis de Componentes Principales)
SES	Sistema de Evaluación Estandarizada del arroz
SPAD	<i>Soil Plant Analysis Development</i>
UNALM	Universidad Nacional Agraria La Molina

RESUMEN

A pesar de que el arroz es uno de los cultivos con mayor consumo de agua, métodos para incrementar la eficiencia de uso de agua no han sido ampliamente adoptados. Se desea encontrar variedades que toleren periodos de sequía manteniendo altos rendimientos. En macetas con sustrato orgánico, se establecieron dos cultivares de arroz: IR-71706 y La Capoteña, para evaluar su respuesta agronómica, fisiológica y morfológica bajo tres niveles de estrés hídrico (sin estrés, estrés leve y estrés moderado), además del consumo de agua. El rendimiento disminuyó en los tratamientos con estrés hídrico, sin diferencias significativas. En general, La Capoteña tuvo un mejor rendimiento en comparación a IR-71706 para todos los niveles de riego, siendo el número de granos por panoja el componente más importante. Dicho componente estuvo altamente correlacionado con el índice de cosecha, el porcentaje de macollos con panoja, y la eficiencia de uso de agua total (EUAt) y de grano (EUAg). En la respuesta fisiológica, los tratamientos saturados tuvieron menor SPAD y mayor cobertura del suelo, observado como plantas más amarillas y desordenadas. La EUAt y la EUAg no tuvieron diferencias significativas, a pesar de que para todos los niveles de riego La Capoteña tuvo mejor eficiencia que IR-71706. En el análisis de componentes principales, las diferencias en el cultivar fueron más determinantes que las diferencias del riego. Debido a estos resultados, se postula que es muy probable que los tratamientos saturados hayan sufrido algún tipo de estrés debido a las condiciones ocasionadas por el sustrato y la maceta, observado en las altas tasas de evapotranspiración reflejadas en la fracción transpirable del suelo.

Palabras clave: tolerancia a sequía, eficiencia de uso de agua, componentes del rendimiento, evapotranspiración.

ABSTRACT

Although rice is one of the most water-intensive crops, methods to increase water use efficiency have not been widely adopted. It is desirable to find varieties that can tolerate periods of drought while maintaining high yields. Two rice cultivars, IR-71706 and La Capoteña, were established in pots with organic substrate to evaluate their agronomic, physiological, and morphological response under three levels of water stress (no stress, mild stress, and moderate stress), in addition to water consumption. Yield decreased in the water stress treatments, with no significant differences. In general, La Capoteña had a better yield compared to IR-71706 for all irrigation levels, with the number of grains per panicle being the most important component. This component was highly correlated with the harvest index, the percentage of tillers with panicle, and total water use efficiency (WUGt) and grain water use efficiency (WUGg). In the physiological response, treatments with no stress had lower SPAD and higher ground coverage, observed as more yellow and messier plants. WUGt and WUGg had no significant differences, although for all irrigation levels La Capoteña had better efficiency than IR-71706. In the principal component analysis, the differences in cultivar were more important than the differences in irrigation. Due to these results, it is very likely that the saturated treatments saturated suffered some type of stress due to the substrate and the pot, observed in the high evapotranspiration rates reflected in the transpirable fraction of the soil.

Key words: drought tolerance, water use efficiency, yield components, evapotranspiration.

I. INTRODUCCIÓN

La seguridad alimentaria de más de la mitad de la población mundial depende de la capacidad del mundo de producir y distribuir arroz (Bandumula, 2018; Furuya & Koyama, 2005). Sin embargo, se estima que alrededor del 51% del cultivo y producción de arroz se reducirá en el próximo siglo debido al impacto de factores abióticos como las precipitaciones, sequía, inundación, temperatura y radiación solar en las diferentes etapas de crecimiento (S. Hussain et al., 2020).

El arroz es la principal fuente de calorías de más de la mitad de la población a nivel mundial, sin embargo es uno de los cultivos con mayor consumo de agua (Avil Kumar & Rajitha, 2019; Carrijo et al., 2017).

Las condiciones climáticas están cambiando abruptamente sin seguir patrón alguno, lo que sugiere que una variedad de arroz para el futuro debe ser capaz de soportar diferentes tipos de estreses bióticos y abióticos con un alto potencial de rendimiento (Jena et al., 2023). Los métodos para incrementar la eficiencia en el uso de agua, no han sido adoptados en el cultivo por las pérdidas potenciales de rendimiento (Carrijo et al., 2017). Debido a los problemas mencionados, se desea encontrar variedades que sean capaces de mantener altos rendimientos, a la cosecha tolerando periodos de sequía y reduciendo el consumo de agua.

El objetivo principal de este estudio fue analizar la influencia de periodos de estrés hídrico en el comportamiento de dos cultivares de arroz. Para este propósito, se han determinado como objetivos (1) Evaluar la variación del rendimiento y sus componentes en los tratamientos de estrés hídrico leve y moderado en comparación al tratamiento saturado. (2) Evaluar la variación de los parámetros fisiológicos y morfológicos durante el desarrollo del cultivo en los tratamientos de estrés hídrico leve y moderado en comparación al tratamiento saturado. (3) Cuantificar el consumo y la eficiencia de uso del agua en cada uno de los tratamientos.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Importancia del arroz

El arroz (*Oryza sativa* L.) es uno de los cultivos alimenticios más importantes del mundo (Jena et al., 2023; Zeigler & Barclay, 2008), habiendo tenido un rol central en la cultura y nutrición humana durante los últimos 10,000 años (Wei & Huang, 2019). El arroz siempre ha sido relevante para la seguridad alimentaria (Bandumula, 2018) y la estabilidad socioeconómica, por lo que la investigación en este cultivo es fundamental para el desarrollo de tecnologías que permitan un aumento en la productividad en países en vías de desarrollo de Asia, América Latina y últimamente África (Zeigler & Barclay, 2008).

2.2 Taxonomía

El arroz es una planta monocotiledónea que pertenece a la familia Poaceae, comúnmente conocidas como gramíneas. La clasificación taxonómica del arroz se muestra a continuación (Clark et al., 1995; Soreng et al., 2015).

Reino: Plantae

Orden: Poales

Familia: Poaceae (= Graminae)

Tribu: Oryzeae

Género: *Oryza*

Especie: *Oryza sativa* L.

2.3 Morfología

2.3.1 Órganos vegetativos

El arroz constantemente produce macollos y hojas como parte de su crecimiento vegetativo (Vergara, 1991). Los macollos son ramificaciones que se desarrollan de las axilas de las hojas en cada uno de los nudos no elongados del tallo central o de otros macollos (S. Yoshida, 1981).

La hoja del arroz está compuesta por la vaina y la lámina. En su intersección existe un par de aurículas y una lígula. La vaina es una elongación de la hoja enrollada en forma cilíndrica que cubre las nuevas hojas en desarrollo (Smith & Dilday, 2002). La lámina de la hoja es alargada y lanceolada, es el principal órgano de fotosíntesis y transpiración (Smith & Dilday, 2002). La hoja bandera es la última hoja en emerger del tallo, y cuando la panícula emerge de la vaina, la hoja bandera se encuentra casi paralelo al eje de la panícula (Smith & Dilday, 2002).

2.3.2 Órganos reproductivos

La panícula está compuesta por el cuello (base), el raquis (eje), las ramas primarias y secundarias, los pedicelos, las glumas rudimentarias y las espiguillas (Smith & Dilday, 2002; S. Yoshida, 1981). El raquis central usualmente mide entre 12 y 15 cm a la antesis, con ocho a diez nudos (Smith & Dilday, 2002). Usualmente sólo una rama principal sale de la base de la panícula, pero bajo condiciones favorables, como clima soleado o suelos fértiles, pueden emerger dos o tres ramas principales (S. Yoshida, 1981).

La espiguilla es la unidad principal de la inflorescencia del arroz, compuesta por glumas (órganos similares a brácteas) y glumillas que forman floretes. El florete incluye la lemma y palea (otros órganos similares a brácteas), lodículos (equivalentes a pétalos), estambres y un carpelo (H. Yoshida & Nagato, 2011). Las flores del arroz son perfectas, compuestas de seis estambres y un pistilo. Además, los dos lodículos en la base de pistilo proveen un mecanismo de apertura floral a la hidratación, lo cual causa la separación de la lemma y la palea (Smith & Dilday, 2002).

2.3.3 Granos

El grano de arroz está compuesto por la cáscara y la cariósida. La cáscara consiste en lemma y palea, donde la lemma cubre dos tercios de la semilla y los extremos de la palea encajan perfectamente para cubrir completamente la semilla (Smith & Dilday, 2002). La cariósida contiene el embrión y el endosperma almidonoso, cubierto por el tegumento y el pericarpo. Cuando la cariósida no está pulida se conoce como arroz marrón (Smith & Dilday, 2002).

2.4 Fenología

2.4.1 Fase vegetativa

La fase vegetativa inicia con la germinación de la semilla y termina con la iniciación de la panícula. La duración de la fase puede ser de 25 a 90 días, y se atribuye principalmente a las

diferencias de los cultivares (Smith & Dilday, 2002). Las diferencias en el tiempo de crecimiento total del arroz se deben principalmente a diferencias en la duración de la fase vegetativa, por lo que las variedades precoces tienen periodos vegetativos cortos (S. Yoshida, 1981). El arroz se siembra directamente en suelo seco, húmedo, o en camas húmedas para ser luego trasplantado 20 a 70 días después (Vergara, 1991). Los cambios más visibles de la fase vegetativa son la producción de macollos y hojas. En el trópico, el número máximo de macollos se logra entre los 40 y 60 días después del trasplante, dependiendo del cultivar, espaciamiento y fertilidad (Vergara, 1991).

2.4.2 Fase reproductiva

La floración del arroz involucra varios procesos: la iniciación de la inflorescencia o panícula, el desarrollo de las estructuras florales, la emergencia de la panícula y la apertura floral (anthesis) (H. Yoshida & Nagato, 2011). La fase reproductiva empieza con la iniciación de la panícula o también conocido como el punto de algodón (Caldas & Lizárraga, 2020), se caracteriza por cambios en las características vegetativas de crecimiento y la diferenciación de la panícula (Smith & Dilday, 2002). Esta fase puede iniciar antes, al mismo tiempo, o después de que se haya alcanzado el número máximo de macollos (Vergara, 1991). La duración de la fase reproductiva más el periodo de maduración puede ser considerada similar para cualquier variedad bajo las mismas condiciones (S. Yoshida, 1981).

La iniciación de la panícula se considera a partir de la primera diferenciación microscópica del primordio, y esto ocurre alrededor de 30 días antes de la emergencia en la mayoría de cultivares de maduración intermedia (Smith & Dilday, 2002). La hoja bandera emerge alrededor de 18 días antes de la emergencia, y desde ese momento la panícula crece rápidamente y se mueve hacia arriba dentro de la vaina de la hoja bandera. Alrededor de seis días antes de la emergencia, la vaina de la hoja bandera se ensancha, indicando la presencia de la panícula (S. Yoshida, 1981). La emergencia de la panícula suele completarse dentro de 24 horas, y la anthesis ocurre un día después de la emergencia de la panícula, iniciando normalmente desde la parte superior (Vergara, 1991). El arroz normalmente se auto poliniza (Vergara, 1991), teniendo un mínimo porcentaje de polinización cruzada debido a que el polen solo es viable por diez minutos desde la dehiscencia (Smith & Dilday, 2002).

2.4.3 Fase de maduración

La fase de maduración toma entre 25 y 50 días (Smith & Dilday, 2002), aunque normalmente toma entre 25 y 35 días en el trópico (Vergara, 1991). Esta fase se caracteriza por el

crecimiento y cambio de color y consistencia de los granos. En fases tempranas los granos son verdes, y se vuelven amarillos conforme maduran (S. Yoshida, 1981). La consistencia de la carióspside del grano es aguada al principio, posteriormente se torna lechosa, luego en masosa suave y por último en masosa dura. Se considera que el cultivo está maduro cuando más del 90% de granos de las panículas son duros y sin coloración verde (Vergara, 1991). En las fases iniciales del llenado de grano, el contenido de agua de los granos es alrededor de 58%, y baja a 20% o menos a la maduración. El rendimiento del grano es normalmente reportado a 14% de humedad (S. Yoshida, 1981). La maduración está externamente acompañada de la senescencia de las hojas (Smith & Dilday, 2002; S. Yoshida, 1981), aunque en algunos cultivares las hojas superiores pueden mantenerse verdes incluso cuando los granos ya han madurado (Vergara, 1991).

2.5 Cultivares

2.5.1 La Capoteña

La Capoteña fue desarrollada en Perú por el Programa Nacional de Arroz de la Estación Experimental Agraria Vista Florida - Lambayeque con el objetivo de tener un cultivar de alto potencial de rendimiento, tolerante a plagas y enfermedades, de buena molinería y buena calidad de grano (Instituto Nacional de Innovación Agraria, 2021). En cuanto a sus características agronómicas, posee un ciclo de 152 días desde la siembra hasta la maduración, con un potencial de rendimiento de 14 000 Kg ha⁻¹ en parcelas experimentales (Montero, 2019). Tiene en promedio un peso de mil granos de 28.6 g (Instituto Nacional de Innovación Agraria, 2021).

2.5.2 IR-71706

IR-71706 fue desarrollada por el Instituto Internacional de Investigación del Arroz (IRRI) en Filipinas y es un cultivar con tolerancia a sequía, con un rendimiento promedio de 8 627 Kg ha⁻¹ (Heros, Gómez, & Sosa, 2017). En condiciones de La Molina tiene un ciclo de vida de 165 días. El inicio del primordio floral se presenta a los 90 días, mientras que la floración se presenta entre los 125 y 135 días (E. Heros, comunicación personal, 23 de enero de 2023).

2.6 Métodos de riego

2.6.1 Inundación continua

La inundación del campo es el método convencional más utilizado para el cultivo de arroz. En el Perú el riego por inundación continua se realiza en con el trasplante como en sistema

de siembra en los valles de la costa y selva alta (Heros, Gómez, Soplín, et al., 2017). Si bien el agua estancada no es necesaria para el crecimiento, es la única forma eficiente de evitar el crecimiento de malezas en el campo (Jena et al., 2023). El arroz es una especie semi-acuática que ha desarrollado tolerancia a las condiciones de anoxia provocadas por la inundación (Panda & Barik, 2021), por lo que es capaz de sobrevivir donde otras plantas no lo hacen. Sin embargo, el sistema convencional de riego no sólo consume más agua, si no también causa un desperdicio de ésta resultando en la degradación del suelo (Avil Kumar & Rajitha, 2019). Los campos de arroz inundados también se consideran una fuente principal de emisión de metano a la atmósfera (Heros, Gómez, Soplín, et al., 2017; Khalil et al., 2002), y debido a su aumento en extensión con el paso de los años se les atribuye ser un factor potencialmente importante en el cambio climático global (Khalil et al., 2002).

Si bien la inundación continua por si sola tiene un alto consumo de agua, si se combina con el sistema de trasplante, se demanda una gran cantidad de mano de obra y posee un consumo aún mayor de agua, lo que es perjudicial para la sustentabilidad del cultivo (Heros, Gómez, Soplín, et al., 2017). En la siembra directa se mantienen condiciones continuas de humedad en el suelo desde el inicio, mientras que para el trasplante se requiere tanto agua para los almácigos las camas del arroz como para inundar el campo definitivo, aumentando el consumo de agua (Eskandari & Attar, 2015). Perú es el único país de la región que cultiva el arroz con sistema de trasplante (Heros, Gómez, Soplín, et al., 2017), mientras que el cambio a un sistema de siembra directa ayudaría a aumentar la sustentabilidad en la producción del arroz (Eskandari & Attar, 2015).

2.6.2 Alternar humedecimiento y secado - AWD

Uno de los métodos de ahorro de agua desarrollados por el IRRI es la irrigación de humedecimiento y secado alternado, o AWD por sus siglas en inglés (*Alternate Wetting and Drying*) (Avil Kumar & Rajitha, 2019). AWD es una técnica de irrigación donde el agua se vuelve a aplicar algunos días después de la desaparición de la lámina de agua, al contrario de la irrigación convencional donde la inundación continua no deja que desaparezca por completo la lámina (Rejesus et al., 2011).

AWD consiste de tres elementos claves: el primero es tener una inundación poco profunda por una a dos semanas después del trasplante para suprimir las malezas, el segundo es mantener inundado el campo desde la emergencia de la panícula hasta el final de la floración por ser una fase muy sensible al estrés hídrico, y finalmente el tercero es aplicar un riego

hasta inundación cada vez que el nivel freático esté 15cm por debajo de la superficie del suelo (Avil Kumar & Rajitha, 2019).

La aplicación de AWD es capaz de reducir la entrada de agua hasta un 38% sin reducción del rendimiento cuando se implementa correctamente, y ya ha comenzado a implementarse a gran escala en países como Filipinas, Vietnam y Bangladesh (Lampayan et al., 2015; Rejesus et al., 2011).

2.6.3 Suelo saturado

El sistema de irrigación con suelo saturado en campo consiste en mantener el arroz en camas elevadas con agua continua en los surcos que la rodean (Borrell et al., 1997). El impacto del suelo saturado con respecto al sistema tradicional de inundación es variable dependiendo de las condiciones. En Filipinas se indica que mantener el suelo continuamente en condiciones alrededor de la saturación reduce el rendimiento en aproximadamente 5% y la entrada de agua en 35%, pero se aumenta la productividad de uso de agua en un 45% en comparación al riego por inundación (Tabbal et al., 2002). Por otro lado, en Australia se ha estudiado que el arroz en suelo saturado no presenta diferencias en el rendimiento ni calidad con respecto a la inundación y se tuvo un ahorro de agua del 32%, aunque hubo un aumento en el crecimiento de malezas (Borrell et al., 1997).

A pesar de qué lo más efectivo para el ahorro de agua sería contar con un método de irrigación sin inundación ni saturación utilizado en otros cultivos como el trigo o maíz, se suele tener un impacto negativo en el rendimiento (Tuong et al., 2005). Existen variedades tradicionales que crecen en este tipo de "suelo aeróbico", pero tienen bajo rendimiento. Las variedades de alto rendimiento en condiciones aeróbicas se ven severamente penalizadas en su rendimiento (Tuong et al., 2005).

2.6.4 Consumo de agua

El arroz bajo condiciones de inundación recibe dos a tres veces más que otros cultivos como el trigo y el maíz, principalmente por el flujo de agua improductiva que se termina perdiendo por infiltración y percolación (Lampayan et al., 2015). El concepto de huella hídrica indica el volumen de agua que se consume durante el ciclo productivo de un cultivo y puede ayudar a entender cómo aumentar la producción con menor consumo de agua (Li et al., 2020). La huella hídrica del arroz en el Perú es de 6496.04 L/Kg, y expresa cuántos litros de agua se necesita para producir un kilogramo de arroz (Fonseca et al., 2012).

Un estudio en China indica que zonas con baja humedad relativa o bajas precipitaciones se encuentran más inclinadas a tener una mayor huella hídrica por unidad de arroz cáscara (Li et al., 2020). En el Perú, la producción se ubica en la costa y en la selva, siendo San Martín, Piura y Lambayeque los departamentos con mayor extensión de área sembrada (Schneir, 2015). El noreste de China se ha convertido en la zona de mayor producción de arroz del país a pesar de sus bajas precipitaciones y su alta huella hídrica (Li et al., 2020), ocurriendo algo similar al caso peruano, donde los departamentos con mayor consumo de agua de arroz son Lambayeque y Piura (Fonseca et al., 2012; Schneir, 2015) ubicados en la costa peruana con un clima extremadamente árido y escasas precipitaciones (Ferreira, 1993).

2.7 Estrés hídrico en arroz

2.7.1 Intensidad del estrés

La sensibilidad a la sequía (*Drought Sensitivity* - DRS) se determina mediante dos escalas en la fase vegetativa: el enrollamiento de hojas (Tabla 1) y el secado de hojas (Tabla 2). El enrollamiento de hojas precede al secado de hojas durante la sequía. Se debe registrar el estadio de crecimiento de la planta cuando el estrés ocurre y el número de días de estrés (International Rice Research Institute, 2013).

La recuperación de la sequía (*Drought Recovery* - DRR) (Tabla 3) se evalúa diez días después de la lluvia o riego. Se debe indicar el grado del estrés antes de la recuperación (International Rice Research Institute, 2013).

Tabla 1: Escala del enrollamiento de hojas de DRS en la fase vegetativa (International Rice Research Institute, 2013)

Escala	Enrollamiento de hojas
0	Hojas saludables
1	Hojas se empiezan a doblar
3	Hojas dobladas (forma de V)
5	Hojas completamente acopadas (forma de U)
7	Márgenes de las hojas se tocan (forma de 0)
9	Hojas fuertemente enrolladas

Tabla 2: Escala del secado de hojas de DRS en la fase vegetativa (International Rice Research Institute, 2013)

Escala	Secado de hojas
0	Sin síntomas
1	Punta ligeramente seca
3	Secado extendido desde la punta hasta 1/4 de longitud en la mayoría de hojas
5	Secado extendido desde 1/4 hasta 1/2 de longitud en la mayoría de hojas
7	Secado extendido más de 2/3 de longitud en la mayoría de hojas
9	Todas las plantas aparentemente muertas

Tabla 3: Escala de la recuperación de plantas después de la sequía (DRR) (International Rice Research Institute, 2013)

Escala	Plantas recuperadas
1	90 - 100%
3	70 - 89%
5	40 - 69%
7	20 - 39%
9	0 - 19%

2.7.2 Efecto en el rendimiento

El estrés hídrico en el arroz tiene distintos efectos dependiendo de si afecta a la fase vegetativa, reproductiva o de maduración. En un estudio realizado en Irán con cultivares locales y mejorados donde se aplicó por separado estrés hídrico en cada una de las tres fases, el estrés en la fase vegetativa redujo la altura de planta, mientras que el estrés en la fase reproductiva tuvo una mayor reducción del rendimiento que el estrés en las otras fases (Sarvestani et al., 2008). En todos los casos el estrés hídrico ocasionó una disminución en el rendimiento promedio, siendo de 21%, 50% y 21% con respecto al control en las fases vegetativa, reproductiva y de maduración respectivamente (Sarvestani et al., 2008). Por otro lado, un trabajo realizado en Bangladesh donde se tuvo diferentes tratamientos de agua constante en suelo arcilloso limoso, no se obtuvo cosecha en ninguno de los tratamientos por

debajo de saturación, además que todos los parámetros morfológicos como la altura de planta, número de macollos y peso seco fueron más bajos (Hossain et al., 2020).

Sin embargo, el estrés hídrico no es completamente perjudicial, pues se indica que un estrés leve durante la fase de maduración puede ser beneficioso para obtener arroz de alta calidad culinaria bajo altos niveles de nitrógeno (Cai et al., 2006).

III. METODOLOGÍA

3.1 Localización y duración del estudio

El estudio tuvo lugar en el Programa de Cereales y Granos Nativos de la Universidad Nacional Agraria La Molina, ubicado en el distrito de La Molina, en la región de Lima, Perú. El sitio de estudio tiene una altitud de 247 m.s.n.m. y de coordenadas 12° 4' 41" S, 76° 56' 36" W. La experimentación tuvo inicio en el mes de enero del 2023 con el trasplante del arroz en las macetas a los 50 días después de la siembra (el arroz previamente fue sembrado en camas) y finalizó en el mes de mayo del 2023 con la evaluación del rendimiento después de la cosecha.

3.2 Diseño experimental

La investigación fue realizada en un diseño factorial en bloques completos al azar en parcelas divididas. Se tuvieron dos factores: el factor en parcelas riego (tres niveles: saturado, estrés leve y estrés moderado) y el factor cultivar en sub-parcelas (dos niveles: La Capoteña e IR-71706). Con todas las combinaciones posibles de los factores se tienen seis tratamientos, los cuales tuvieron cuatro repeticiones dando un total de 24 unidades experimentales (Figura 1).

- T1: Cultivar La Capoteña + Riego saturado (0)
- T2: Cultivar La Capoteña + Riego con periodos de estrés leve (3)
- T3: Cultivar La Capoteña + Riego con periodos de estrés moderado (5)
- T4: Cultivar IR-71706 + Riego saturado (0)
- T5: Cultivar IR-71706 + Riego con periodos de estrés leve (3)
- T6: Cultivar IR-71706 + Riego con periodos de estrés moderado (5)

Bloque 1						Bloque 3					
101-1	101-2	102-1	102-2	103-1	103-2	107-1	107-2	108-1	108-2	109-1	109-2
La Capoteña	IR71706	IR71706	La Capoteña	IR71706	La Capoteña	IR71706	La Capoteña	IR71706	La Capoteña	La Capoteña	IR71706
Estrés leve	Estrés leve	Saturado	Saturado	Estrés mod	Estrés mod	Estrés leve	Estrés leve	Estrés mod	Estrés mod	Saturado	Saturado

Bloque 2						Bloque 4					
104-1	104-2	105-1	105-2	106-1	106-2	110-1	110-2	111-1	111-2	112-1	112-2
La Capoteña	IR71706	La Capoteña	IR71706	IR71706	La Capoteña	IR71706	La Capoteña	La Capoteña	IR71706	IR71706	La Capoteña
Estrés mod	Estrés mod	Estrés leve	Estrés leve	Saturado	Saturado	Estrés leve	Estrés leve	Saturado	Saturado	Estrés mod	Estrés mod

Figura 1: Croquis del diseño experimental. Se utilizó la herramienta Tarpuy del paquete de R “inti” (Lozano-Isla, 2023) para la aleatorización del experimento.

En base al diseño experimental se define el modelo. Los índices i y j dependen de los niveles de los factores en parcelas y sub-parcelas respectivamente, el índice k depende del número de bloques, y el índice l llega hasta 1 (Oehlert, 2000). Por lo tanto, los niveles de los factores afectan los índices i y j de la siguiente manera: $i = 1$ (saturado), 2 (estrés leve) y 3 (estrés moderado); $j = 1$ (La Capoteña) y 2 (IR-71706).

El modelo del diseño experimental queda como se muestra a continuación.

$$Y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \gamma_k + \eta_{l(ik)} + \beta_j + \alpha\beta_{ij} + \varepsilon_{l(ijk)}$$

Donde: μ es la media general, α_i es el efecto del factor en parcelas riego i , γ_k es el efecto del bloque k , $\eta_{l(ik)}$ es el error experimental de la repetición l con el riego i y el bloque k , β_j es el efecto del factor en sub-parcelas cultivar j , $\alpha\beta_{ij}$ es el efecto de la interacción entre el riego i y la cultivar j , y $\varepsilon_{l(ijk)}$ es el error experimental de la repetición l con el riego i , la cultivar j y el bloque k . Los valores para i son 1, 2 y 3; para j son 1 y 2, para k son 1, 2, 3 y 4; y para l es 1.

3.3 Caracterización de los tratamientos

Para definir el estrés leve y moderado se utilizó el sistema de evaluación estandarizada del arroz (SES) del IRRI para enrollamiento de hojas (Tabla 1). El estrés leve se realizó en un nivel de DRS de enrollamiento de hojas de 3, con hojas en forma de V. El estrés moderado se realizó en un nivel de DRS de enrollamiento de hojas de 5, con hojas en forma de U (Figura 2). Por este motivo, los tratamientos de estrés leve también serán denotados más adelante con el nombre de estrés leve (3), mientras que los tratamientos de estrés moderado con el nombre de estrés moderado (5). Para estandarizar esta denominación, el tratamiento saturado será denotado con el nombre de saturado (0).

En cada unidad experimental (maceta) se tuvieron dos plantas de arroz del cultivar correspondiente, ubicadas en extremos opuestos. Los tratamientos con el factor riego en estrés leve (3) y moderado (5) no estuvieron todo su ciclo de vida bajo condiciones de estrés hídrico, si no que se tuvieron dos periodos de sequía definidos: uno en la fase vegetativa y uno en la fase reproductiva, mientras que el resto de la campaña estuvieron bajo riego saturado. El estrés en la fase vegetativa se dio entre los 66 y 72 días después de la siembra, iniciando a los dieciséis días después del trasplante. El estrés en la fase reproductiva se dio entre los 121 y 127 días después de la siembra. Los tratamientos con el factor riego saturado estuvieron regados al punto de saturación durante todo el ciclo del cultivo.

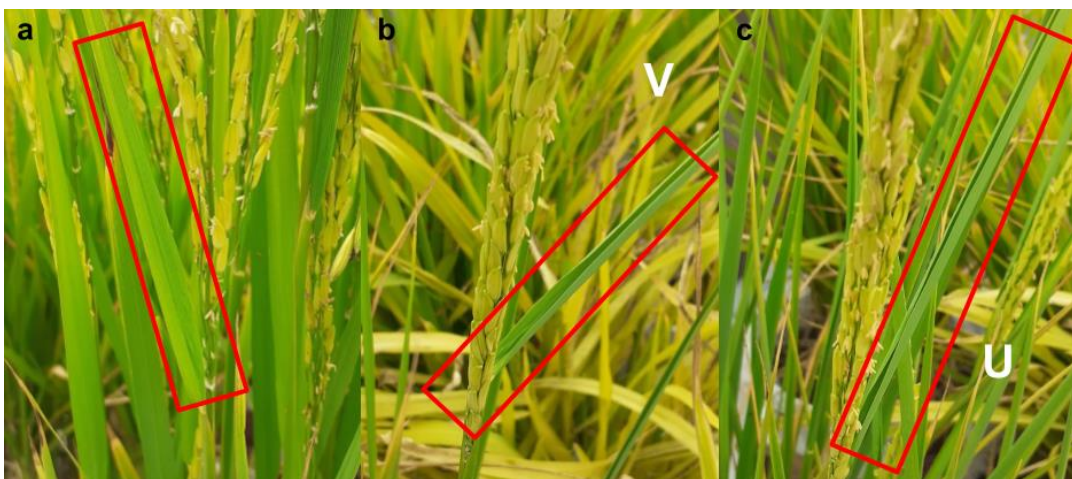


Figura 2: Hojas de arroz con diferentes niveles de estrés hídrico según la escala del enrollamiento de hojas de DRS. (a) Hoja saludable, nivel 0. (b). Hoja con forma de V, nivel 3. (c) Hoja con forma de U, nivel 5.

3.4 Materiales y equipos

Los materiales (Tabla 4) y equipos (Tabla 5) que se listan a continuación son los utilizados tanto para la preparación del experimento como para el desarrollo del trabajo.

Tabla 4: Materiales requeridos para la experimentación

Cantidad	Unidad	Material
2	Fardo de 250 L	Sustrato profesional: Remix 1; código 17722
30	Unidad	Maceta de 10 L
60	Unidad	Bolsas plásticas blancas de 12 L
144	Unidad	Etiquetas plastificadas
1	Unidad	Rollo de cinta adhesiva transparente
1	Unidad	Plumón indeleble negro
1	Unidad	Cuchilla “cutter”
240	Unidad	Bolsas de papel kraft #12
1	Unidad	Balde de plástico de 4 L
1	Unidad	Jarra de plástico de 1 L
1	Unidad	Cinta métrica de 3 metros
1	Saco de 50 Kg	Urea (fertilizante)
1	Caja de 1 Kg	Fertilizante foliar “Grow More”
1	Bolsa de 250 g	Basacote® Plus 6M (fertilizante)

Tabla 5: Equipos requeridos para la experimentación

Cantidad	Equipo	Medición / Uso
1	Balanza digital	Peso (gramos)
1	Balanza analítica	Peso (gramos, 4 decimales)
1	Estufa	Para secado de muestras
1	FieldScout TDR 350	Porcentaje de humedad volumétrica
1	SPAD-502	Contenido de clorofila (valor SPAD)

3.5 Preparación del experimento

En las macetas se utilizó el sustrato profesional: Remix 1; código 17722 de la marca REKYVA, conformado por una mezcla de turba marrón y turba rubia. Previo a la experimentación, se realizaron pruebas de campo para determinar la densidad aparente y los puntos de capacidad de campo y saturación del sustrato. Utilizando un cilindro de volumen

conocido y secando el sustrato en la estufa a 105 °C hasta llegar a peso constante se determinó que posee una densidad aparente de 0.15 g/cc.

Si bien el método de estufa es el método más preciso para determinar el contenido de humedad del sustrato, no es posible estar obteniendo muestras de las macetas cada vez que se requiera en el experimento. Por este motivo, también se halló una correlación entre el contenido de humedad por secado a estufa y las mediciones realizadas con el equipo FieldScout TDR 350, que mide la humedad volumétrica de forma instantánea (Figura 3).

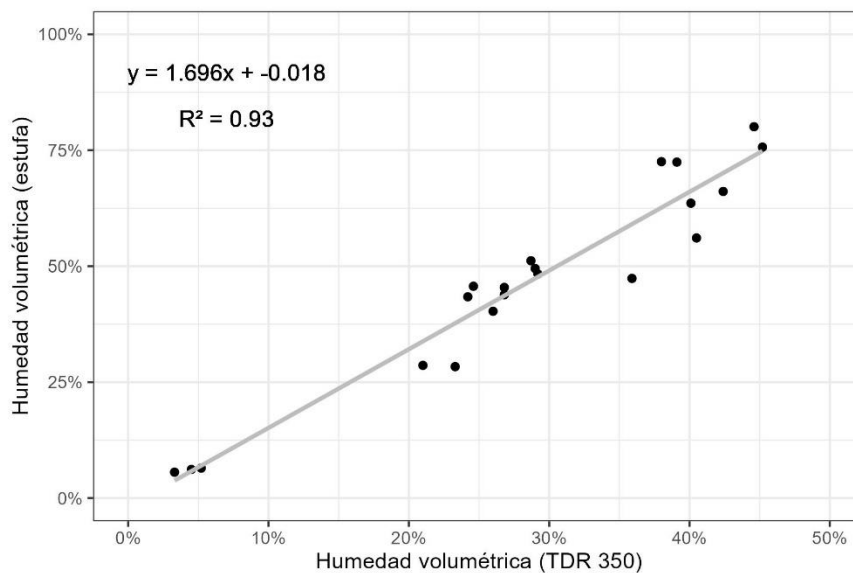


Figura 3: Relación entre la humedad volumétrica registrada por el TDR 350 y la humedad volumétrica hallada por secado a estufa.

Para la determinación de la capacidad de campo del sustrato, se hizo una prueba en macetas iguales a las que se utilizarán en el experimento. Se colocó 2000 g de sustrato y se saturó completamente con agua de pozo. Se dejó escurrir en la sombra hasta que ya no hubiera salida de agua por debajo de la maceta y se obtuvieron los pesos. Se determinó que el sustrato es capaz de absorber unos 2000 g de agua adicionales a los que ya posee, siendo su capacidad de campo cuando pesa alrededor de 4000 g. Colocando una bolsa plástica entre la maceta y el sustrato para evitar la infiltración, se determinó que 2000 g de sustrato llegan a punto de saturación con 3000 g de agua, cuando todo pesa en total 5000 g. Si se pasa de este punto, se comienza a formar un encharcamiento que no es adecuado para el experimento, debido a que por el peso ligero del sustrato comienza a flotar. El arroz normalmente se siembra con

una lámina de agua en inundación, pero en este sustrato si se pasa el punto de saturación se pierde la consistencia.

Para el establecimiento del experimento, las macetas se cubrieron con dos bolsas plásticas blancas antes de colocar el sustrato con el objetivo de que durante los riegos no se pierda agua por infiltración, sólo por evapotranspiración. Las macetas con las dos bolsas tienen un peso conocido de 165 g, y sobre esto se añadió 2000 g de sustrato. Posteriormente, todas las macetas fueron llevadas a saturación con 3000 g de agua, teniendo un peso total de 5165 g al inicio del experimento. En estas macetas ya preparadas se realizó el trasplante de las plántulas de arroz, que han crecido durante 50 días en camas con suelo franco arenoso regadas hasta capacidad de campo una vez por semana.

3.6 Manejo del experimento

Para mantener el suelo saturado, el riego se realizó de forma interdiaria. En cada riego, se tomó una muestra aleatoria de diez macetas para hallar su peso en gramos, y se calculó el promedio. Posteriormente, se aplicó la misma cantidad de agua a todas las macetas para completar su peso a 5165 gramos. Debido al crecimiento del arroz, las plantas también presentan un peso que no puede ser despreciado. Seis macetas adicionales, tres de cada cultivar, bajo condiciones de saturación constante fueron mantenidas en paralelo, y se obtuvieron muestras del peso fresco en la fase vegetativa, en el punto de algodón y en la floración al 50% para conocer el peso de la planta de arroz a lo largo de su crecimiento y poder agregarlo al peso de saturación de toda la maceta.

El estrés hídrico de los tratamientos de estrés leve y moderado se llevó a cabo en dos momentos: en la fase vegetativa y en la fase reproductiva. Iniciando a los 65 días después de la siembra, en pleno crecimiento vegetativo, se aplicó el estrés correspondiente por siete días. De igual manera, iniciando a los 120 días después de la siembra, en medio de la fase reproductiva, se volvió a aplicar el estrés correspondiente por siete días. En total, las plantas de los tratamientos de estrés leve y moderado tuvieron catorce días de estrés hídrico en toda la campaña, mientras que el resto de días del crecimiento estuvieron bajo riego saturado como los tratamientos restantes.

La fertilización se llevó a cabo en cuatro oportunidades, en base a los requerimientos de nitrógeno del cultivo: 40 Kg/ha de N 12 días después del trasplante (62 DDS) con fertilizante de lenta liberación Basacote® Plus 6M, 80 Kg/ha de N 28 días después del trasplante (78

DDS) con urea, 80 Kg/ha de N 42 días después del trasplante (92 DDS) con urea, y finalmente 80 Kg/ha en el punto de algodón con urea. El punto de algodón de IR-71706 fue alcanzado a los 101 DDS, mientras que en La Capoteña se alcanzó una semana después a los 108 DDS. Adicionalmente, se aplicó el fertilizante foliar “Grow More” en una proporción de 8 g en un litro de agua al follaje de forma semanal a partir del mes después del trasplante hasta la emergencia de la panícula.

A los 114 días después de la siembra ocurrió una fuerte lluvia debido a la influencia del ciclón Yaku, por lo que se tuvo que realizar un cálculo del riego considerando esta entrada de agua. A partir de este momento, se instaló el mismo día un toldo de plástico para evitar el ingreso de agua de lluvia a las macetas, el cual fue retirado a los 120 DDS. Debido al ingreso de agua a los 114 DDS y las constantes lluvias posteriores, se tuvo que mover el periodo de estrés al periodo final de la fase reproductiva, iniciando a los 121 DDS debido a que el secado del suelo fue mucho más lento por el clima húmedo.

A los 138 DDS se instaló una malla delgada por encima de las macetas, debido a que en la fase de maduración los granos estaban expuestos al ataque de las aves. El toldo de malla permitía el paso de la luz y aire, por lo que las condiciones del ambiente no fueron alteradas. La malla permaneció instalada hasta el final de la cosecha, la cual se dió entre los 168 y 170 DDS.

3.7 Manejo de los periodos de estrés hídrico

Para poder realizar el manejo de los periodos de estrés hídrico, fue necesario tener un método que permita ajustar rápidamente la humedad volumétrica del sustrato. Por este motivo, se halló una relación entre el peso de la maceta y la humedad volumétrica registrada por el equipo TDR 350 para la fase vegetativa (Figura 4) y para la fase reproductiva (Figura 5) durante los periodos de estrés hídrico.

Utilizando la ecuación previamente hallada para relacionar la humedad volumétrica registrada por el TDR 350 y la humedad volumétrica a estufa (Figura 3), se pudo convertir y comparar el peso de la maceta con la humedad volumétrica a estufa calculada. A través de estas comparaciones, se pudo hallar una relación entre el enrollamiento de hojas observado, el peso de la maceta y la humedad que corresponde a estufa. Para el periodo de estrés hídrico en la fase vegetativa, se determinó que un nivel de enrollamiento de hojas de 3 se alcanzaba entre 12% y 16% de humedad volumétrica a estufa, mientras que entre 8% y 12% se tiene

un nivel de enrollamiento de hojas de 5 (Tabla 6). Por este motivo, los días que duró el estrés hídrico en la fase vegetativa se completó el peso de la maceta hasta alcanzar los 1885 gramos para los tratamientos de estrés leve (3) y los 1693 gramos para los de estrés moderado (5) (Tabla 6). Para el periodo de estrés hídrico en la fase reproductiva, los niveles de enrollamiento se alcanzaban a la misma humedad volumétrica a estufa, sin embargo, el peso al que se debía llevar la maceta era diferente (Tabla 7). En este caso, se completó el peso de la maceta hasta alcanzar los 1981 gramos para los tratamientos de estrés leve (3) y los 1778 gramos para los de estrés moderado (5) (Tabla 7).

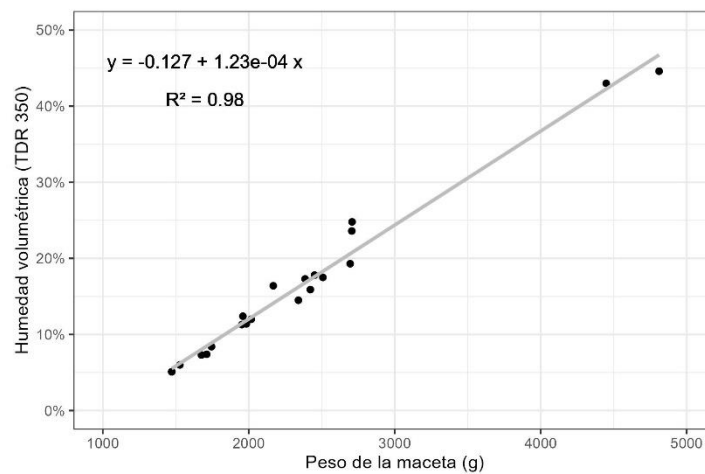


Figura 4: Relación entre el peso de la maceta y la humedad volumétrica registrada por el TDR 350, evaluado durante el periodo de estrés hídrico en la fase vegetativa.

Tabla 6: Relación entre el peso de la maceta, la humedad volumétrica registrada por el TDR 350 y su conversión a humedad volumétrica a estufa; evaluado durante el periodo de estrés hídrico en la fase vegetativa

Enrollamiento	Peso de la maceta	%Hv TDR 350	%Hv a estufa
5	1502	5.80%	8.00%
5	1550	6.40%	9.00%
5	1598	7.00%	10.00%
5	1646	7.50%	11.00%
3	1693	8.10%	12.00%
3	1741	8.70%	13.00%
3	1789	9.30%	14.00%
3	1837	9.90%	15.00%
3	1885	10.50%	16.00%

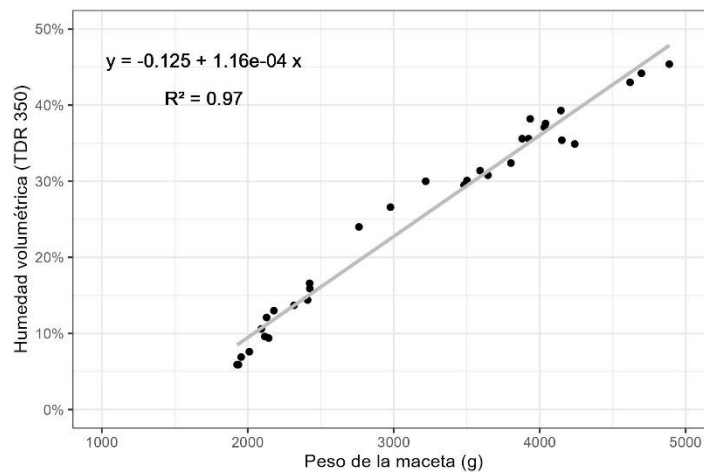


Figura 5: Relación entre el peso de la maceta y la humedad volumétrica registrada por el TDR 350, evaluado durante el periodo de estrés hídrico en la fase reproductiva.

Tabla 7: Relación entre el peso de la maceta, la humedad volumétrica registrada por el TDR 350 y su conversión a humedad volumétrica a estufa; evaluado durante el periodo de estrés hídrico en la fase reproductiva.

Enrollamiento	Peso de la maceta	%Hv TDR 350	%Hv a estufa
5	1576	5.80%	8.00%
5	1626	6.40%	9.00%
5	1677	7.00%	10.00%
5	1728	7.50%	11.00%
5	1778	8.10%	12.00%
3	1829	8.70%	13.00%
3	1880	9.30%	14.00%
3	1931	9.90%	15.00%
3	1981	10.50%	16.00%

3.8 Características de evaluación

3.8.1 Rendimiento en grano

El rendimiento del arroz se expresa de forma comercial en Kg de arroz cáscara por hectárea. Sin embargo, al tratarse de un experimento bajo condiciones controladas a menor escala, el rendimiento será expresado en gramos por m². Esta variable fue calculada en base a los tres componentes del rendimiento que se detallan a continuación: el número de panículas por m², el número de granos por panícula y el peso de mil granos.

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Peso de mil granos (g)}}{1000} * \text{Granos por panícula} \\ * \text{panículas por m}^2$$

3.8.2 Número de panículas por metro cuadrado

El número de panículas por metro cuadrado es uno de los componentes del rendimiento del arroz. En la cosecha, se procedió al conteo del número de panículas en cada una de las macetas. Conociendo que todas las macetas tienen un área constante de 0.066 m², se realizó el cálculo para llevar todos los valores a un área de 1 m².

3.8.3 Número de granos por panícula

El número de granos fue evaluado por panícula en cada una de las macetas. En la cosecha, una vez obtenidas las panículas se procedió al conteo total de granos en cada una de las macetas, y posteriormente se dividió el número total de granos entre el número de panículas de la maceta para hallar el número de granos por panícula. Este parámetro también es uno de los componentes del rendimiento del arroz.

3.8.4 Peso de mil granos

El peso de mil granos es una característica estable debido a que el tamaño de los granos se encuentra controlado por las dimensiones de las glumillas la cáscara, y no puede crecer más sin importar lo favorable que sean las condiciones climáticas y de nutrición (S. Yoshida, 1981). Para esto, se contaron mil granos de arroz cáscara de cada tratamiento y se determinó el peso en gramos con una balanza. El peso de mil granos es uno de los componentes del rendimiento del arroz.

3.8.5 Porcentaje de macollos efectivos con panícula

Cada macollo puede potencialmente desarrollar una panícula (Smith & Dilday, 2002), por lo que esta variable permite determinar qué proporción de macollos desarrollaron panículas lograron dicha tarea en cada maceta. Se calculará con el número de macollos final tomado a los 154 DDS y el número de panículas por maceta contado en la cosecha. Se dividirá el número de panículas entre el número de macollos.

3.8.6 Índice de cosecha

Esta variable se definió en base a un muestreo realizado en la etapa de cosecha, donde se tomaron los valores de biomasa seca para el follaje (tallos, hojas y panículas) y granos. Para esto, el follaje trillado y los granos se llevaron a la estufa para su secado a 70 °C hasta alcanzar peso constante. El índice de cosecha (IC) se determinó según la fórmula:

$$IC = \frac{\text{Materia seca de los granos (g)}}{\text{Materia seca total (follaje + granos) (g)}}$$

3.8.7 Altura de planta

La evaluación de esta variable se realizó tanto en la fase vegetativa como reproductiva, siendo la primera medición a los 64 DDS (días después de la siembra) y posteriormente cada quince días hasta los 154 DDS, la cual se considerará como la altura de planta final. Se midió la distancia existente en centímetros entre la superficie del sustrato y la punta de la hoja más larga o la punta de la panícula más alta.

3.8.8 Número de macollos por maceta

La evaluación de esta variable se realizó tanto en la fase vegetativa como reproductiva, siendo la primera medición a los 64 DDS y posteriormente cada quince días hasta los 154 DDS, la cual se considerará como el número final de macollos. La medición consistió en contar el número de macollos presentes en cada una de las dos plantas de la maceta, y se halló la media por cada maceta. Se consideró como macollo a cada tallo que tuvo por lo menos una hoja de forma independiente.

3.8.9 SPAD (*Soil Plant Analysis Development*)

El valor SPAD es un dato numérico que se correlaciona directamente con el contenido de clorofila presente en la hoja (Konica Minolta, 2009). La evaluación de esta variable se realizó tanto en la fase vegetativa como reproductiva, siendo la primera medición a los 64 DDS y posteriormente cada quince días hasta los 154 DDS, la cual se considerará como el SPAD final. Para la medición se utilizó equipo SPAD-502, con el cual se tomaron diez mediciones

a lo largo del limbo de la tercera hoja más joven del macollo central y se halló la media. Esta medición se realizó en cada una de las dos plantas de la maceta, y se halló finalmente la media por cada maceta. Para ubicar el macollo central en estadios de desarrollo avanzado, se identificó el macollo con la hoja más larga.

3.8.10 Días a la floración

Esta medición se realizó una vez, correspondiente a la floración por tratamiento. Cuando el 50% de los macollos de la maceta correspondiente a cada tratamiento hayan emitido la panícula, se considerará como fecha de floración al 50%.

3.8.11 Cobertura

La medición de la cobertura se realizó en la fecha de floración al 50%, debido a que en dicho momento se considera que la planta ya ha terminado su desarrollo vegetativo. Se tomó una foto superior de cada maceta para determinar el área en centímetros cuadrados que ocupa el follaje. Esta área se halló de forma digital mediante el uso de máscaras en el programa ImageJ.

3.8.12 Fracción transpirable del suelo

La fracción transpirable del suelo (FTS) es la fracción restante del agua transpirable total que se encuentra en el suelo en cualquier momento definido (Sinclair & Ludlow, 1986). Se calculó la FTS a lo largo del desarrollo del cultivo, utilizando la siguiente fórmula:

$$FTS = \frac{\text{Peso diario de la maceta (g)} - \text{Peso final de la maceta (g)}}{\text{Peso inicial de la maceta (g)} - \text{Peso final de la maceta (g)}}$$

3.8.13 Evapotranspiración total

Para evaluar esta variable, se llevó un registro de los pesos de agua en Kg aplicados en cada riego mediante el uso de una balanza. Previo a la cosecha, se obtuvo el peso final de la maceta para determinar el contenido de agua aún presente en el sustrato y hacer el cálculo de la evapotranspiración total. Para corregir el peso ganado por el crecimiento de las plantas, en paralelo se llevó a cabo 6 macetas en las cuales se registrará el peso de la planta de arroz en la fase vegetativa, el estado de punto de algodón, y en floración al 50%.

3.8.14 Eficiencia de uso de agua total

Esta variable se determinará en base al peso en g de la biomasa seca total (follaje y granos) y la evapotranspiración total en m³ por cada tratamiento al final del experimento. La eficiencia de uso de agua total (EUAt) se determinó según la fórmula:

$$EUAt = \frac{\text{Peso de biomasa total (g)}}{\text{Evapotranspiración total (m}^3\text{)}}$$

3.8.15 Eficiencia de uso de agua de grano

Esta variable se determinará en base al peso en g de la biomasa seca del arroz cáscara y la evapotranspiración total en m³ por cada tratamiento al final del experimento. La eficiencia de uso de agua de grano (EUAg) se determinó según la fórmula:

$$EUAg = \frac{\text{Peso de biomasa de grano (g)}}{\text{Evapotranspiración total (m}^3\text{)}}$$

3.9 Análisis estadístico y colecta de datos

Los datos fueron colectados mediante la aplicación para Android “Field Book” desarrollada por Rife & Poland (2014), la cual es de libre acceso y especializada en la colecta de datos de campo. La información fue tabulada usando hojas de cálculo de Google Sheets.

Los datos fueron procesados y analizados en el software estadístico R (R Core Team, 2023). Cada variable evaluada fue sometida a un análisis de varianza (ANOVA) a un nivel de significancia del 5% para determinar si existen diferencias estadísticas entre los factores y su interacción. Para determinar las diferencias estadísticas entre tratamientos y en la interacción de factores, se realizó la prueba de comparación de medias de Tukey con un nivel de significancia del 5%. Además, los datos fueron sometidos a un análisis multivariado, donde se determinó la correlación de Pearson entre las variables evaluadas y se graficó el análisis de componentes principales (PCA). Los gráficos de barras fueron realizados con paquete “ggplot2” (Wickham, 2016), mientras que el gráfico de correlaciones se realizó con “psych” (Revelle, 2023) y los gráficos de de PCA con “FactoMineR” (Lê et al., 2008).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Objetivo 1: Evaluar la variación del rendimiento y sus componentes en los tratamientos de estrés hídrico leve y moderado en comparación al tratamiento saturado.

4.1.1 Rendimiento en grano

El tratamiento de La Capoteña en riego saturado (0) tuvo el mayor rendimiento, con un promedio de 901.9 g/m²; seguido de La Capoteña bajo estrés moderado (5), con un promedio de 745.3 g/m². Los tratamientos ya mencionados tuvieron en general mayor rendimiento que el tratamiento de IR-71706 en riego saturado (0), con un promedio de 705.0 g/m². Posteriormente, se tiene a los tratamientos de La Capoteña bajo estrés leve (3), IR-71706 bajo estrés leve (3) y finalmente IR-71706 bajo estrés moderado (5), con rendimientos promedio de 688.6, 506.2 y 487.3 g/m² respectivamente. A grandes rasgos, se puede observar que el cultivar La Capoteña tiene un mayor potencial de rendimiento en comparación a IR-71706. Sin embargo, el rendimiento no posee diferencias significativas entre los tratamientos ($p > 0.05$) (Figura 6a), a pesar de que se observa que para el mismo nivel de riego todos los tratamientos del cultivar La Capoteña tienen un mayor rendimiento en comparación a los tratamientos del cultivar IR-71706.

Los tratamientos bajo estrés hídrico poseen un menor rendimiento en comparación al tratamiento saturado para ambos cultivares, independiente de que la disminución del rendimiento no es significativa al evaluar la interacción de ambos factores. En general, estudios coinciden en que el estrés hídrico ocasiona pérdidas significativas en el rendimiento (Bhutta et al., 2019; Moonmoon & Islam, 2017; Venuprasad et al., 2008; Wang et al., 2010). Además, si bien la reducción en el rendimiento tiende a ser proporcional a la intensidad del estrés hídrico (Venuprasad et al., 2008), nuestros resultados no parecen seguir dicho patrón.

4.1.2 Análisis del rendimiento a través de los componentes de rendimiento e índice de cosecha

En el cultivo de arroz el grano es el producto comercial, por lo que principalmente el efecto del estrés hídrico debe ser estudiado en los componentes del rendimiento. Los componentes del rendimiento del arroz son el número de panículas por metro cuadrado, el número de granos por panoja y el peso de mil granos (S. Yoshida, 1981). En la figura 6, se puede observar el componente con mayor influencia en el rendimiento.

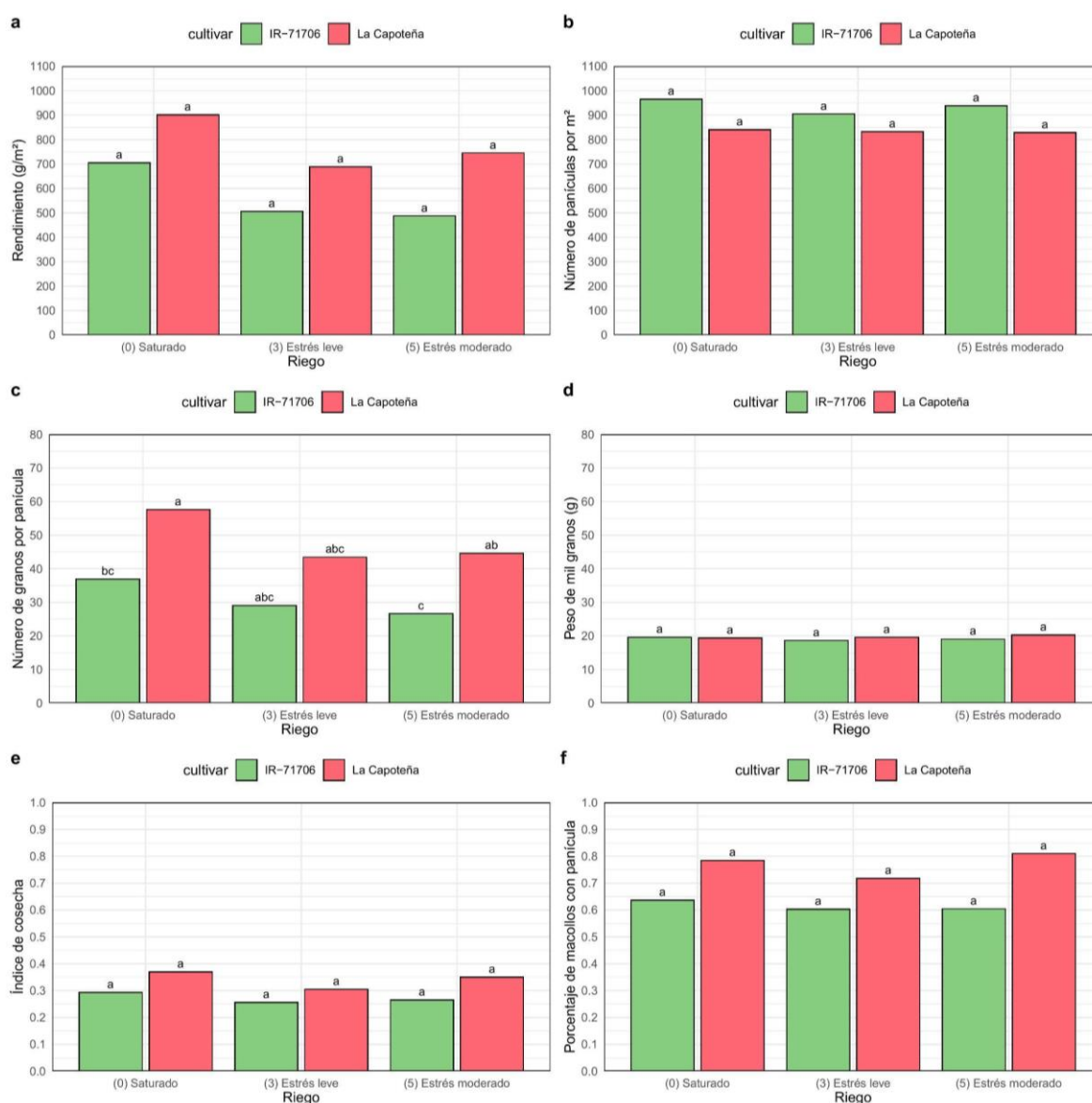


Figura 6: Respuesta en el rendimiento, sus componentes, y variables fisiológicas a la cosecha de dos cultivares de arroz sometidos a dos niveles de estrés hídrico. (a) Rendimiento de arroz cáscara por m². (b) Número de panículas por m². (c) Número de granos por panícula. (d) Peso de mil granos. (e) Índice de cosecha. (f) Porcentaje de macollos con panoja.

a) Número de panículas por m²

El cultivar IR-71706 produce ligeramente un mayor número de panículas bajo los tres niveles de riego en comparación al cultivar La Capoteña, pero sin diferencias significativas ($p > 0.05$). En general, el número de panículas por m² no se vio suficientemente afectado por el cultivar ni por el riego (Figura 6b).

b) Número de granos llenos por panícula

De los componentes del rendimiento, el número de granos por panícula es el único que presenta algunas diferencias significativas entre los tratamientos ($p < 0.05$), aunque no dentro de los mismos cultivares (Figura 6c). La Capoteña posee significativamente un mayor número de granos por panoja en comparación a IR-71706, a excepción del nivel de estrés leve (3). Dentro del cultivar La Capoteña, se observa que existe una disminución del número de granos por panoja en los tratamientos de estrés leve (3) y estrés moderado (5) en comparación del saturado, sin embargo, estadísticamente la diferencia no es significativa. Todos los tratamientos de este cultivar poseen en promedio más de 40 granos por panícula.

En cuanto al cultivar IR-71706, tampoco posee diferencias significativas entre los niveles de riego a pesar que existe una ligera disminución del número de granos en los tratamientos con estrés hídrico. Todos los tratamientos de este cultivar poseen en promedio menos de 40 granos por panoja. Por lo tanto, el mejor tratamiento de IR-71706 (nivel de riego saturado) tiene en promedio un menor número de granos por panoja que el tratamiento más bajo de La Capoteña (nivel de riego de estrés leve (3)). De los tres componentes del rendimiento, el número de granos por panoja es el que tuvo mayor correlación positiva con el rendimiento ($r = 0.97$). En general, el número de granos por panoja tiene correlación positiva con el índice de cosecha ($r = 0.95$), el porcentaje de macollos con panoja ($r = 0.88$), la eficiencia de uso de agua total ($r = 0.86$) y de grano ($r = 0.97$). Adicionalmente, esta variable expresa una correlación negativa con el número final de macollos ($r = -0.86$) (Figura 9).

En general, el número de granos por panícula y la fertilidad de espiguillas tienen gran efecto en el rendimiento cuando se somete a las plantas de arroz a estrés hídrico (Bhutta et al., 2019; Moonmoon & Islam, 2017). El número de granos por panoja posee una alta correlación positiva significativa con el rendimiento ($r = 0.97$, $p < 0.01$), que coincide con los resultados de investigaciones previas (Bhutta et al., 2019; Haider et al., 2012; Panja et al., 2017; Seyoum et al., 2012). Siendo más específicos, el número de granos llenos por panícula es más bajo cuando se aplica estrés en la formación de la panícula y en el llenado de granos,

debido a que el porcentaje de esterilidad de espiguillas fue más alto cuando el estrés ocurrió en la formación de la panícula (Ekanayake et al., 1989; Moonmoon & Islam, 2017; Wang et al., 2010). En las fórmulas de cálculo de rendimiento, normalmente el componente número de granos se determina con la multiplicación del número total de espiguillas por el porcentaje de fertilidad o espiguillas llenas (S. Yoshida, 1981), lo cual no ocurrió en el presente trabajo a pesar de haberse observado en campo un gran número de espiguillas vacías. Autores indican que la fertilidad de espiguillas también se encuentra altamente relacionada con el rendimiento (Bhor et al., 2020; Bhutta et al., 2019; Panja et al., 2017), por lo que la evaluación del porcentaje de fertilidad podría haber permitido encontrar algunas diferencias entre los tratamientos, especialmente al evaluar el impacto del estrés hídrico en la fase reproductiva.

c) Peso de mil granos

Similarmente, el peso de mil granos fue casi constante en todos los tratamientos, con valores cercanos a 20 gramos ($p > 0.05$) (Figura 6d). Resultados similares son reportados por Yang et al. (2001), donde el número de panículas por unidad de área y el peso de mil granos no presenta diferencias estadísticas causadas por el déficit de agua. Por otro lado, Moonmoon & Islam (2017) reportan que el número de panículas por unidad de área disminuye con el estrés hídrico, mientras que Bhutta et al. (2019) indica que el peso de mil granos sí puede disminuir hasta un 56% debido al estrés hídrico. Sin embargo, los componentes del rendimiento suelen tener diferentes respuestas frente al estrés hídrico dependiendo del cultivar (Wang et al., 2010). En cuanto a su peso como componente, algunos estudios indican que el peso de mil granos tiene una correlación positiva significativa con el rendimiento (Bhutta et al., 2019; Haider et al., 2012), mientras otros indican que existe una correlación negativa no significativa (Babu et al., 2012; Seyoum et al., 2012). La correlación encontrada en el presente trabajo es positiva, pero no significativa ($r = 0.59$, $p > 0.05$) (Figura 9).

4.2 Objetivo 2: Evaluar la variación de los parámetros fisiológicos y morfológicos durante el desarrollo del cultivo en los tratamientos de estrés hídrico leve y moderado en comparación al tratamiento saturado.

4.2.1 Índice de cosecha

Las líneas con ventajas frente al estrés hídrico se caracterizan por aumentar sus índices de cosecha en la falta de agua (Venuprasad et al., 2008), y en el caso de ambos cultivares de nuestro estudio, los índices se mantuvieron similares bajo estrés en comparación a los tratamientos sin estrés. El índice de cosecha es ligeramente mayor en los tratamientos del cultivar La Capoteña, con valores promedio entre 30 y 40%, en comparación al cultivar IR-71706 con valores entre 25 y 30% (Figura 6e). Sin embargo, no existen diferencias estadísticas ($p > 0.05$).

4.2.2 Porcentaje de macollos con panícula

Similarmente, en el porcentaje de macollos con panícula, el cultivar La Capoteña posee en todos sus tratamientos mayores valores en comparación al cultivar IR-71706 (Figura 6f). Mientras que los tratamientos de La Capoteña superan en promedio el 70% de macollos con panoja, los tratamientos de IR-71706 se encuentran en promedio por debajo de 65% de macollos con panoja. A pesar de esto, no existen diferencias significativas entre los tratamientos ($p > 0.05$). A pesar de las diferencias no significativas entre los tratamientos, pudimos encontrar algunas correlaciones con el rendimiento en la respuesta agronómica a la cosecha del arroz. El número de macollos productivos por planta tiene una asociación positiva con el rendimiento (Babu et al., 2012; Seyoum et al., 2012), y si bien en nuestros resultados el número de macollos por maceta tiene una correlación negativa no significativa con el rendimiento, se cumple que el porcentaje de macollos con panoja tiene una correlación positiva significativa ($r = 0.84$, $p < 0.05$).

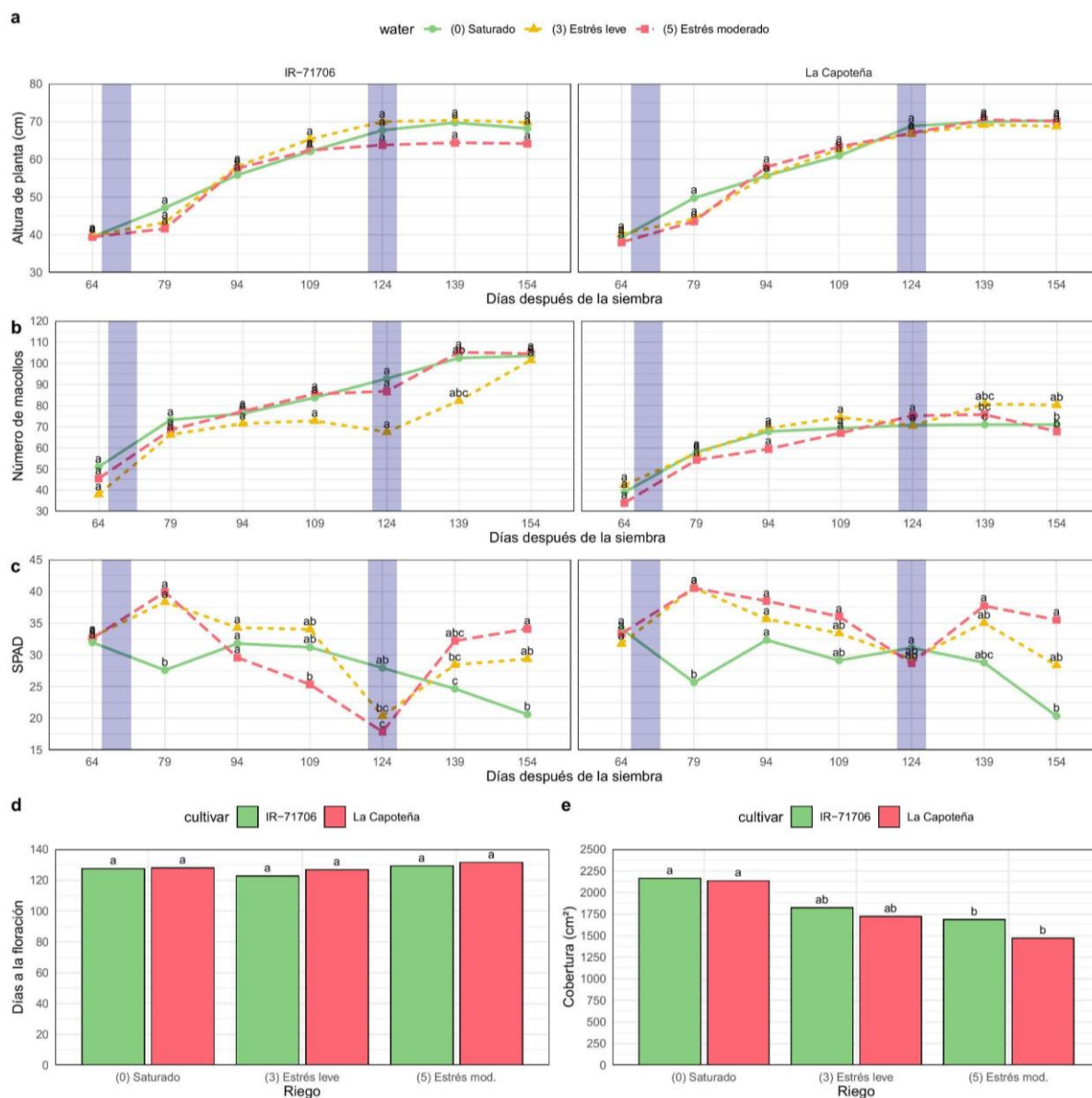


Figura 7: Respuesta fisiológica y morfológica de dos cultivares de arroz sometidos a dos niveles de estrés hídrico. Las evaluaciones progresivas poseen marcado en sombra los periodos de estrés hídrico en la fase vegetativa y reproductiva. (a) Evaluaciones progresivas de altura de planta. (b) Evaluaciones progresivas del número de macollos. (c) Evaluaciones progresivas de SPAD. (d) Días a la floración. (e) Cobertura.

4.2.3 Altura de planta

La altura de planta no tuvo diferencias significativas entre los tratamientos a lo largo del desarrollo del cultivo (Figura 7a). Posterior al estrés de la fase vegetativa se puede observar que la altura de planta fue menor en los tratamientos estresados en comparación al saturado. Además, en el tratamiento de estrés moderado (5) de IR-71706 la altura fue menor en comparación a los otros tratamientos del mismo cultivo. Sin embargo, como ya se mencionó, ninguna de estas variaciones fue estadísticamente significativa ($p > 0.05$) (Figura 7a).

4.2.4 Número de macollos por maceta

El número de macollos de IR-71706 es mayor que La Capoteña a lo largo del desarrollo del cultivo (Figura 7b). Sin embargo, las diferencias estadísticas sólo se muestran después del estrés en la fase reproductiva ($p < 0.05$). A los 139 DDS, todos los tratamientos de IR-71706 y el tratamiento de estrés leve (3) de La Capoteña poseen la misma agrupación con el mayor número de macollos, mientras que el tratamiento saturado de La Capoteña posee el menor número de macollos con la agrupación más baja. A pesar de esto, no existen diferencias significativas entre los tres niveles de riego de los tratamientos de La Capoteña. Tampoco existen diferencias significativas entre los tratamientos IR-71706 saturado, IR-71706 con estrés leve (3), La Capoteña con estrés leve (3) y La Capoteña con estrés moderado (5). Las diferencias son más notables en la fecha final de evaluación (154 DDS), donde los tratamientos de IR-71706 y el tratamiento de estrés leve (3) de La Capoteña poseen la misma agrupación con el mayor número de macollos. Esta vez sí existen diferencias significativas entre los cultivares, donde todos los tratamientos de IR-71706 poseen significativamente más macollos que los tratamientos saturado y estrés moderado (5) de La Capoteña ($p < 0.05$). Entre los tratamientos del mismo cultivar no existen diferencias (Figura 7b), y es contrario a lo señalado por Panja et al. (2017), que el estrés hídrico es uno de los factores ambientales que más afectan en el número de macollos de la planta. El número de macollos final tiene una correlación positiva con el número de panículas por m^2 ($r = 0.93$). Sin embargo, en general tiene una correlación negativa con otras variables, como el índice de cosecha ($r = -0.91$), el porcentaje de macollos con panoja ($r = -0.98$), la EUA total ($r = -0.89$), la EUA de grano ($r = -0.94$) y el número de granos por panoja ($r = -0.86$). Panja et al. (2017) también encontró que el número de macollos tiene correlación negativa con múltiples variables, entre ellas el número de granos por panoja y otras características vegetativas.

4.2.5 SPAD (*Soil Plant Analysis Development*)

En cuanto a la medición de SPAD, se observan diferencias significativas a lo largo del desarrollo (Figura 7c). A los 79 DDS, posterior al primer periodo de estrés hídrico, los tratamientos de riego saturado poseen un valor SPAD significativamente menor a los tratamientos de estrés hídrico ($p < 0.05$). Sin embargo, a los 94 DDS dejan de haber diferencias ($p > 0.05$). A los 109 DDS, el tratamiento de estrés moderado (5) de La Capoteña tiene un valor SPAD significativamente mayor al tratamiento de estrés moderado (5) de IR-71706 ($p < 0.05$). En esta misma fecha, los demás niveles de riegos no poseen diferencias entre cultivares. Posterior al periodo de estrés hídrico en la fase reproductiva, los

tratamientos de riego saturado en ambos cultivares comienzan a disminuir su nivel de SPAD, mientras que los tratamientos de estrés hídrico aumentan. En la fecha final de medición (154 DDS), los tratamientos de mayor estrés (estrés moderado (5)) de ambos cultivares poseen significativamente mayor valor SPAD en comparación a los tratamientos de riego saturado de ambos cultivares ($p < 0.05$). Los tratamientos de estrés leve (3) de ambos cultivares se encuentran en un punto medio entre el estrés moderado (5) y el riego saturado, ya que se puen presentan ambas agrupaciones (Figura 7c). No parece existir una respuesta única del contenido de clorofila de las hojas frente al estrés hídrico, existiendo variedades que presentan mayor valor SPAD durante el periodo de estrés mientras que otras presentan mayor valor después de su recuperación (Larkunthod et al., 2018; Swapna & Shylaraj, 2017). De la misma forma, el arroz también puede presentar una disminución de su valor SPAD al ser sometido a estrés por inundación (Behera et al., 2023; Wang et al., 2010). El SPAD final tiene una alta correlación negativa con la cobertura ($r = -0.96$) y la evapotranspiración total ($r = -0.94$), a la vez que estas dos últimas variables mencionadas presentan una correlación positiva entre ellas ($r = 0.93$) (Figura 9). El efecto de un sustrato con alto contenido de agua en los macroporos puede haber ocasionado en el tiempo un descenso progresivo del contenido de clorofila en las hojas en los tratamientos saturados. Mientras los tratamientos bajo estrés hídrico percibieron un secado del suelo en dos oportunidades, los tratamientos saturados permanecieron constantemente con agua. Justo después de ambos periodos de estrés hídrico los tratamientos estresados vieron un aumento en su valor SPAD, mientras que en los tratamientos saturados disminuye (Figura 7c). El ligero aumento de valor SPAD registrado a los 94 DDS en los tratamientos saturados se atribuye a la fertilización nitrogenada que ocurrió posterior al primer periodo de estrés.

4.2.6 Días a la floración

Las diferencias entre duración del crecimiento del arroz se dan en la fase vegetativa (Smith & Dilday, 2002), por lo que los días a la floración nos permiten ver si es que los periodos de estrés y los cultivares tuvieron efecto en la duración del desarrollo (Figura 7d). En este caso, la floración fue unos días más temprana en los tratamientos estresados de IR-71706 en comparación a los tratamientos estresados de La Capoteña, sin embargo, la diferencia es tan pequeña que no presenta significancia ($p > 0.05$). Los días a la floración no tienen una correlación significativa con el rendimiento ($r = 0.38$, $p > 0.05$), tal y como reportan Seyoum et al. (2012) y Bhor et al. (2020). En general, todas las plantas tuvieron su floración alrededor

de los 130 días después de la siembra. Estos resultados no se alinean a lo presentado por Pantuwan et al. (2002), donde los tratamientos bajo estrés hídrico tuvieron hasta 10 días de retraso para la floración. El retraso de la floración se atribuye a un retraso en la emergencia de la panícula, posiblemente influenciado por el menor potencial hídrico en los tratamientos estresados (Ekanayake et al., 1989). Las diferencias no significativas podrían indicar que existen otros factores que posiblemente han influenciado a los tratamientos sin estrés hídrico al punto de uniformizar los días a la floración.

4.2.7 Cobertura

La cobertura se vió afectada por el nivel de riego ($p > 0.05$) (Figura 7e). Los tratamientos saturados de ambos cultivares poseen significativamente mayor cobertura que los tratamientos de estrés moderado (5) de ambos cultivares. Los tratamientos de estrés leve (3) se encuentran en un punto medio, no presentan diferencias suficientemente significativas ni con los tratamientos saturados ni con los de estrés moderado (5) (Figura 7e). Plantas de arroz con mayor cobertura utilizan más agua del suelo y tienden a desarrollar un déficit de agua más rápidamente (Jongdee et al., 2002). En este caso, las plantas bajo estrés moderado (5) tuvieron menor cobertura que las de estrés leve (3); y en general todos los tratamientos estresados tuvieron menor cobertura que los saturados (Figura 7e), por lo que esta característica puede deberse a un respuesta frente al estrés hídrico. Sin embargo, una menor cobertura también podría significar que el cultivo no llegue a cubrir completamente el suelo en campo, aumentando la evaporación (Haeferle et al., 2016). En general, los tratamientos saturados presentaron un crecimiento más desordenado que aumentó su cobertura y con un color más amarillento reflejado en sus bajos valores de SPAD, por lo que desde un punto de vista fisiológico las plantas bajo estrés hídrico presentaron un mejor desarrollo. Cabe resaltar nuevamente que el sustrato orgánico utilizado puede haber sido un factor de importancia que se refleja en los resultados.

El área de cobertura individual no es un factor de estudio común en el estrés hídrico, pues normalmente se realizan evaluaciones en campo de otras características sobre la cobertura conjunta de una cantidad de plantas (Jones et al., 2009; Melandri et al., 2020; Turner et al., 1986). Debido a que un factor determinante de la temperatura de las hojas es la tasa de transpiración, la medición de la temperatura del follaje es comúnmente utilizada para estudiar las relaciones planta agua en arroz (Jones et al., 2009). Las plantas bajo estrés hídrico presentan menor conductancia estomática, que se refleja en una mayor temperatura de las hojas al limitar la transpiración (Melandri et al., 2020).

4.3 Objetivo 3: Cuantificar el consumo y la eficiencia de uso de agua en cada uno de los tratamientos.

La fracción transpirable del suelo (FTS) permite observar la diferencia en el consumo de agua entre los niveles de riego, y se puede observar claramente los periodos de estrés hídrico en la fase vegetativa y en la fase reproductiva (Figura 8a). La alta variación de la FTS entre los días se debe a que las altas temperaturas y la radiación solar directa provocaron una alta evapotranspiración.

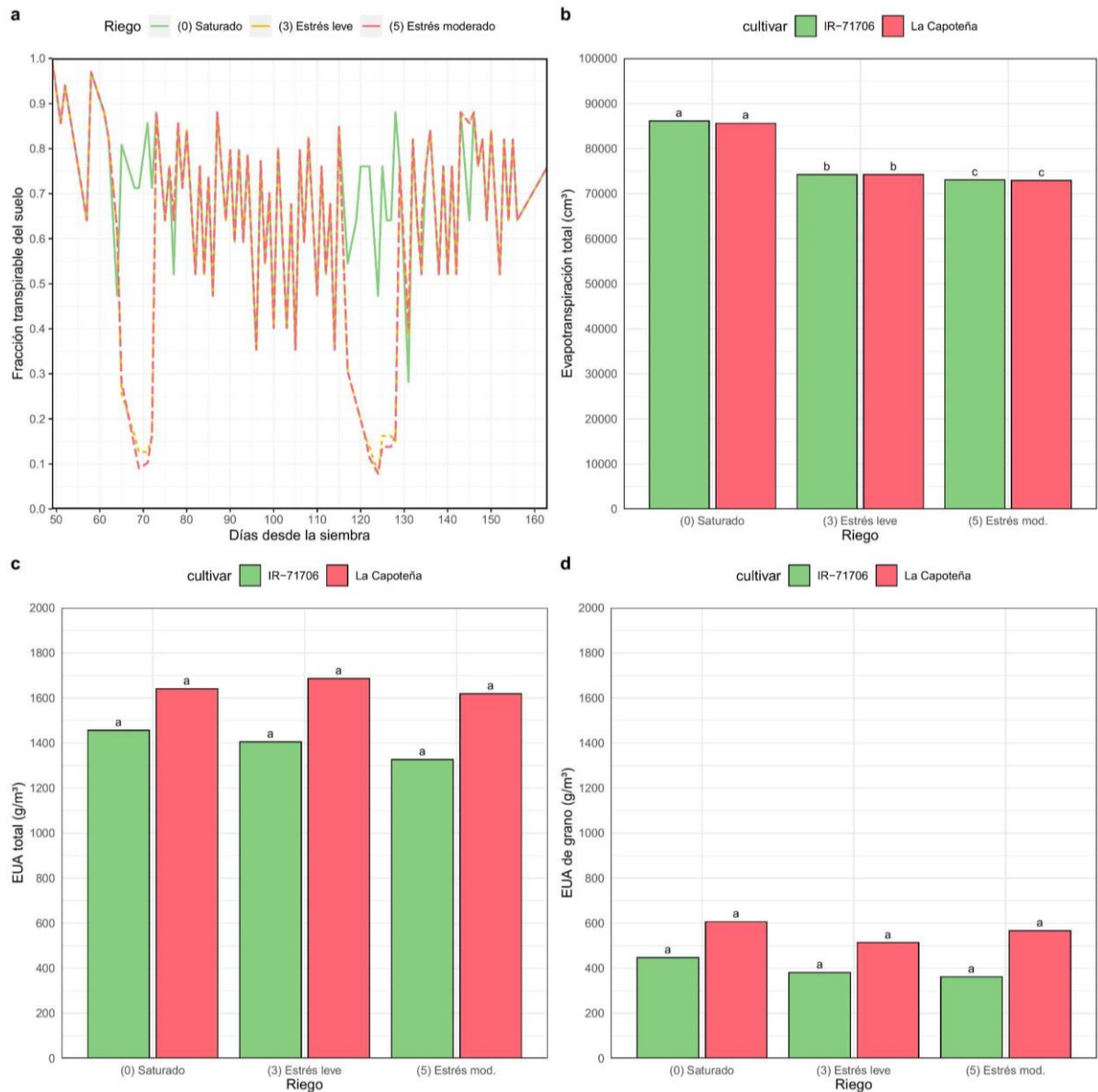


Figura 8: Consumo y eficiencia de uso de agua de dos cultivares de arroz sometidos a dos niveles de estrés hídrico. (a) Fracción transpirable del suelo a lo largo del desarrollo del cultivo. (b) Evapotranspiración total. (c) Eficiencia de uso de agua total. (d) Eficiencia de uso de agua de grano.

4.3.1 Evapotranspiración total

En cuanto a la evapotranspiración total, se observa una clara diferencia entre los niveles de riego ($p < 0.05$) (Figura 8b). Cada nivel de riego pertenece a una agrupación distinta, siendo la más alta el riego saturado, seguida del estrés leve (3) y por último el estrés moderado (5). La evapotranspiración total en los tratamientos de estrés leve (3) fue en promedio 13.8% menor en comparación a los tratamientos saturados (0), mientras que en los de estrés moderado (5) fue en promedio 15.2% menor (Tabla 8). Sin embargo, cuando se observa la eficiencia de uso de agua, esta diferencia en el riego no parece afectar la producción de biomasa. Cuando se calcula la pérdida del rendimiento con respecto al tratamiento saturado y se compara con el ahorro de agua, observamos que el cultivar La Capoteña posee menor relación pérdida/ahorro en comparación a IR-71706 (Tabla 8). En otras palabras, La Capoteña pierde menor rendimiento por cada m^3 de agua ahorrada bajo estrés hídrico, en comparación a IR-71706.

Tabla 8: Relación entre el rendimiento y evapotranspiración total.

Cultivar	Riego	Rendimiento (g/m ²)	Evapotrans. total (m ³)	Pérdida rendimiento (%)	Ahorro de agua (%)	Relación pérdida/ahorro
IR-71706	(0) Saturado	705.0	0.0861 a	0.0%	0.0%	
	(3) Estrés leve	506.2	0.0742 b	28.2%	13.8%	2.0
	(5) Estrés mod.	487.3	0.0731 c	30.9%	15.2%	2.0
La Capoteña	(0) Saturado	901.9	0.0856 a	0.0%	0.0%	
	(3) Estrés leve	688.6	0.0742 b	23.7%	13.3%	1.8
	(5) Estrés mod.	745.3	0.0729 c	17.4%	14.8%	1.2

4.3.2 Eficiencia de uso de agua total y de grano

La eficiencia de uso de agua total (EUAt) indica qué tanto follaje y granos pueden ser formados con 1 m^3 de agua, y no se observan diferencias significativas entre los tratamientos ($p > 0.05$) (Figura 8c). Para todos los niveles de riego, el cultivar La Capoteña posee una mayor EUAt en comparación al cultivar IR-71706, sin embargo, aún se encuentran dentro de la misma agrupación. A pesar de esto, se observa que en el cultivar IR-71706 la EUAt disminuye ligeramente en ambos tratamientos estresados y en La Capoteña disminuye con el estrés moderado, contrario a lo que indican Kamoshita et al. (2004), donde la eficiencia

total subió en los tratamientos con estrés hídrico. En el caso de la eficiencia de uso de agua de grano (EUAg), se centra específicamente en qué tanto peso de granos se puede formar con 1 m³ de agua, tampoco presenta diferencias significativas ($p > 0.05$) (Figura 8d). Ocurre un caso similar con la EUAt, donde el cultivar La Capoteña presenta mayor EUAg que el cultivar IR-71706 para todos los niveles de riego, aun encontrándose dentro de la misma agrupación. T. Hussain et al. (2022) presenta que la EUAg disminuye con el estrés hídrico para diversos cultivares. A pesar de no tener diferencias estadísticas en nuestros resultados, se observa que para ambos cultivares la EUAg promedio disminuye ligeramente en los tratamientos estresados con respecto a los tratamientos sin estrés. Si bien la EUA total posee algunas correlaciones notables con otras variables, es la EUA de grano la que tiene correlaciones más altas. La EUA de grano posee una alta correlación positiva con el rendimiento ($r = 0.94$), el índice de cosecha ($r = 0.98$), el porcentaje de macollos con panoja ($r = 0.96$), la EUA total ($r = 0.91$) y el ya mencionado número de granos por panoja (Figura 9). De la misma forma, T. Hussain et al. (2022) indica que la EUA de grano tiene correlación positiva con el rendimiento tanto en tratamientos sin estrés como bajo estrés hídrico.

4.4 Análisis de componentes principales

En el análisis de componentes principales (PCA) para ambos factores, se observa que el cultivar parece ser más determinante que las diferencias del riego. En la agrupación por cultivar (Figura 10b), se puede ver que los cultivares se encuentran separados a lo largo del primer componente, que explica el 59.70% de la variación. Por otro lado, en la agrupación por riego (Figura 10a), se observa que los niveles de riego se encuentran separados a lo largo del segundo componente, que explica el 25.31% de la variación.

Observando las variables evaluadas (Figura 10c), las variables agronómicas de rendimiento y número de granos por panoja están más asociadas con el riego saturado en el cultivar La Capoteña. Anteriormente determinamos que el número de granos por panoja fue el único componente del rendimiento con diferencias significativas entre los tratamientos. En general, el cultivar La Capoteña se encuentra asociado a un mayor rendimiento, índice de cosecha, número de granos por panoja, porcentaje de macollos con panoja, días a la floración y eficiencia de uso de agua total y de grano. Por otro lado, el cultivar IR-71706 se asocia a un mayor número de panículas por m² y número final de macollos (Figura 10).

En cuanto al otro factor, un riego saturado se encuentra asociado a una mayor cobertura y evapotranspiración total, mientras que el estrés moderado (5) se asocia a un mayor valor SPAD final (Figura 10).

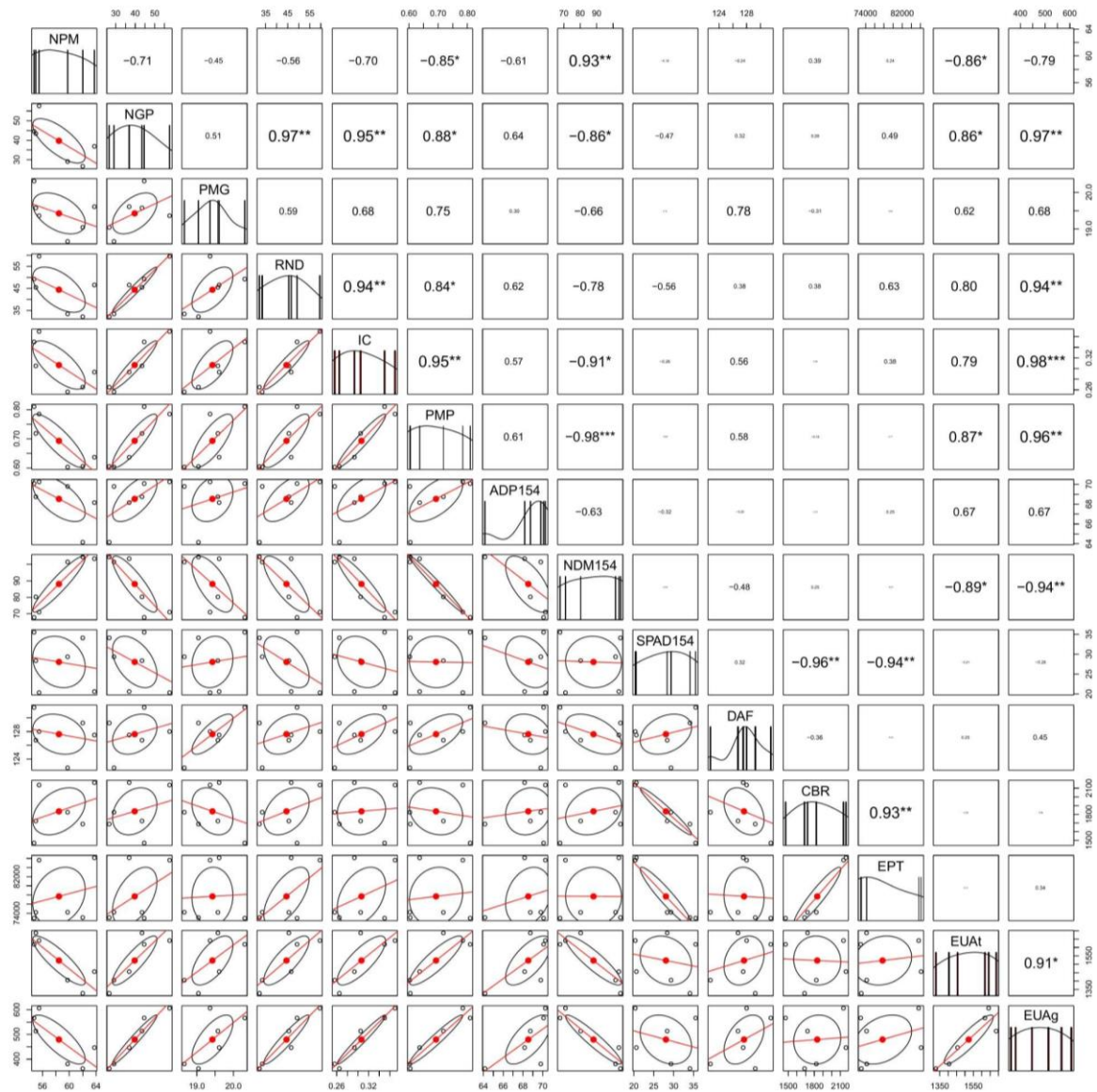


Figura 9: Correlación de Pearson para 14 variables evaluadas en 2 cultivares de arroz bajo 3 niveles de riego. Coeficientes de correlación ubicados arriba hacia la derecha, regresiones lineales abajo hacia la izquierda y distribuciones de forma diagonal. p-valor: 0.05*, 0.01**, 0.001***. Dónde: Número de panículas por m² (NPM), Número de granos por panoja (NGP), Peso de mil granos (PMG; g), Rendimiento (RND; g/m²), Índice de cosecha (IC), Porcentaje de macollos con panoja (PMP; %), Altura de planta final a los 154 DDS (ADP154; cm), Número de macollos final a los 154 DDS (NDM154), Valor SPAD final a los 154 DDS (SPAD154), Días a la floración (DAF), Cobertura (CBR; cm²), Evapotranspiración total (EPT; cm³), Eficiencia de uso de agua total (EUAt; g/m²), Eficiencia de uso de agua de grano (EUAg; g/m²).

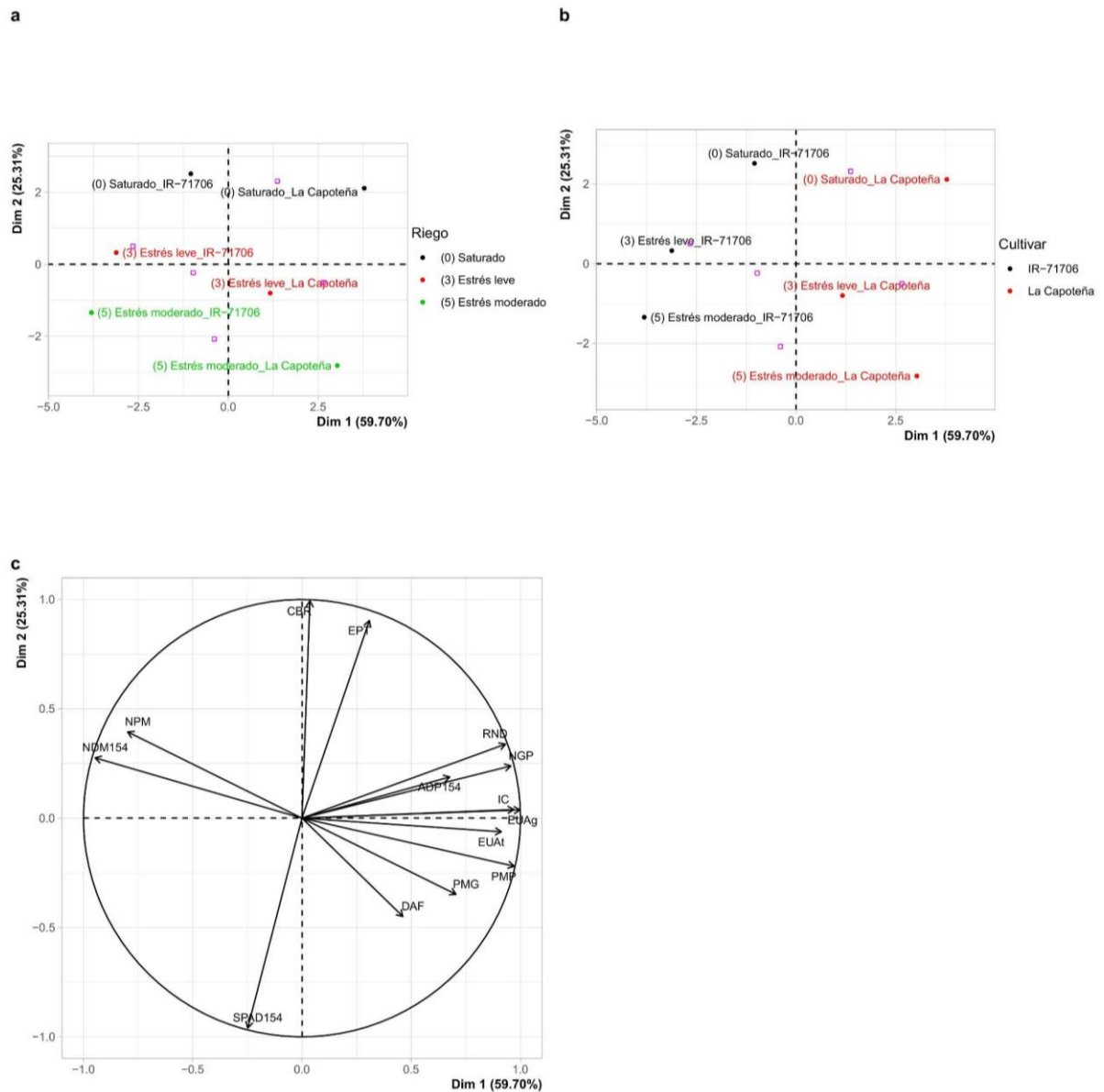


Figura 10: Análisis de Componentes Principales (PCA) para las variables evaluadas en 2 cultivares de arroz bajo 3 niveles de riego. (a) PCA para los 3 niveles de riego. (b) PCA para los 2 cultivares. (c) PCA para las 14 variables evaluadas. Dónde: Número de panículas por m² (NPM), Número de granos por panoja (NGP), Peso de mil granos (PMG; g), Rendimiento (RND; g/m²), Índice de cosecha (IC), Porcentaje de macollos con panícula (PMP; %), Altura de planta final a los 154 DDS (ADP154; cm), Número de macollos final a los 154 DDS (NDM154), Valor SPAD final a los 154 DDS (SPAD154), Días a la floración (DAF), Cobertura (CBR; cm²), Evapotranspiración total (EPT; cm³), Eficiencia de uso de agua total (EUAt; g/m²), Eficiencia de uso de agua de grano (EUAg; g/m²).

Según lo observado en el PCA, el factor cultivar es la causa de mayor parte de la variabilidad en comparación al factor riego. Las características agronómicas de La Capoteña son notablemente superiores sin tomar en cuenta el estrés hídrico, a pesar de no encontrar diferencias significativas. La Capoteña tiene un mayor número de granos por panoja, rendimiento, índice de cosecha, porcentaje de macollos efectivos, eficiencia de uso de agua total y eficiencia de uso de agua de grano. Si bien IR-71706 tiene en promedio un mayor número final de macollos y número de panículas por m², otros componentes con mayor correlación positiva con el rendimiento como el número de granos por panoja (Bhutta et al., 2019; Moonmoon & Islam, 2017) y el porcentaje de macollos productivos (Babu et al., 2012) lo sitúan en inferioridad en comparación a La Capoteña.

Según la literatura, el cultivar La Capoteña posee un peso de mil granos de 28.6 gramos (Instituto Nacional de Innovación Agraria, 2021). En el presente trabajo, el tratamiento de La Capoteña en condiciones sin estrés tuvo en promedio un peso de mil granos de 19.4 gramos, por lo que dicho componente fue 32.2% menor al teórico. Incluso la altura de planta promedio final del tratamiento saturado de La Capoteña, 70.3 cm, se encuentra 21.9% por debajo del límite inferior del rango teórico, que es entre los 90 y 102 cm (Instituto Nacional de Innovación Agraria, 2021). Esto apoya la idea de que, a pesar de no haber tenido periodos de estrés hídrico en los tratamientos saturados, las condiciones no fueron las apropiadas para el correcto desarrollo del arroz. Las condiciones controladas, diferentes al campo, como el tamaño de la maceta o el sustrato muy poroso pueden haber influenciado en dichos resultados.

4.5 Limitaciones

La turba difiere en varios aspectos de los suelos minerales, como por ejemplo, en el gran espacio que ocupan sus macroporos (Dettmann et al., 2014; Dimitrov et al., 2010). La baja capacidad de retención de agua de los macroporos y la gran cantidad de agua almacenada en estos provoca altas tasas de evaporación y un descenso rápido del contenido de agua (Dettmann et al., 2014). La fracción transpirable del suelo, incluso en los tratamientos saturados, fue muy variable por las altas temperaturas que determinaron altas tasas de evapotranspiración (Figura 8a). Es muy probable que los tratamientos saturados hayan sufrido algún grado de estrés, y este es el motivo por el cual variables como los días a la floración y la eficiencia de uso de agua total, que en otros estudios se retrasan (Ekanayake et al., 1989; Pantuwan et al., 2002) o aumentan (Kamoshita et al., 2004) respectivamente en

comparación a tratamientos sin estrés, no hayan tenido diferencias. El uso de un suelo mineral y no tener una bolsa que evite la infiltración podría haber permitido un movimiento del agua del suelo más parecido a condiciones de campo, además de permitir la evaluación de tratamientos inundados. Adicionalmente, el tamaño de la maceta puede haber restringido la capacidad de desarrollo del sistema radicular de ambos cultivares. El enraizamiento profundo es un mecanismo para la tolerancia al estrés hídrico en el arroz (Kameoka et al., 2015; Lucob-Agustin et al., 2021; Uga et al., 2011), característica que fue limitada en el presente trabajo por la maceta de 10 litros.

Como se observa en la FTS (Figura 8a), la variación diaria del contenido de agua en el suelo fue muy fluctuante. El trabajo no contó con un sistema de riego instalado, por lo que la aplicación de agua se realizó manualmente y no pudo haber suplido en el momento adecuado los requerimientos debido a la alta tasa de evapotranspiración. Cuando se utilizan sustratos con tanta porosidad, es recomendable utilizar sistemas automatizados que son capaces de realizar riegos constantes.

En el Sistema de Evaluación Estándar para Arroz, la sensibilidad a la sequía se mide en escalas para enrollamiento de hojas, secado de hojas y fertilidad de espiguillas (International Rice Research Institute, 2013). Debido a que el estrés hídrico debía medirse tanto en la fase vegetativa como reproductiva sin tener pérdida de plantas, se utilizó la escala para enrollamiento de hojas en la caracterización de los tratamientos. Sin embargo, como se observa en la fracción transpirable del suelo (Figura 8a), la diferencia de agua disponible entre el estrés leve (3) y estrés moderado (5) es mínima a lo largo del desarrollo del cultivo. Observando la evapotranspiración total (Figura 8b), a pesar de pertenecer a agrupaciones diferentes, la diferencia entre ambos niveles de estrés sigue siendo muy pequeña en comparación a la diferencia con el riego saturado.

El enrollamiento es un buen indicador de la disminución de agua en el suelo por la pérdida de turgencia en las hojas (Lafitte et al., 2003; Pandey & Shukla, 2015), por lo que es muy útil para determinar cuándo la planta ha comenzado a entrar en estrés hídrico. Sin embargo, no está generalmente relacionado con el rendimiento (Lafitte et al., 2003). Los resultados del trabajo sugieren lo mismo, donde los tratamientos de estrés moderado (5) presentaron rendimientos similares a los tratamientos de estrés leve (3) a pesar de haber estado en un nivel de estrés más alto según la escala de enrollamiento (Figura 6a). Si bien históricamente el enrollamiento de hojas ha sido asociado con la sequía en el arroz, estudios indican que el

enrollamiento bajo sequía se ve más afectado por la morfología de la hoja que por el contenido de agua de la hoja, la conductancia estomática o mantenimiento de la biomasa (Cal et al., 2019).

La escala de enrollamiento registrada puede variar durante el día, siendo menor en la mañana y en un punto máximo después del mediodía. Además, hojas viejas suelen tener menos capacidad de enrollamiento en comparación a hojas jóvenes (Lafitte et al., 2003). En ambos periodos de estrés manejados en el experimento, el enrollamiento no era tan notable en la mañana cuando todavía estaba húmedo y poco soleado, pero mientras avanzaba el día las plantas mostraban enrollamientos más diferenciados en sus hojas. También, diferentes variedades de arroz pueden presentar distintos niveles de enrollamiento según la escala bajo el mismo periodo y manejo del estrés hídrico (Swapna & Shylaraj, 2017). En el manejo del estrés hídrico, se estandarizó el criterio con la escala de enrollamiento, por lo tanto, no se puede afirmar que los cultivares La Capoteña e IR-71706 de tratamientos con el mismo nivel de agua realmente tuvieron la misma disponibilidad de agua en sus periodos de estrés. Queda abierta la posibilidad de que algunas macetas de estrés leve (3) en realidad hayan tenido en realidad un contenido de agua comparable con el estrés moderado (5) y viceversa.

V. CONCLUSIONES

En la respuesta del rendimiento, el cultivar La Capoteña tiene mejor potencial de rendimiento en comparación a IR-71706 para todos los niveles de riego. El número de granos por panoja es el componente que tuvo mayor influencia en el rendimiento, además de estar altamente correlacionados de forma positiva.

En la respuesta fisiológica, La Capoteña tiene mayor índice de cosecha y más macollos productivos que IR-71706, además que el porcentaje de macollos con panícula también posee correlación positiva con el rendimiento. Los tratamientos con riego saturado tuvieron un menor contenido de clorofila y una mayor cobertura. Se postula que el sustrato con gran cantidad de macroporos y la fracción transpirable del suelo muy fluctuante pueden haber causado un efecto negativo incluso en los tratamientos sin estrés hídrico, lo que se refleja en la baja influencia del factor riego en el PCA y en variables que en otros estudios presentan diferencias, pero en este trabajo no como los días a la floración y la eficiencia de uso de agua total.

La evapotranspiración total fue en promedio 0.086, 0.074 y 0.073 m³ en riego saturado (0), estrés leve (3) y estrés moderado (5) respectivamente. Si bien el consumo de agua fue menor en ambos niveles de estrés hídrico, el ahorro de agua en el estrés moderado fue mínimo en comparación al estrés leve. Adicionalmente, el ahorro de agua no tuvo un impacto en la eficiencia de uso de agua, aunque en general el cultivar La Capoteña tuvo una mejor eficiencia total y de grano independientemente del estrés hídrico.

VI. RECOMENDACIONES

1. Determinar las influencias agroclimáticas en el rendimiento en grano en diferentes áreas arroceras de la costa.
2. Evaluar las respuestas morfofisiológicas de los cultivares de maduración precoz (120-130 días) y maduración tardía (150 días) en condiciones de estrés.
3. Realizar investigaciones de eficiencia de uso de agua, en condiciones de campo agrícola, en áreas arroceras.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Avil Kumar, K., & Rajitha, G. (2019). Alternate Wetting and Drying (AWD) irrigation - A smart water saving technology for rice: A review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8, 2561-2571. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.803.304>
- Babu, V. R., Shreya, K., Dangi, K. S., Usharani, G., & Shankar, A. S. (2012). *Correlation and Path Analysis Studies in Popular Rice Hybrids of India*. 2(3).
- Bandumula, N. (2018). Rice Production in Asia: Key to Global Food Security. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 88(4), 1323-1328. <https://doi.org/10.1007/s40011-017-0867-7>
- Behera, P. K., Kumar, V., Sharma, S. S., Lenka, S. K., & Panda, D. (2023). Genotypic diversity and abiotic stress response profiling of short-grain aromatic landraces of rice (*Oryza sativa* L. Indica). *Current Plant Biology*, 33, 100269. <https://doi.org/10.1016/j.cpb.2022.100269>
- Bhor, T. J., Kashid, N. V., & Kadam, S. M. (2020). Genetic variability, character association and path analysis studies for yield components traits in promising rice (*Oryza sativa* L.) genotypes. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 9(4), 1953-1956.
- Bhutta, M., Munir, S., Qureshi, M., Shahzad, A., Aslam, K., Manzoor, H., & Shabir, G. (2019). Correlation and path analysis of morphological parameters contributing to yield in rice (*Oryza sativa*) under drought stress. *Pakistan Journal of Botany*, 51, 73-80. [https://doi.org/10.30848/PJB2019-1\(28\)](https://doi.org/10.30848/PJB2019-1(28))
- Borrell, A., Garside, A., & Fukai, S. (1997). Improving efficiency of water use for irrigated rice in a semi-arid tropical environment. *Field Crops Research*, 52(3), 231-248. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(97\)00033-6](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(97)00033-6)
- Cai, Y., Wang, W., Zhu, Z., Zhang, Z., Lang, Y., & Zhu, Q. (2006). Effects of water stress during grain-filling period on rice grain yield and its quality under different nitrogen levels. *Ying yong sheng tai xue bao = The journal of applied ecology*, 17(7), 1201-1206.

- Cal, A. J., Sanciangco, M., Rebolledo, M. C., Luquet, D., Torres, R. O., McNally, K. L., & Henry, A. (2019). Leaf morphology, rather than plant water status, underlies genetic variation of rice leaf rolling under drought. *Plant, Cell & Environment*, *42*(5), 1532-1544. <https://doi.org/10.1111/pce.13514>
- Caldas, J., & Lizárraga, A. (2020). Guía técnica: Manejo del cultivo de arroz bajo el sistema de riego con secas intermitentes en las regiones de Tumbes, Piura, Lambayeque y la Libertad. En *Instituto Nacional de Innovación Agraria*. Instituto Nacional de Innovación Agraria. <https://repositorio.inia.gob.pe/handle/20.500.12955/1053>
- Carrizo, D. R., Lundy, M. E., & Linquist, B. A. (2017). Rice yields and water use under alternate wetting and drying irrigation: A meta-analysis. *Field Crops Research*, *203*, 173-180. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.12.002>
- Clark, L. G., Zhang, W., & Wendel, J. F. (1995). A Phylogeny of the Grass Family (Poaceae) Based on ndhF Sequence Data. *Systematic Botany*, *20*(4), 436-460. <https://doi.org/10.2307/2419803>
- Dettmann, U., Bechtold, M., Frahm, E., & Tiemeyer, B. (2014). On the applicability of unimodal and bimodal van Genuchten–Mualem based models to peat and other organic soils under evaporation conditions. *Journal of Hydrology*, *515*, 103-115. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.047>
- Dimitrov, D. D., Grant, R. F., Lafleur, P. M., & Humphreys, E. R. (2010). Modeling the Subsurface Hydrology of Mer Bleue Bog. *Soil Science Society of America Journal*, *74*(2), 680-694. <https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0148>
- Ekanayake, I. J., Datta, S. K. D., & Steponkus, P. L. (1989). Spikelet Sterility and Flowering Response of Rice to Water Stress at Anthesis. *Annals of Botany*, *63*(2), 257-264. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a087740>
- Eskandari, H., & Attar, S. (2015). Energy comparison of two rice cultivation systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *42*, 666-671. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.050>
- Ferreyra, R. (1993). Registros de la vegetación en la costa peruana en relación con el fenómeno El Niño. *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*, *22*(1), 259-266. <https://doi.org/10.3406/bifea.1993.1115>
- Fonseca, S. E., Verano, C., & Mariluz, J. P. (2012). Huella hídrica del arroz en el Perú. *Autoridad Nacional del Agua*. <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/546>
- Furuya, J., & Koyama, O. (2005). Impacts of Climatic Change on World Agricultural

- Product Markets: Estimation of Macro Yield Functions. *Japan Agricultural Research Quarterly: JARQ*, 39(2), 121-134. <https://doi.org/10.6090/jarq.39.121>
- Haefele, S. M., Kato, Y., & Singh, S. (2016). Climate ready rice: Augmenting drought tolerance with best management practices. *Field Crops Research*, 190, 60-69. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.02.001>
- Haider, Z., Khan, A., & Zia, S. (2012). Correlation and Path Coefficient Analysis of Yield Components in Rice (*Oryza sativa* L.) Under Simulated Drought Stress Condition. *American-Eurasian Journal Agriculture & Environmental Sciences*, 12, 100-104.
- Heros, E., Gómez, L., Soplín, H., & Sosa, G. (2017). Siembra directa: Una alternativa para mejorar la sustentabilidad del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) en el Perú. *Producción Agropecuaria y Desarrollo Sostenible*, 6, 13-26. <https://doi.org/10.5377/payds.v6i0.5716>
- Heros, E., Gómez, L., & Sosa, G. (2017). Utilización de los índices de selección en la identificación de genotipos de arroz (*Oryza sativa* L.) tolerantes a sequía. *Producción Agropecuaria y Desarrollo Sostenible*, 2, 11-31. <https://doi.org/10.5377/payds.v2i0.4326>
- Hossain, M. Z., Sikder, S., Husna, A., Sultana, S., Akhter, S., Alim, A., & Joardar, J. C. (2020). Influence of Water Stress on Morphology, Physiology and Yield Contributing Characteristics of Rice. *SAARC Journal of Agriculture*, 18(1), Article 1. <https://doi.org/10.3329/sja.v18i1.48382>
- Hussain, S., Huang, J., Huang, J., Ahmad, S., Nanda, S., Anwar, S., Shakoor, A., Zhu, C., Zhu, L., Cao, X., Jin, Q., & Zhang, J. (2020). Rice Production Under Climate Change: Adaptations and Mitigating Strategies. En S. Fahad, M. Hasanuzzaman, M. Alam, H. Ullah, M. Saeed, I. Ali Khan, & M. Adnan (Eds.), *Environment, Climate, Plant and Vegetation Growth* (pp. 659-686). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49732-3_26
- Hussain, T., Hussain, N., Tahir, M., Raina, A., Ikram, S., Maqbool, S., Fraz Ali, M., & Duangpan, S. (2022). Impacts of Drought Stress on Water Use Efficiency and Grain Productivity of Rice and Utilization of Genotypic Variability to Combat Climate Change. *Agronomy*, 12(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102518>
- Instituto Nacional de Innovación Agraria. (2021). *Nueva variedad de Arroz INIA 515—Capoteña*. Instituto Nacional de Innovación Agraria. <https://hdl.handle.net/20.500.12955/1529>
- International Rice Research Institute. (2013). *Standard Evaluation System (SES) for Rice*

- (5th Edition). International Rice Research Institute.
- Jena, B. K., Barik, S. R., Moharana, A., Mohanty, S. P., Sahoo, A., Tudu, R., Kole, P. C., & Pradhan, S. K. (2023). *Rice Production and Global Climate Change*. 48(1), 39075-39095. <https://doi.org/10.26717/BJSTR.2023.48.007592>
- Jones, H. G., Serraj, R., Loveys, B. R., Xiong, L., Wheaton, A., Price, A. H., Jones, H. G., Serraj, R., Loveys, B. R., Xiong, L., Wheaton, A., & Price, A. H. (2009). Thermal infrared imaging of crop canopies for the remote diagnosis and quantification of plant responses to water stress in the field. *Functional Plant Biology*, 36(11), 978-989. <https://doi.org/10.1071/FP09123>
- Jongdee, B., Fukai, S., & Cooper, M. (2002). Leaf water potential and osmotic adjustment as physiological traits to improve drought tolerance in rice. *Field Crops Research*, 76(2), 153-163. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(02\)00036-9](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(02)00036-9)
- Kameoka, E., Suralta, R. R., Mitsuya, S., & Yamauchi, A. (2015). Matching the Expression of Root Plasticity with Soil Moisture Availability Maximizes Production of Rice Plants Grown in an Experimental Sloping Bed having Soil Moisture Gradients. *Plant Production Science*, 18(3), 267-276. <https://doi.org/10.1626/pp.s.18.267>
- Kamoshita, A., Rodriguez, R., Yamauchi, A., & Wade, L. (2004). Genotypic Variation in Response of Rainfed Lowland Rice to Prolonged Drought and Rewatering. *Plant Production Science*, 7(4), 406-420. <https://doi.org/10.1626/pp.s.7.406>
- Khalil, M. A. K., Rasmussen, R. A., Wang, M. X., & Ren, L. (2002, mayo 1). *Methane emissions from rice fields in China (world)*. ACS Publications; American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/es00017a023>
- Konica Minolta. (2009). *CHLOROPHYLL METER SPAD-502Plus*. KONICA MINOLTA OPTICS,INC.
- Lafitte, R., Blum, A., & Atlin, G. (2003). Using secondary traits to help identify drought-tolerant genotypes. En K. S. Fischer, R. Lafitte, S. Fukai, G. Atlin, & B. Hardy (Eds.), *Breeding rice for drought-prone environments* (pp. 37-48). IRRI.
- Lampayan, R. M., Rejesus, R. M., Singleton, G. R., & Bouman, B. A. M. (2015). Adoption and economics of alternate wetting and drying water management for irrigated lowland rice. *Field Crops Research*, 170, 95-108. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.10.013>
- Larkunthod, P., Nounjan, N., Siangliw, J. L., Toojinda, T., Sanitchon, J., Jongdee, B., & Theerakulpisut, P. (2018). Physiological Responses under Drought Stress of Improved Drought-Tolerant Rice Lines and their Parents. *Notulae Botanicae Horti*

- Agrobotanici Cluj-Napoca*, 46(2), Article 2. <https://doi.org/10.15835/nbha46211188>
- Lê, S., Josse, J., & Husson, F. (2008). FactoMineR: A Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software*, 25(1), 1-18. <https://doi.org/10.18637/jss.v025.i01>
- Li, X., Chen, D., Cao, X., Luo, Z., & Webber, M. (2020). Assessing the components of, and factors influencing, paddy rice water footprint in China. *Agricultural Water Management*, 229, 105939. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105939>
- Lozano-Isla, F. (2023). *inti: Tools and Statistical Procedures in Plant Science*. <https://CRAN.R-project.org/package=inti>
- Lucob-Agustin, N., Kawai, T., Kano-Nakata, M., Suralta, R. R., Niones, J. M., Hasegawa, T., Inari-Ikeda, M., Yamauchi, A., & Inukai, Y. (2021). Morpho-physiological and molecular mechanisms of phenotypic root plasticity for rice adaptation to water stress conditions. *Breeding Science*, 71(1), 20-29. <https://doi.org/10.1270/jsbbs.20106>
- Melandri, G., Prashar, A., McCouch, S. R., van der Linden, G., Jones, H. G., Kadam, N., Jagadish, K., Bouwmeester, H., & Ruyter-Spira, C. (2020). Association mapping and genetic dissection of drought-induced canopy temperature differences in rice. *Journal of Experimental Botany*, 71(4), 1614-1627. <https://doi.org/10.1093/jxb/erz527>
- Montero, F. (2019). *INIA 515 – CAPOTEÑA INFORME TÉCNICO*. Instituto Nacional de Innovación Agraria.
- Moonmoon, S., & Islam, M. T. (2017). Effect of drought stress at different growth stages on yield and yield components of six rice (*Oryza sativa* L.) genotypes. *Fundamental and Applied Agriculture*, 2(3), Article 3. <https://doi.org/10.5455/faa.277118>
- Oehlert, G. W. (2000). *A first course in design and analysis of experiments*. W.H. Freeman.
- Panda, D., & Barik, J. (2021). Flooding Tolerance in Rice: Focus on Mechanisms and Approaches. *Rice Science*, 28(1), 43-57. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2020.11.006>
- Pandey, V., & Shukla, A. (2015). Acclimation and Tolerance Strategies of Rice under Drought Stress. *Rice Science*, 22(4), 147-161. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2015.04.001>
- Panja, S., Garg, H., Debnath, K., Sarkar, K., & Mukherjee, S. (2017). Effect of water stress on different morphological traits of rice (*Oryza sativa* L.) genotypes in red & laterite zone of West Bengal. *IJABR*, 7, 419-425.
- Pantuwan, G., Fukai, S., Cooper, M., Rajatasereekul, S., & O'Toole, J. C. (2002). Yield response of rice (*Oryza sativa* L.) genotypes to drought under rainfed lowlands. *Field Crops Research*, 73(2), 169-180. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(01\)00195-2](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(01)00195-2)

- R Core Team. (2023). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Rejesus, R. M., Palis, F. G., Rodriguez, D. G. P., Lampayan, R. M., & Bouman, B. A. M. (2011). Impact of the alternate wetting and drying (AWD) water-saving irrigation technique: Evidence from rice producers in the Philippines. *Food Policy*, *36*(2), 280-288. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2010.11.026>
- Revelle, W. (2023). *psych: Procedures for Psychological, Psychometric, and Personality Research*. Northwestern University. <https://CRAN.R-project.org/package=psych>
- Rife, T. W., & Poland, J. A. (2014). Field Book: An Open-Source Application for Field Data Collection on Android. *Crop Science*, *54*(4), 1624-1627. <https://doi.org/10.2135/cropsci2013.08.0579>
- Sarvestani, Z. T., Pirdashti, H., Sanavy, S. A. M. M., & Balouchi, H. (2008). Study of water stress effects in different growth stages on yield and yield components of different rice (*Oryza sativa* L.) cultivars. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, *11*(10), 1303-1309. <https://doi.org/10.3923/pjbs.2008.1303.1309>
- Schneir, E. R. (2015). La huella hídrica como un indicador de sustentabilidad y su aplicación en el Perú. *Saber y Hacer*, *2*(1), Article 1.
- Seyoum, M., Alamerew, S., & Bantte, K. (2012). Genetic Variability, Heritability, Correlation Coefficient and Path Analysis for Yield and Yield Related Traits in Upland Rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Plant Sciences*, *7*, 13-22. <https://doi.org/10.3923/jps.2012.13.22>
- Sinclair, T. R., & Ludlow, M. M. (1986). Influence of Soil Water Supply on the Plant Water Balance of Four Tropical Grain Legumes. *Functional Plant Biology*, *13*(3), 329-341. <https://doi.org/10.1071/pp9860329>
- Smith, C. W., & Dilday, R. H. (2002). *Rice: Origin, History, Technology, and Production*. John Wiley & Sons.
- Soreng, R. J., Peterson, P. M., Romaschenko, K., Davidse, G., Zuloaga, F. O., Judziewicz, E. J., Filgueiras, T. S., Davis, J. I., & Morrone, O. (2015). A worldwide phylogenetic classification of the Poaceae (Gramineae). *Journal of Systematics and Evolution*, *53*(2), 117-137. <https://doi.org/10.1111/jse.12150>
- Swapna, S., & Shylaraj, K. S. (2017). Screening for Osmotic Stress Responses in Rice Varieties under Drought Condition. *Rice Science*, *24*(5), 253-263. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2017.04.004>
- Tabbal, D. F., Bouman, B. A. M., Bhuiyan, S. I., Sibayan, E. B., & Sattar, M. A. (2002). On-

- farm strategies for reducing water input in irrigated rice; case studies in the Philippines. *Agricultural Water Management*, 56(2), 93-112. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(02\)00007-0](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(02)00007-0)
- Tuong, P., Bouman, B. A. M., & Mortimer, M. (2005). More Rice, Less Water—Integrated Approaches for Increasing Water Productivity in Irrigated Rice-Based Systems in Asia. *Plant Production Science*, 8(3), 231-241. <https://doi.org/10.1626/pp.s.8.231>
- Turner, N. C., O'Toole, J. C., Cruz, R. T., Namuco, O. S., & Ahmad, S. (1986). Responses of seven diverse rice cultivars to water deficits I. Stress development, canopy temperature, leaf rolling and growth. *Field Crops Research*, 13, 257-271. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(86\)90027-4](https://doi.org/10.1016/0378-4290(86)90027-4)
- Uga, Y., Okuno, K., & Yano, M. (2011). Dro1, a major QTL involved in deep rooting of rice under upland field conditions. *Journal of Experimental Botany*, 62(8), 2485-2494. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq429>
- Venuprasad, R., Sta. Cruz, Ma. T., Amante, M., Magbanua, R., Kumar, A., & Atlin, G. (2008). Response to two cycles of divergent selection for grain yield under drought stress in four rice breeding populations. *Field Crops Research*, 107, 232-244. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.02.004>
- Vergara, B. S. (1991). Rice Plant Growth and Development. En B. S. Luh (Ed.), *Rice: Volume I. Production/Volume II. Utilization* (pp. 13-22). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-3754-4_2
- Wang, H., Zhang, L., Ma, J., Li, X., Li, Y., Zhang, R., & Wang, R. (2010). Effects of Water Stress on Reactive Oxygen Species Generation and Protection System in Rice During Grain-Filling Stage. *Agricultural Sciences in China*, 9(5), 633-641. [https://doi.org/10.1016/S1671-2927\(09\)60138-3](https://doi.org/10.1016/S1671-2927(09)60138-3)
- Wei, X., & Huang, X. (2019). 1—Origin, taxonomy, and phylogenetics of rice. En J. Bao (Ed.), *Rice (Fourth Edition)* (pp. 1-29). AACC International Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811508-4.00001-0>
- Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York. <https://ggplot2.tidyverse.org>
- Yang, J., Zhang, J., Wang, Z., Zhu, Q., & Wang, W. (2001). Remobilization of carbon reserves in response to water deficit during grain filling of rice. *Field Crops Research*, 71(1), 47-55. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(01\)00147-2](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(01)00147-2)
- Yoshida, H., & Nagato, Y. (2011). Flower development in rice. *Journal of Experimental Botany*, 62(14), 4719-4730. <https://doi.org/10.1093/jxb/err272>

Yoshida, S. (1981). *Fundamentals of Rice Crop Science*. International Rice Research Institute.

Zeigler, R. S., & Barclay, A. (2008). The Relevance of Rice. *Rice*, *1*(1), 3-10.
<https://doi.org/10.1007/s12284-008-9001-z>