

CARACTERIZACIÓN DE VARIEDADES E HÍBRIDOS DE ARROZ BAJO
CONDICIONES CONTROLADAS PARA TOLERANCIA A ALTAS
TEMPERATURAS Y SEQUÍA

YANI SANDRID VARGAS MENDOZA

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA
MONTERÍA

2022

CARACTERIZACIÓN DE VARIEDADES E HÍBRIDOS DE ARROZ BAJO
CONDICIONES CONTROLADAS PARA TOLERANCIA A ALTAS
TEMPERATURAS Y SEQUÍA

YANI SANDRID VARGAS MENDOZA

Trabajo de grado en la modalidad pasantías presentado como requisito parcial
para obtener el título de Ingeniero Agrónomo.

ASESOR DOCENTE:

HERMES ARAMENDIZ TATIS

I.A Ph.D, FITOMEJORAMIENTO

ASESORES EN LA EMPRESA:

ELIEL ENRIQUE PETRO PAÉZ

I.A Msc, FISILOGÍA VEGETAL

LIZETH MARCELA PINEDA VARGAS

I.A Msc, FISILOGÍA VEGETAL

CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL (CIAT)

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA

MONTERÍA

2022

La responsabilidad ética, legal y científica de las ideas, conceptos y resultados del proyecto serán responsabilidad del autor.

Artículo 17, acuerdo No. 039 del 24 de junio de 2005 del Consejo Superior de la Universidad de Córdoba.

NOTA DE ACEPTACIÓN

HERMES ARAMENDIZ TATIS, Ing. Agrónomo, Ph.D., Asesor

ALFREDO JARMA OROZCO, Ing. Agrónomo., Ph.D., Jurado

ELIEL ENRRIQUE PETRO PÁEZ, Ing. Agrónomo, Msc., Jurado

Montería, Febrero 4 de 2022.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios y a cada una de las personas que hicieron posible el cumplimiento de este, y de manera especial a mis padres, quienes día a día a pesar de tantas dificultades siempre se esforzaron por brindarme una buena crianza, por forjarme en principios, valores, libertades, y reglas; gracias a ustedes he podido cumplir cada una de mis metas y propósitos porque siempre me han motivado a luchar por ser una mejor persona, también dedico este logro a mi hijo y esposo, quienes me han brindado todo su amor y apoyo incondicional, a mis hermanas, amigos y maestros porque de cada uno he aprendido cosas importantes, gracias por recorrer conmigo este camino que no ha sido fácil pero si muy gratificante.

YANI SANDRID VARGAS MENDOZA

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, le doy gracias a Dios por regalarme la vida, por darme fuerzas, sabiduría y entendimiento para poder lograr cada una de mis metas y propósitos.

A la Universidad de Córdoba y a mis maestros por brindarme los conocimientos necesarios para desempeñarme en el ámbito laboral, en especial quiero agradecer a mi profesor Hermes Aramendiz Tatis, por su acompañamiento y dirección en este proceso de mi formación personal y profesional, por ser un gran maestro y amigo.

Al Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), por brindarme la oportunidad de ser parte de este gran grupo de trabajo, de personas muy capacitadas y excelentes seres humanos.

A mis asesores Eliel Enrique Petro Páez y Lizeth Marcela Pineda Vargas, por cada uno de los conocimientos que me brindaron y en especial agradezco su amistad y apoyo incondicional, me siento dichosa de haber tenido la oportunidad de contar con dos asesores en la empresa, cada uno tiene su forma de trabajar, pero ambos lo hacen de la mejor manera, mi admiración y respeto hacia ustedes.

A mi familia, por siempre brindarme su apoyo incondicional e impulsarme a cumplir mis sueños.

A Julieth Rocío Vargas Hernández, por creer en mí y hacer posible el cumplimiento de este sueño, por siempre brindarme su apoyo incondicional.

Finalmente agradezco a todas esas personas que de una u otra manera siempre confiaron en mí, a mi profesor Edinson Mangones, por siempre estar hay compartiendo sus conocimientos y por enseñarme a amar el deporte y a ser mejor persona, a mis amigos por los buenos momentos y cada una de sus enseñanzas.

CONTENIDO

	pág.
1. ALIANZA DE BIOVERSITY INTERNATIONAL Y EL CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL (CIAT)	19
1.1 MISIÓN	20
1.2 VISIÓN.....	20
2. OBJETIVOS	21
2.1 OBJETIVO GENERAL	21
2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	21
3. MARCO TEÓRICO	22
3.1 IMPORTANCIA ECONOMICA	22
3.2 DIVERSIDAD GENÉTICA DEL ARROZ	22
3.3 CRECIMIENTO Y DESARROLLO DE LA PLANTA DE ARROZ	23
3.3.1 Fase vegetativa.....	23
3.3.2 Fase reproductiva.	24
3.3.3 Fase de madurez.	25
3.4 RENDIMIENTO Y SUS COMPONENTES EN EL CULTIVO DE ARROZ.	26
3.4.1 Número de panículas por metro cuadrado.....	27
3.4.2 Número de espiguilla por panícula.....	28
3.4.3 Porcentaje de fertilidad.	28
3.4.4 Peso de 1000 gramos.....	29
3.5 ESTRÉS ABIOTICO	29
3.5.1 Estrés por sequía.....	30

3.5.2 Estrés por altas temperaturas	30
3.5.3 Estrés por baja radiación	31
3.6 HÍBRIDOS DE ARROZ	31
4. ACTIVIDADES DESARROLLADAS	33
4.1 EVALUACIÓN DE COMPONENTES DEL RENDIMIENTO EN TRES GENOTIPOS DE ARROZ.....	33
4.1.1 Sitio experimental y material genético.	33
4.1.2 Muestreos y mediciones	33
4.1.3 Análisis estadístico.	38
4.1.4 Resultados y análisis.	38
4.2 EVALUACIÓN PARA LA TOLERANCIA A ALTAS TEMPERATURAS NOCTURNAS EN EL INVERNADERO HIGH TUNNEL MOVIL	42
4.2.1 Sitio experimental y material genético.	42
4.2.2 Diseño experimental y manejo agronómico	42
4.2.4 Tratamiento de estrés.	45
4.2.5 Cosecha.....	47
4.3 EVALUACIÓN PARA LA TOLERANCIA A SEQUÍA EN EL RAINOUT SHELTER.....	48
4.3.1 Sitio experimental y material genético	48
4.3.2 Diseño experimental y manejo agronómico.	48
4.3.3 Muestreos y mediciones	53
4.3.4 Tratamiento de estrés	55
4.3.5 Cosecha de panículas y selección de plantas	56
4.3.6 Resultados y discusión.	57

5. CONCLUSIONES	60
6. RECOMENDACIONES	61
7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	62

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Análisis de varianza para el rendimiento y sus componentes para los tres genotipos evaluados.	39
Tabla 2. Dosis y fraccionamiento de fertilizantes en el experimento.	43
Tabla 3. Dosis y fraccionamiento de fertilizantes en el experimento (trasplante).	52
Tabla 4. Dosis y fraccionamiento de fertilizantes en el experimento (siembra directa).	52
Tabla 5. Análisis de varianza para el rendimiento en el método de trasplante.	58

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Muestras en pre secado a 65°C por 72 horas.	34
Figura 2. Proceso de desgrane de panículas. a) muestra de panículas para desgranar. b) desgrane manual de panículas. c) espiguillas desgranadas separadas del raquis.....	35
Figura 3. Proceso de separación de espiguillas. a) inicio del proceso en la venteadora. b) espiguillas llenas separadas en el fondo del tubo. c) espiguillas vanas e impurezas separadas en las pestañas del tubo. d) espiguillas llenas y vanas separadas.....	36
Figura 4. Proceso de pesado y conteo de espiguillas. a) pesado de muestra de espiguillas llenas. b) configuración de parámetros en la contadora. c) conteo de las muestras.	37
Figura 5. Efecto del tratamiento de sombra para las variedades Fedearroz 67, Fedearroz 50 y CT21375. a) rendimiento. b) porcentaje de fertilidad. c) peso de 100 granos.	40
Figura 6. Siembra escalonada de los genotipos en campo.....	43
Figura 7. Marcación de tallos en estado de embuchamiento. a) marcación de tallos. b) panícula en estado 8 de desarrollo.....	44
Figura 8. Perfil de temperatura (a) y humedad relativa (b) al inicio del tratamiento de estrés de altas temperaturas nocturnas en el Invernadero High Tunnel Móvil.	46
Figura 9. Invernadero High Tunnel Móvil. a) desplazamiento del invernadero. b) conexión al punto del gas. c) encendido de la calefacción. d) programación del cierre y apertura automática de las cortinas del invernadero. e) temporizador. f) vista del interior del invernadero. g) vista del exterior del invernadero.	47
Figura 10. Distribución experimental de los tratamientos en campo para el método de trasplante.	49

Figura 11. Distribución experimental de los tratamientos en campo para el método de siembra directa.....	50
Figura 12. Siembra de genotipos. a) plántulas de genotipos en camas. b) trazado manual. c) ensayo de siembra directa establecido. d) trasplante.....	51
Figura 13. Medición de altura de las plantas.....	53
Figura 14. Medición de tensiómetros.	54
Figura 15. Medición de humedad con equipo portátil Hydrosense.	54
Figura 16. Medición de contenidos relativos de clorofila.....	55
Figura 17. Rainout Shelter en ensayos establecidos de siembra directa y fangueo. a) parcelas de fangueo. b) parcelas de siembra directa. c) Rainout shelter de ambos ensayos.	56
Figura 18. Cosecha de parcelas. a) cosecha de plantas. b) trilla de plantas cosechadas.....	57
Figura 19. Efecto del tratamiento de sequía en rendimiento para la variedad Fedearroz 67 y los híbridos HL23035 y HL23057.....	59

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Rendimiento Kg/ha.....	37
Ecuación 2. Número de panículas por metro cuadrado	37
Ecuación 3. Número de espiguillas por panícula	38
Ecuación 4. Porcentaje de fertilidad.....	38
Ecuación 5. Peso de 1000 granos	38
Ecuación 6. Rendimiento kg/ha.	57

RESUMEN

El estrés ambiental es uno de los principales factores limitantes para la productividad de los cultivos de cereales en todo el mundo. El crecimiento de la planta de arroz está estrechamente con su entorno y su adaptación a las condiciones variables provocadas por la gran cantidad de factores ambientales que generan estrés abiótico. Con el objetivo de caracterizar variedades e híbridos de arroz bajo diferentes condiciones de estrés abiótico en condiciones controladas, se realizaron experimentos en el Centro Internacional de Agricultura Tropical durante 2021, para evaluar el efecto de sequía, altas temperaturas nocturnas y baja radiación sobre el rendimiento y sus componentes. Los resultados indican que la baja radiación redujo significativamente el porcentaje de fertilidad y el peso de 1000 granos lo que significa una reducción del rendimiento entre los genotipos evaluados; por su parte, el estrés por sequía causa una reducción de rendimiento principalmente en el híbrido HL23057. Estos resultados evidencian que estos estreses abióticos son factores limitantes para la productividad del cultivo y que el arroz es sensible a la falta de irrigación y baja radiación durante la fase de llenado de grano. Por lo tanto, comprender estos estreses e identificar genotipos tolerantes ayudará a lograr el objetivo de mejorar los cultivos y, por lo tanto, minimizar la pérdida en el rendimiento del cultivo del arroz, en aras de preservar la seguridad alimentaria de la población mundial.

Palabras clave: Tolerancia, estrés abiótico, rendimiento, genotipo.

ABSTRACT

Environmental stress is one of the main limiting factors for the productivity of cereal crops worldwide. The growth of the rice plant is closely related to its environment and its adaptation to the variable conditions caused by the large number of environmental factors that cause abiotic stress. With the aim of characterizing rice varieties and hybrids under different conditions of abiotic stress under controlled conditions, experiments were carried out at the International Center for Tropical Agriculture during 2021, to evaluate the effect of drought, high night temperatures and low radiation on yield and its components. The results indicate that low radiation significantly reduced the percentage of fertility and the weight of 1000 grains, which means a reduction in yield among the genotypes evaluated; On the other hand, drought stress causes a reduction in yield, mainly in the hybrid HL23057. These results show that these abiotic stresses are limiting factors for crop productivity and that rice is sensitive to lack of irrigation and low radiation during the grain-filling phase. Therefore, understanding these stresses and identifying tolerant genotypes will help to achieve the goal of improving crops and thus minimizing the loss in rice crop yield, in the interests of preserving the food security of the world population.

Keywords: Tolerance, abiotic stress, yield, genotype.

INTRODUCCIÓN

El arroz es uno de los cultivos alimenticios más importantes en el mundo, es consumido por más del 50% de la población mundial y proporciona el 45-60 % de la calorías de la dieta humana (Yang & Zhang, 2010), desempeñando un papel estratégico en la solución de los problemas de seguridad alimentaria (SOSBAI, 2018). Es uno de los cereales más cultivados en el mundo, ocupa una superficie aproximada de 161 millones de hectáreas y una producción de 756,5 millones de toneladas; los países productores más importantes en su orden son: China, India, Indonesia, Bangladesh, Vietnam, Tailandia, Myanmar, Filipinas y Brasil (SOSBAI, 2018); en el 2016 Colombia ocupó el puesto 28 a nivel mundial en la producción de arroz con una participación de 3,36 %; fue el tercer país productor de América Latina y del Caribe después de Brasil y Perú, con una participación de 11,4 % (FAO, 2017); en 2019 en el país se cultivaron 561,073 hectáreas, con una producción de 2.564.250 toneladas y un rendimiento promedio de 4,90 t ha⁻¹ (FEDEARROZ, 2020).

La productividad del arroz se ha duplicado en las últimas décadas, como resultado principalmente de la Revolución Verde y de los continuos esfuerzos de mejoramiento desde los años sesenta (Pingali, 2012). Sin embargo, para satisfacer las demandas impuestas por el aumento proyectado de la población mundial, la producción de arroz tiene que aumentar en un 25% o más para 2030 (Wang, & Zeigler, 2014); por lo tanto, se necesitan nuevas variedades de arroz que combinen alto potencial de rendimiento y resistencia a estrés abiótico por baja radiación, sequía y altas temperaturas nocturnas, entre otros factores, para satisfacer las futuras demandas de los consumidores (Liakat Ali et al., 2011), y así, cerrar la brecha de rendimiento entre la producción y la creciente necesidad de más arroz (Wu et al., 2013); esto es un reto importante para asegurar la producción sostenible de alimentos sin expandir aún más las tierras de cultivo y dañar el ambiente.

El estrés abiótico es el principal factor que afecta negativamente el crecimiento y la productividad de los cultivos en todo el mundo (Gao et al., 2007). El arroz es un cultivo alimenticio importante a nivel mundial y su producción se ha visto afectada progresivamente por varios tipos de estrés abiótico especialmente sequía, inundaciones, salinidad, y baja radiación, en la mayoría de los ecosistemas de arroz cultivable (Dar et al., 2021). Se espera que la frecuencia, intensidad y duración de estos estreses aumente debido a los efectos progresivos del cambio climático (Dolferus, 2014). Una mayor comprensión de la fisiología de la tolerancia al estrés puede proporcionar una plataforma útil para mejorar las variedades de arroz tolerantes al estrés (Singh et al., 2015).

El cultivo del arroz con frecuencia se expone a la escasez de luz en las distintas fases de desarrollo (Yamori et al., 2015); por lo que el clima continuamente nublado o continuas precipitaciones, especialmente durante la fase de maduración, inducen una pérdida significativa de rendimiento (Liu, Wu, Chen, Ma, & Gao, 2014). Así mismo, es sensible al estrés por altas temperaturas nocturnas (Impa et al., 2021). Durante la fase vegetativa se observan síntomas como punta blanca de la hoja, las bandas cloróticas, una reducción del macollamiento y una disminución de la altura de la planta, en la etapa de maduración se reduce el número de granos llenos por panícula (Yoshida, 1981). La esterilidad de las espiguillas inducida por alta temperatura, se relaciona con disminución de la dehiscencia de la antera, menor dispersión del polen, reducida germinación de los granos de polen sobre el estigma y disminución de la elongación del tubo polínico (Prasad et al., 2006).

El arroz es particularmente sensible al estrés por sequía e incluso un estrés por sequía leve puede resultar en una reducción significativa del rendimiento de grano (Guan et al., 2010), el cual puede reducirse drásticamente si se produce estrés por sequía durante la floración (Haider et al., 2012). Investigadores de todo el mundo han realizado grandes esfuerzos para comprender los mecanismos de respuesta al estrés abiótico en el arroz (Singh et al., 2015). La mejora en la tolerancia

combinada a varios tipos de estrés abiótico aumentaría sustancialmente la productividad del arroz (Raza et al., 2019).

Durante el desarrollo de la pasantía, se caracterizaron variedades e híbridos de arroz bajo condiciones de estrés por baja radiación, sequía y altas temperaturas nocturnas. Se realizaron diferentes actividades para el logro de este objetivo; éstas consistieron en labores de campo relacionadas con la siembra y trasplante, seguimiento y registro de datos fenológicos, medición de variables fenotípicas, cosecha de panículas y plantas para la determinación de rendimiento; al igual se realizaron actividades en el laboratorio como desgrane de panículas, separación y conteo, componentes de rendimiento y finalmente se realizó la digitalización de los datos obtenidos, con estos ensayos se analizó el comportamiento de cada una de las variedades e híbridos y la relación de un escenario de altas temperaturas nocturnas, sequía y baja radiación con el rendimiento. Cada una de estas actividades estaba bajo la supervisión de personal calificado del programa de arroz del CIAT, asesorando cada una de ellas para una mejor ejecución de las mismas.

1. ALIANZA DE BIOVERSITY INTERNATIONAL Y EL CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL (CIAT)

El CIAT fue fundado en 1967 y tiene su sede en Palmira, departamento del Valle del Cauca, Colombia. Desde esta sede trabaja proyectos para Colombia y otros países de América Latina, África y Asia. En la actualidad, más de la mitad del personal del centro está asignado a oficinas regionales alrededor del mundo (Lynam & Byerlee, 2017). Durante los últimos 50 años, los científicos del CIAT han partido de los saberes de los agricultores ancestrales para liberar el potencial de la genética de las plantas para desarrollar cultivos mejorados, identificando cultivos con cualidades deseadas tales como mejores características nutricionales o mayor tolerancia a la sequía, los mejoradores desarrollan variedades de fríjol, arroz, yuca y forrajes que son más sanas, resilientes y capaces de producir mayores rendimientos (Bioversity International & CIAT, 2021).

En 1996 en CIAT modificó su esquema organizativo tradicional, implementando un sistema basado en 14 proyectos; desarrollaron nuevas formas de coparticipación en la investigación con los sistemas nacionales de investigación agrícola, con universidades, organizaciones no gubernamentales y otras entidades de investigación de los sectores público y privado. Iniciando el año 2000 se amplió la agenda de investigación hacia cultivos de alto valor, como las frutas tropicales, y se le dio especial importancia a incentivar la innovación rural, trabajar en la diversidad biológica agrícola para hacer que la agricultura en pequeña escala fuera más competitiva, y proteger los suelos (Lynam & Byerlee, 2017).

Los desafíos globales actuales de pobreza, desnutrición, cambio climático, degradación del suelo y la pérdida de biodiversidad exigen nuevas investigaciones, soluciones, innovaciones y asociaciones más sólidas que puedan generar un mayor impacto. Para responder a estos desafíos y aprovechando sus mandatos complementarios y una larga colaboración, Bioversity International y el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) decidieron en el año 2018 unir

fuerzas para crear una alianza, que permita brindar soluciones científicas aprovechando la biodiversidad agrícola y transformando los sistemas alimentarios de manera sostenible para mejorar la vida de las personas (Bioversity international & CIAT, 2018).

1.1 MISIÓN

Brindar soluciones científicas que aprovechen la biodiversidad agrícola y transformen los sistemas alimentarios de manera sostenible para mejorar la vida de las personas en medio de una crisis climática (Bioversity International & CIAT, 2019).

1.2 VISIÓN

Sistemas alimentarios y paisajes que sostienen el planeta, impulsan la prosperidad y nutren a las personas (Bioversity International & CIAT, 2019).

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Adquirir conocimientos y destrezas relacionados a la caracterización de variedades e híbridos de arroz bajo diferentes condiciones de estrés abiótico.

2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Realizar y coordinar el procesamiento de muestras para la determinación de componentes de rendimiento en Laboratorio de Fisiología de arroz de CIAT.
- Coordinar experimentos a partir de protocolos establecidos, el manejo agronómico, tratamientos, mediciones fenotípicas, muestreo y cosecha en el invernadero High Tunnel Móvil de altas temperaturas y en el Rainout Shelter para sequía.
- Apoyar la digitación, revisión y consolidación de bases de datos fenotípicos a partir de estadística descriptiva derivadas de las evaluaciones realizadas en los experimentos en CIAT.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 IMPORTANCIA ECONOMICA

El cultivo del arroz, *Oryza sativa* L., comenzó hace casi 10.000 años, en muchas regiones húmedas de Asia tropical y subtropical (Acevedo et al., 2006). Este cultivo es el alimento básico para más de la mitad de la población mundial; se cultiva en más de 100 países y el 90 % de la producción mundial total proviene de Asia (Fukagawa & Ziska, 2019). Para el año 2019 en Colombia se cultivaron 561.073 hectáreas, con una producción de 2.564.250 toneladas y un rendimiento promedio de 4.90 t ha⁻¹ (FEDEARROZ, 2020).

3.2 DIVERSIDAD GENÉTICA DEL ARROZ

El arroz (*Oryza sativa* L), es una planta monocotiledónea anual, de origen asiático, perteneciente a la familia Poaceae y al género *Oryza*, de reproducción autógama, diploide con $2n = 24$ cromosomas. El género *Oryza*, tiene más de 24 especies silvestres que crecen en regiones inundadas, semi-sombreadas y bosques en sureste de Asia, África, Sur y Centro América. De las especies cultivadas, *O. sativa* es la de mayor importancia económica (Acevedo et al., 2006).

La especie *O. sativa* presenta mayor diversidad genética encontrándose hasta tres subespecies, las cuales son clasificadas basada en su ecología y morfología en: indica, japónica y javánica (Acevedo et al., 2006). Geográficamente, el arroz indica se encuentra comúnmente sembrado en regiones tropicales y subtropicales, las variedades japónica se restringen más a regiones templadas (Vaughan et al., 2008), mientras que la javánica se cultiva en Indonesia, siendo también conocida como japónica tropical (Acevedo et al., 2006). Aunque ampliamente cultivada bajo diferentes condiciones ambientales alrededor del mundo, las variedades indica y

japónica se adaptan a diferentes áreas de siembra en el que se desarrollan de manera óptima en términos de rendimiento (Xiong et al., 2011). El arroz indica representa más del 70% de la producción de arroz en todo el mundo y es genéticamente mucho más diverso (Zhang et al., 2016).

Al estar adaptadas a diferentes ambientes, las variedades indica y japónica han desarrollado diversas características morfológicas, agronómicas, fisiológicas y bioquímicas (Lu et al., 2009) que proporcionan valiosos recursos genéticos para el mejoramiento de alto rendimiento de arroz (Khush, 2001; Shaobing Peng et al., 2004). Las variedades indicas se caracterizan por tener hojas de color verde claro, amplias a estrechas, granos largos a cortos, delgados y algo planos, alto capacidad de macollamiento, porte alto a intermedio, con sensibilidad al fotoperiodo variable, glumas en su mayoría sin arista, con pelos cortos y delgados. Sin embargo, la utilización eficaz de esos recursos depende de la diferenciación genética y patrones de distribución geográfica de las variedades y las bases subyacentes de dichos patrones (Vaughan et al., 2008).

3.3 CRECIMIENTO Y DESARROLLO DE LA PLANTA DE ARROZ

3.3.1 Fase vegetativa se extiende desde la germinación hasta la iniciación del primordio de la panícula (Yoshida, 1981). La fase de crecimiento vegetativo se caracteriza por macollamiento activo, un aumento gradual en la altura de la planta y emergencia de hojas a intervalos regulares (Moldenhauer et al., 2013), incremento en la longitud y peso de la raíz, materia seca de tallos más hojas, y el índice de área foliar (Fageria, 2007). Después del establecimiento inicial, la planta comienza a desarrollar su estructura foliar, formando una hoja en cada nudo, de forma alterna en el tallo. Durante las primeras cuatro a cinco semanas de desarrollo, todas las hojas ya están formadas; el número total de hojas por planta varía con la variedad y la época de siembra (Counce et al., 2000).

Cuando la cuarta hoja del tallo principal esta con el cuello formado, que corresponde aproximadamente tres a cuatro semanas después de la emergencia, la planta de arroz comienza a emitir macollas, que surgen de los nudos del tallo de forma alterna; esta capacidad de macollamiento hace que el arroz tenga una respuesta elástica a las densidades de siembra, logrando compensar las bajas poblaciones de plantas con mayor número de macollos emitidos por planta (Counce et al., 2000). La capacidad de macollamiento depende de la variedad, la densidad de siembra, la temperatura del suelo, la disponibilidad de nitrógeno en del suelo y la altura de la lámina del agua de riego. La duración de la fase de macollamiento es de tres a cuatro semanas (Counce et al., 2000). La variación en el ciclo de crecimiento de un genotipo se debe principalmente a la duración de esta fase; en condiciones ambientales favorables, la fase de crecimiento en arroz abarca aproximadamente la mitad de la duración total del crecimiento en los trópicos (Fageria, 2007).

3.3.2 Fase reproductiva. Inicia con la diferenciación del primordio de la panícula y se extiende hasta la floración (Yoshida, 1981). Esta fase se caracteriza por formación del tamaño de la panícula o número de espiguillas, la elongación del tallo, disminución en el número de macollas, emergencia de hojas bandera (última hoja), embuchamiento, emergencia de la panícula y floración (Fageria, 2007). La elongación de entrenudos generalmente inicia alrededor del inicio del primordio de la panícula; después de la floración, la suma de las longitudes de los entrenudos elongados determina en gran parte la altura de la planta (Yoshida, 1981).

La iniciación del primordio de la panícula comienza unos 30 días antes de la floración; el crecimiento y desarrollo de la panícula inicia con la diferenciación del primordio (Yoshida, 1981), formación de las ramificaciones, flores, microsporogénesis y megasporogénesis (Counce et al., 2000) y finaliza cuando el polen ha madurado completamente. Cerca de 6 días antes de la floración, la vaina de la hoja bandera de la hoja se engrosa, indicando que la panícula ha completado su desarrollo. La elongación del segundo entrenudo de la parte

superior se completa 1 o 2 días antes de la floración; seguidamente el entrenudo superior se alarga rápidamente y empuja hacia arriba la panícula. Como consecuencia, se produce la exorción de la panícula de la vaina de la hoja bandera (Yoshida, 1981). Condiciones ambientales adversas tales como la deficiencia de nitrógeno, sequía, baja radiación solar, baja o alta temperatura, y enfermedades pueden reducir el tamaño de la panícula y, por tanto, el rendimiento (Fageria, 2007).

La antesis (o floración) comienza con la exorción de la panícula o al día siguiente. Las espiguillas en las ramificaciones superiores presentan antesis antes que las de las ramificaciones más bajas, dentro de una ramificación, la espiguilla del ápice florece primero. Se tarda entre 7-10 días para todas las espiguillas en la misma panícula completen la antesis, la mayoría de las espiguillas completan la antesis dentro de 5 días (Yoshida, 1981).

3.3.3 Fase de madurez. La fase de maduración en el arroz se extiende desde la floración hasta la madurez fisiológica. El período de maduración se caracteriza por el crecimiento del grano, aumento de peso y tamaño, cambios en el color del grano, y la senescencia de las hojas (Yoshida, 1981). El peso seco del cariósipide se incrementa rápidamente hasta 15 a 20 días después de la floración en los trópicos y de 25 a 30 da después de la floración en condiciones templadas (Fageria, 2007). En las primeras etapas de la maduración, los granos son de color verde, que se vuelven amarillos a medida que maduran. La textura de los granos cambia de un estado lechoso, semifluida a un sólido duro. Sobre la base de estos cambios el período de maduración se subdivide en lechoso, pastoso, amarillo maduro y estado de madurez. Estos términos se basan principalmente en la textura y el color de los granos en crecimiento. Antes de la floración, una considerable cantidad de almidón y azúcar se acumula en los tallos y vainas de las hojas; estos carbohidratos acumulados son trastocados a las espiguillas durante la maduración (Yoshida, 1981).

Durante el crecimiento activo del grano, el peso fresco y seco del grano aumenta; hacia la madurez, sin embargo, el peso seco aumenta lentamente pero el peso fresco disminuye del 58% al 20% (Yoshida, 1981). Las cinco hojas superiores proporcionan asimilados a la panícula, siendo la hoja bandera el principal proveedor; estas hojas superiores tienen la mayor vida útil fisiológica de la planta. En algunos cultivares, permanecen verdes durante toda la fase de maduración (Moldenhauer & Gibbons, 2003). Se considera que el grano alcanza la madurez fisiológica, cuando posee la máxima acumulación de materia seca (Counce et al., 2000).

En el período entre la madurez fisiológica y la maduración de cosecha, los granos pasan por un proceso físico de la pérdida de humedad; su duración puede variar de una a dos semanas, dependiendo de las condiciones climáticas ofertadas. Las altas temperaturas del aire y humedad relativa baja, asociadas con la ocurrencia de vientos, acelera el ritmo de pérdida de humedad en los granos (Counce et al., 2000). Algunos factores ambientales adversos como la sequía, baja radiación solar, la deficiencia de nitrógeno, bajas o altas temperaturas, y enfermedades de la panícula pueden aumentar la esterilidad de la espiguilla y en consecuencia disminuyendo el rendimiento de grano (Fageria, 2007).

3.4 RENDIMIENTO Y SUS COMPONENTES EN EL CULTIVO DE ARROZ

En la producción de arroz, la variable más importante es el rendimiento en granos, por esta razón los investigadores están constantemente realizando ensayos para buscar variedades que cada vez sean mejores que las que ya se tienen (Acevedo et al., 2006). El rendimiento en granos resulta de procesos de desarrollo sincronizados con el crecimiento de la planta. La división del rendimiento en cuatro componentes refleja la interdependencia del rendimiento con el desarrollo secuencial de la planta; los potenciales de rendimiento se alcanzan cuando todos los componentes están optimizados (Moldenhauer & Gibbons, 2003). El análisis

de estos componentes ayuda no solo a identificar cuales limitan el rendimiento sino también a sugerir formas de aumentarlo (Moldenhauer & Gibbons, 2003).

El rendimiento máximo es predeterminado por el potencial de una variedad, su ambiente (Chaudhary et al., 2003), suplemento de nutrientes y manejo del cultivo (Dobermann & Fairhurst, 2000); el rendimiento de grano es el producto final de una combinación de diferentes componentes de rendimiento (Sharma & Singh, 1999), cada componente de rendimiento de una variedad es determinado en una etapa particular de la vida de la planta (Chaudhary et al., 2003). Así, el número de panículas por metro cuadrado se determina durante la fase vegetativa, el número de espiguillas por panícula durante la fase reproductiva, y el porcentaje de fertilidad y el peso de 1000 granos durante la fase de maduración (CIAT, 1986). El número de panículas por metro cuadrado, el número de espiguillas por panícula y el porcentaje de fertilidad son interdependientes y, por lo tanto, estos componentes no pueden ser aumentados independientemente de los otros (Chaudhary et al., 2003).

3.4.1 Número de panículas por metro cuadrado. El número de panícula es determinado aproximadamente 10 días después de la etapa máximo macollamiento y es enormemente influenciado por el suministro de nitrógeno y la radiación solar (Murata & Matsushima, 1978; Murty, 1977), es función del vigor de las plantas, el macollamiento, la densidad de siembra, la fertilidad del suelo y la profundidad de la lámina de agua (Moldenhauer & Gibbons, 2003). En arroz trasplantado, el comportamiento de los macollas determina el número final de panículas, mientras que en arroz sembrado directamente, este componente depende considerablemente en la cantidad de semilla utilizada y en el porcentaje de plantas emergidas (Dobermann & Fairhurst, 2000). El efecto del ambiente en el número de panículas es más notorio durante los primeros 20 a 25 días después del trasplante, o 15 a 40 días después de la siembra directa; durante este periodo de la fase vegetativa, la planta produce macollas activamente; las macollas que se forman durante los 20 a 25 días después del trasplante producen panículas más

grandes y más pesadas que las producidas por macollas que se forman cerca del estado de máximo macollamiento: las macollas tardías son sombreadas e interferidas en la toma de nutrientes por las macollas tempranas, y tienden a morir o no son productivas (CIAT, 1986).

3.4.2 Número de espiguilla por panícula. El número de espiguillas por panícula potenciales se forman durante la diferenciación de la panícula (fase reproductiva) (Moldenhauer & Gibbons, 2003), durante el período de 32 a 5 días antes de la exersión de la panícula en regiones templadas y sobre 10 días en regiones tropicales (Murata & Matsushima, 1978). Es la diferencia entre el número de primordios que se han diferenciado y el número de aquellos que se han degenerado (Dobermann & Fairhurst, 2000; Sharma & Singh, 1999), siendo el primero fuertemente influenciado por el suministro de nitrógeno durante la diferenciación de la panícula y este último por la cantidad de radiación solar y otros factores ambientales alrededor la etapa de división meiótica (Sharma & Singh, 1999); el número de espiguillas por panícula disminuye si las ramificaciones secundarias no se forman, o si se forman y posteriormente degeneran (CIAT, 1986).

3.4.3 Porcentaje de fertilidad. El porcentaje de fertilidad se determina antes, durante y después de la floración (Chaudhary et al., 2003). El desarrollo de la espiguilla es sensible a los factores ambientales; cualquier fallo en el desarrollo o la polinización impide el llenado de grano (Moldenhauer & Gibbons, 2003). Factores como: clima desfavorable durante el proceso de antesis, plagas o deficiencias de nutrientes pueden causar la esterilidad de las espiguillas y reducir el llenado de grano (Dobermann & Fairhurst, 2000). La cantidad de espiguillas vacías determina el porcentaje de espiguillas llenas. Después de la antesis y la fecundación de la ovocélula, el almidón comienza a acumularse en las espiguillas, iniciándose así el llenado del grano. Dependiendo de las condiciones ambientales, en la fase de maduración las espiguillas pueden convertirse en: espiguillas

estériles (aquellas en las cuales no hubo fecundación), espiguillas no llenas (cuando hubo fertilización, pero los espiguillas no alcanzaron su desarrollo completo) o espiguillas llenas (los que lograron su máximo desarrollo) (CIAT, 1986).

3.4.4 Peso de 1000 gramos. El peso de los granos llenos se define en la fase de maduración, es una característica varietal determinada en gran parte por el tamaño de las glumas (Chaudhary et al., 2003; CIAT, 1986; Dobermann & Fairhurst, 2000). Es expresado generalmente en términos de peso en gramos de 1000 granos (Fageria, 2007). El tamaño de las glumas se decide dos semanas antes, y la del grano tres semanas después de la antesis; no hay mucha variación en el tamaño de los granos de arroz porque están firmemente encerrados por las glumas y no pueden crecer a un tamaño mayor (Murata & Matsushima, 1978). El peso de los granos llenos se determina por el metabolismo y la partición de los carbohidratos y puede reducirse por fallos metabólicos (Moldenhauer & Gibbons, 2003). Si la translocación del almidón es normal, el grano alcanza su máximo desarrollo; las espiguillas acumulan el almidón más rápidamente durante los primeros 20 días después de la floración; así mismo, los granos de la parte superior de la panícula y de cada ramificación del raquis, se llenan primero que aquellos que se encuentran en la parte inferior (CIAT, 1986). El número de panículas por m², el número de espiguillas por panícula y el peso de granos se considera como el tamaño del sumidero o la capacidad de rendimiento (Sharma & Singh, 1999).

3.5 ESTRÉS ABIOTICO

En la agricultura, las tensiones bióticas y abióticas provocan importantes pérdidas de rendimiento, por lo que la mejora de la tolerancia al estrés de las plantas de cultivo es un objetivo principal de la investigación (Zuluaga et al., 2020).

3.5.1 Estrés por sequía. El estrés por sequía induce diversos cambios fisiológicos y bioquímicos en el arroz en diferentes etapas de desarrollo; su impacto también depende de las etapas de crecimiento, siendo la mitad del macollamiento, la floración y el inicio de la panícula las etapas más sensibles (Kim et al., 2020). En el cultivo de secano, el arroz es uno de los cultivos más susceptibles a la sequía debido a su pequeño sistema de raíces, cera cuticular fina y cierre rápido de estomas (Zuluaga et al., 2020).

El estrés por sequía durante el crecimiento vegetativo, la floración y el período terminal del cultivo de arroz puede interrumpir la iniciación de la flor (lo que provoca la esterilidad de las espiguillas) y el llenado del grano, respectivamente. Por lo general, el estrés hídrico en el proceso de llenado del grano induce una senescencia temprana y acorta el período de llenado del grano, pero aumenta la re movilización de asimilados (están reservados en los tallos y las vainas del arroz y contribuyen del 10 al 40 % del peso final del grano) (Mostajeran & Rahimi-Eichi, 2009). Existen tres mecanismos principales que reducen el rendimiento de los cultivos por déficit de agua del suelo: reducción de la absorción del dosel de la radiación fotosintéticamente activa, disminución de la eficiencia del uso de la radiación y reducción del índice de cosecha (Farooq et al., 2009).

3.5.2 Estrés por altas temperaturas. Los efectos fisiológicos informados bajo altas temperaturas nocturnas durante el llenado de granos resulta en un aumento de la respiración lo que provoca que la planta consuma más hidratos de carbono; esto reduce la eficiencia de la fotosíntesis durante el día, disminuye la translocación de nitrógeno y carbohidratos después de la floración como una posible causa de la reducción del rendimiento en cultivares sensibles a altas temperaturas nocturnas (Moldenhauer et al., 2013). Reduce el contenido de almidón en panículas y afecta negativamente el rendimiento y la calidad del grano (contenido de tiza y amilosa) en los cultivares sensibles Gharib e IR64, pero no en el cultivar tolerante N22 (Moldenhauer et al., 2013). Estudios de campo en el Instituto Internacional de Investigación del Arroz (IRRI) en Filipinas mostró que el

rendimiento del grano de arroz se redujo en un 10% por cada 1 °C de aumento de las temperaturas nocturnas durante la estación seca, mientras que el efecto del aumento de las temperaturas diurnas no fue significativo dentro del período de tiempo investigado (Schaarschmidt et al., 2020).

3.5.3 Estrés por baja radiación. El aumento de la producción de cultivos de arroz está estrechamente relacionado con la intensidad de la radiación solar captada por plantas y la acumulación de biomasa definida como eficiencia de conversión de energía solar (Suryanto et al., 2018). El clima continuamente nublado o continuas precipitaciones, especialmente durante la fase de maduración, inducen pérdida significativa de rendimiento y da como resultado la mala calidad del grano (Liu, Wu, Chen, Ma, & Gao, 2014). Numerosos datos experimentales e informes relacionados han confirmado que la baja radiación afecta notablemente las características agronómicas y fisiológicas de la planta de arroz, lo que dificulta el metabolismo fisiológico subyacente, que incluye la fotosíntesis, respiración, característica antioxidantes, así como la conversión y distribución de carbono y nitrógeno (Ren et al., 2002; Zhu et al., 2008). Tales cambios eventualmente resultan en la disminución del rendimiento, con una pobre producción de macollas, deteriorada capacidad para diferenciar panículas, proceso anormal en el llenado de grano, y variabilidad en la actividad de las enzimas que controla la síntesis de almidón en el grano (Li et al., 2006; Nakano, 2000; Ren, Yang, Fan, et al., 2003).

3.6 HÍBRIDOS DE ARROZ

Un híbrido es la primera generación de descendientes (F1) de un cruzamiento en arroz entre dos padres genéticamente distintos. Para la producción de esta semilla híbrida se requiere una línea A (androesteril) que será la madre, una línea R (restauradora de la fertilidad) que se comportará como padre en la combinación, permitiendo obtener la semilla híbrida para su uso como cultivar. Sin embargo,

para la multiplicación de la línea androestéril se hace necesaria la utilización de una línea B (mantenedora de la androesterilidad), que permita al programa de multiplicación de híbridos, contar constantemente con el parental femenino (FEDEARROZ, 2021).

El uso de híbridos es una alternativa genética que procura incrementar el potencial de rendimiento del arroz, en un 15% por encima de las mejores variedades actualmente cultivadas, explotando el vigor híbrido o heterosis (FEDEARROZ, 2021). El híbrido del arroz fue desarrollado en la China en 1976, por el investigador Luang Long Ping, conocido como el padre del arroz híbrido, él ha desarrollado materiales con potencial de producción de 17 toneladas por hectárea (Álvarez et al., 2008). Esta tecnología de híbridos se ha diseminado por países asiáticos, principalmente en China y la India, así como en los Estados Unidos y parte de Suramérica, entre otras regiones del mundo (FLAR, 2021). FEDEARROZ como socio del consorcio del HIAAL, incursiona en la producción de semilla del híbrido FEDEARROZ H57 a escala comercial; este proceso se llevó a cabo en el Centro Experimental Piedra Pintada (Aipe – Huila) (FEDEARROZ, 2021). La tecnología de arroz híbrido además de aportar a la satisfacción de la seguridad alimentaria de China y el mercado de arroz a nivel mundial, tiene varios impactos positivos: en primer lugar, previene un incremento de los precios globales de arroz y como consecuencia, los consumidores con menores ingresos pueden seguir adquiriendo este producto básico para la alimentación humana (FEDEARROZ, 2021). Según (FLAR, 2021) la semilla híbrida es más uniforme, les brinda a los agricultores mejores rendimientos y mayores ganancias, así como también permite el desarrollo del mercado de semillas y una mayor tasa de recuperación de la inversión en investigación y desarrollo. Además, el cultivo de arroz híbrido crea nuevas oportunidades de empleo rural debido a que requiere semilla F1 para cada ciclo de cultivo (FEDEARROZ, 2021). HIAAL y sus socios realizan diferentes ensayos para probar si estos híbridos presentan adaptabilidad a los diferentes escenarios ambientales.

4. ACTIVIDADES DESARROLLADAS

La pasantía realizada en el programa de arroz de la Alianza Bioersity International y el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) ubicado en Palmira Valle del Cauca, tuvo como título: “*Caracterización de variedades e híbridos de arroz bajo condiciones controladas para tolerancia a altas temperaturas y sequía*”. El desarrollo de ésta contempló tres actividades principales; la primera, consistió en la evaluación de los componentes del rendimiento en tres genotipos de arroz; en la segunda se evaluó la tolerancia de variedades de arroz a altas temperaturas nocturnas en el invernadero High Tunnel Móvil, y en la tercera se evaluó la tolerancia de variedades e híbridos de arroz a la sequía en el Rainout Shelter. En cada una de estas actividades se efectuaron diferentes tareas para el logro de los objetivos propuestos.

4.1 EVALUACIÓN DE COMPONENTES DEL RENDIMIENTO EN TRES GENOTIPOS DE ARROZ

4.1.1 Sitio experimental y material genético. La actividad se realizó en el Laboratorio de Fisiología de arroz del CIAT durante el período de marzo a abril del año 2021. En esta, se determinaron los componentes de rendimiento para 35 genotipos que fueron evaluados previamente en condiciones de baja radiación en fase de llenado de grano. Para términos de la pasantía se presentan los resultados de los genotipos: Fedearroz 50 (variedad susceptible a la baja radiación), CT21735 (línea elite de CIAT) y Fedearroz 67 (variedad ampliamente cultivada en la actualidad en Colombia).

4.1.2 Muestreos y mediciones. Para la determinación de los componentes de rendimiento, se evaluaron tres plantas por parcela del experimento de baja

radiación realizado en el CIAT, las panículas de estas plantas fueron sometidas a secado al horno (Memmert Universal Oven UF 750, Memmert GmbH+Co.KG, Germany) a una temperatura de 65 °C por 48 horas, para evitar la proliferación de hongos (Figura 1).

Figura 1. Muestras en pre secado a 65°C por 72 horas.



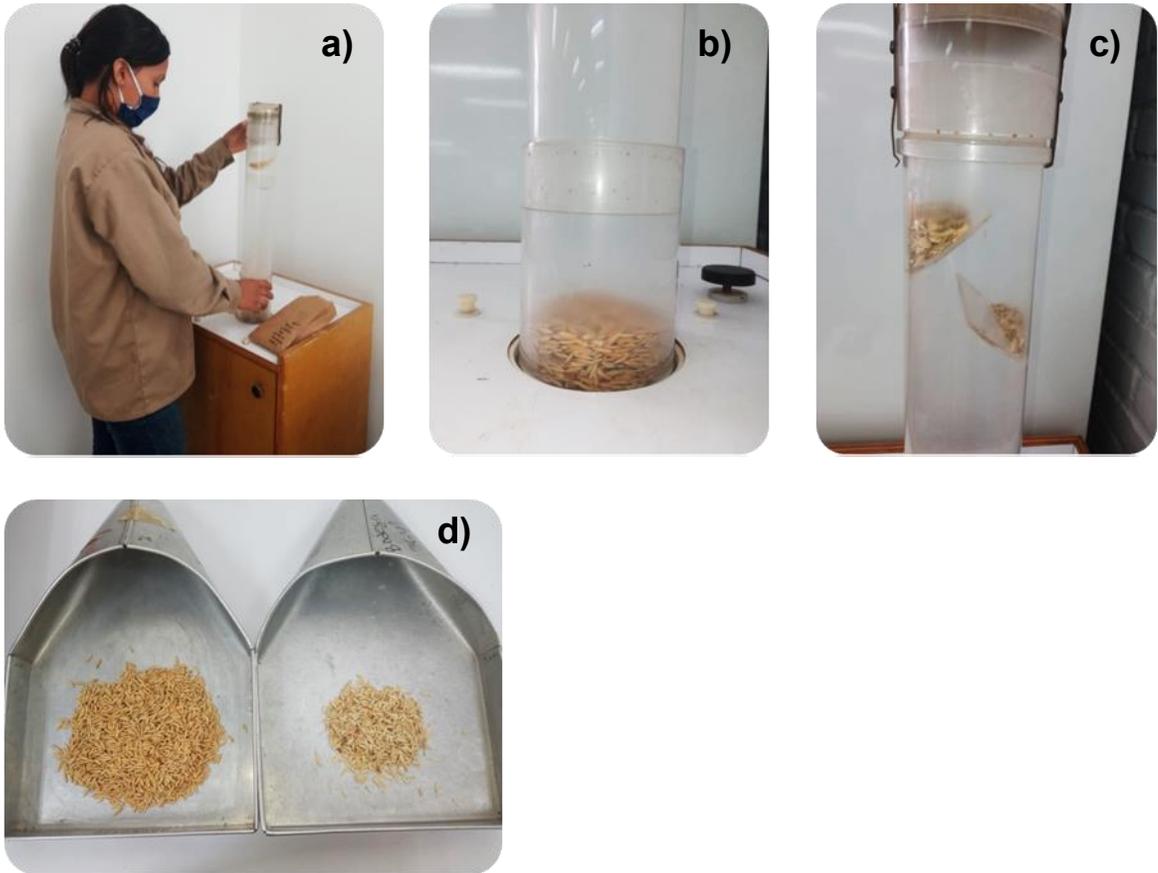
4.1.2.1 Desgrane. Después del secado, las panículas fueron contabilizadas y desgranadas manualmente en su totalidad, dejando las espiguillas completamente limpias y libres de raquis, pedicelo e impurezas (Figura 2).

Figura 2. Proceso de desgrane de panículas. a) muestra de panículas para desgranar. b) desgrane manual de panículas. c) espiguillas desgranadas separadas del raquis.



4.1.2.2 Separación. Una vez desgranadas las panículas, las espiguillas totales fueron separadas en llenas y vanas en una venteadora (South Dakota Seed Blower, Seedburo, Chicago, IL, USA) (Figura 3), con flujo de aire de 3450 R.P.M, por espacio de un minuto y una apertura de la rejilla de 5.5 cm. Se eliminaron todas las impurezas y residuos de raquis para garantizar la pureza de la muestra.

Figura 3. Proceso de separación de espiguillas. a) inicio del proceso en la venteadora. b) espiguillas llenas separadas en el fondo del tubo. c) espiguillas vanas e impurezas separadas en las pestañas del tubo. d) espiguillas llenas y vanas separadas.



4.1.2.3 Pesado y conteo. Finalizada la separación, las espiguillas llenas y vanas, fueron llevadas al horno a una temperatura de 65 °C por 72 horas. Seguidamente, se tomó el peso total de las espiguillas llenas y vanas; de cada una de ellas, se obtuvo una submuestra de 10 y 3 gramos respectivamente. Cada submuestra fue contabilizada en una contadora (801 Count-A-Pak® Seed Counters, Seedburo, Chicago, IL, USA) (Figura 4).

Figura 4. Proceso de pesado y conteo de espiguillas. a) pesado de muestra de espiguillas llenas. b) configuración de parámetros en la contadora. c) conteo de las muestras.



4.1.2.4 Digitalización de datos y obtención de componentes de rendimiento. Con los datos del pesado y conteo de las submuestras de espiguillas llenas y vanas, se determinó el rendimiento por m² y los componentes de rendimiento: número de panículas por m² (Ecuación 2), número de espiguillas por panícula (Ecuación 3), porcentaje de fertilidad (Ecuación 4) y peso de 1000 granos (Ecuación 5), estos datos fueron registrados para su posterior análisis estadístico.

Ecuación 1. Rendimiento g/m²

$$\text{RTO g/ m}^2 = \text{Peso de grano (g/m}^2) \times \frac{(100 - \text{humedad de cosecha (\%)})}{(100 - \text{humedad final (\%)})}$$

Ecuación 2. Número de panículas por metro cuadrado

$$\text{NPXM}^2 = \frac{1 \text{ m}^2 \times \text{Número de panículas en área cosechada (n)}}{\text{Área cosechada (m}^2)}$$

Ecuación 3. Número de espiguillas por panícula

$$\mathbf{NEXPAN} = \frac{\text{Número de espiguillas totales (n)}}{\text{Número de panículas de la submuestra (n)}}$$

Ecuación 4. Porcentaje de fertilidad

$$\mathbf{PFERT} = \frac{\text{Número de espiguillas llenas (n)}}{\text{Número de espiguillas totales (n)}} \times 100$$

Ecuación 5. Peso de 1000 granos

$$\mathbf{P1000G} = \frac{\text{Peso de espiguillas llenas (g)}}{\text{Número de espiguillas llenas (n)}} \times 1000$$

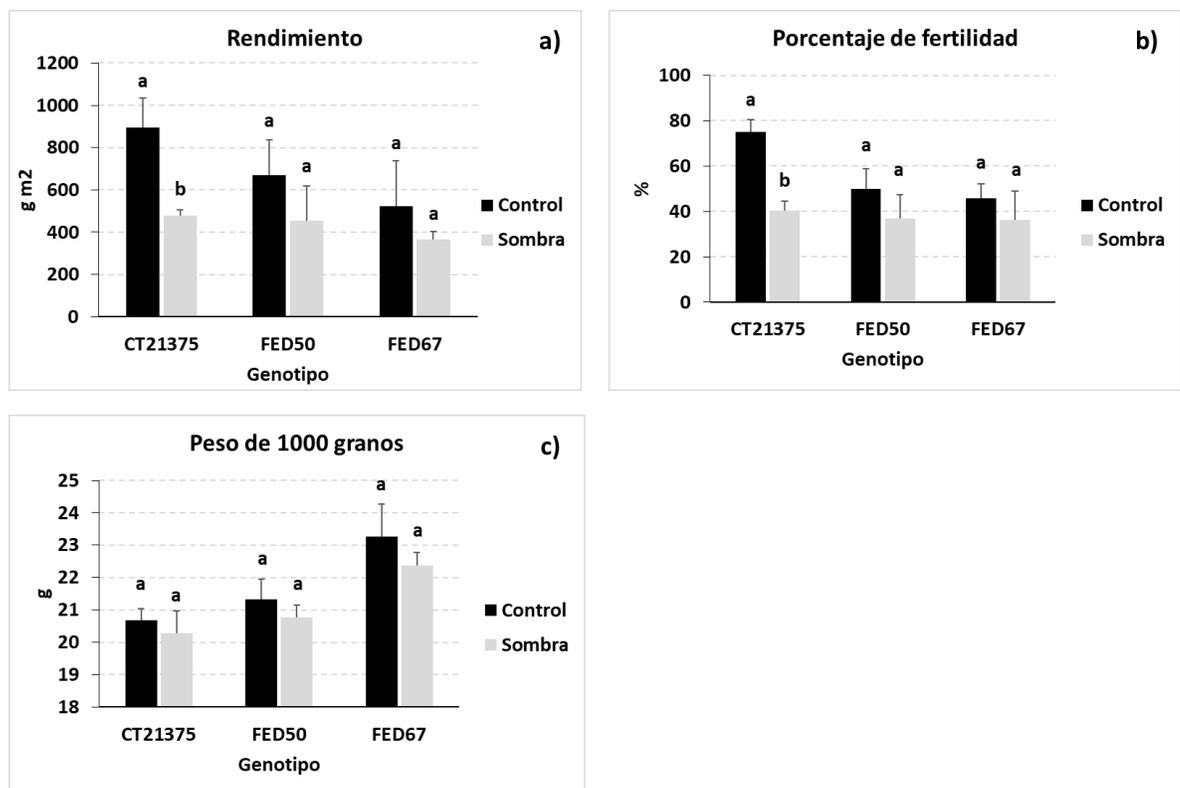
4.1.3 Análisis estadístico. Los datos de rendimiento y sus componentes fueron sometidos a análisis de varianza, y las medias dentro y entre tratamientos fueron comparadas por la prueba de rango múltiple de Tukey al 5% de probabilidad de error, utilizando el software estadístico R (R, versión 4.1.0).

4.1.4 Resultados y análisis. La Tabla 1 muestra Los valores medios, máximos, mínimos y efectos del rendimiento y sus componentes para los tres genotipos evaluados. El análisis de varianza mostró que para el genotipo se presentó efecto significativo ($p < 0,05$) para las variables evaluadas (excepto para peso de 1000 granos); lo que sugiere que los genotipos son contrastantes con respecto al rendimiento y sus componentes, debido a su constitución genética, reflejado en el potencial de rendimiento.

El tratamiento de sombra, comparado con el tratamiento de luz, presentó efecto significativo ($p < 0,05$) y redujo el rendimiento y los componentes definidos en la fase de llenado de grano porcentaje de fertilidad ($p < 0,01$) y peso de 1000 granos ($p < 0,01$) en un 37,7%, 33,5% y 2,80% respectivamente. Este efecto significativo sugiere que estas características fueron afectadas por la reducción del 50% de la radiación. Por el contrario, para el número de panículas por metro cuadrado y

Para el rendimiento y el peso de 1000 granos, no se observó interacción genotipo por tratamiento, lo que sugiere que los genotipos mostraron respuesta similar a las condiciones de baja radiación en fase de maduración. Este resultado coincide con los obtenidos por otros investigadores, que evaluando pocos genotipos en condiciones de baja radiación durante la fase de maduración no encontraron interacción genotipo por tratamiento en sus resultados (Chen, Li, Zeng, Deng, & Ren, 2019; Pan et al., 2016; Wang et al., 2015; Wei et al., 2018). Por su parte, sólo porcentaje de fertilidad presentó efecto significativo ($p < 0,05$) para el efecto genotipo por tratamiento, sugiriendo que al menos un genotipo presentó una respuesta diferencial a la baja radiación en fase de llenado de grano.

Figura 5. Efecto del tratamiento de sombra para las variedades Fedearroz 67, Fedearroz 50 y CT21375. a) rendimiento. b) porcentaje de fertilidad. c) peso de 100 granos.



Letras diferentes indica diferencia estadística significativa entre tratamientos para el mismo genotipo al $P < 0,05$ de significancia.

Entre los genotipos evaluados, solo CT21375 redujo significativamente el rendimiento y el porcentaje de fertilidad con 46,36% y 46,41% respectivamente (Figura 5a, Figura 5b), en comparación a la reducción del 32,22% y 25,95% de FED50 y el 30,25% y 20,64% de FED67, lo cual demuestra que CT21375 fue más susceptible a la reducción del 50% de radiación en fase de llenado de grano. Para el peso de 1000 granos no se observó diferencias del tratamiento de sombra para los tres genotipos (Figura 5c).

4.2 EVALUACIÓN PARA LA TOLERANCIA A ALTAS TEMPERATURAS NOCTURNAS EN EL INVERNADERO HIGH TUNNEL MÓVIL

4.2.1 Sitio experimental y material genético. Para caracterizar la tolerancia a altas temperaturas nocturnas, 11 genotipos de arroz fueron evaluados en el invernadero High Tunnel Móvil del CIAT durante el periodo comprendido entre enero y abril del 2021. Para fines del informe se presentarán los resultados para la variedad comercial Fedearroz 67 y los híbridos HL23035 - HL23057.

4.2.2 Diseño experimental y manejo agronómico. El experimento se estableció en un diseño de parcelas divididas con arreglo en bloques completos al azar con cinco repeticiones y dos tratamientos de temperatura (Control= temperatura ambiente nocturna y estrés= temperatura ambiente nocturna + 5°C). La parcela principal estuvo representada por el tratamiento de temperatura, y la subparcela por el genotipo. Cada unidad experimental tenía un área de 1,2 m², con 6 surcos por parcela y 5 plantas por surco. En este experimento se evaluaron 11 genotipos.

Para lograr que los genotipos tuvieran el estrés de temperatura en el mismo estado fenológico, se realizaron siembras y trasplantes escalonados para así lograr una sincronización en la floración. La siembra se realizó en bandejas de alveolos (una semilla por cada alveolo), y el trasplante se efectuó 25 días después de la emergencia a una distancia entre plantas y surcos de 0,20 m.

Figura 6. Siembra escalonada de los genotipos en campo.



La fertilización del experimento consistió en la aplicación de 200 kg ha^{-1} N como urea, 60 kg ha^{-1} de P_2O_5 como fosfato diamónico, 130 kg ha^{-1} K_2O como cloruro de potasio, $7,3 \text{ kg ha}^{-1}$ Zn como sulfato de zinc y 21 kg ha^{-1} Fe como sulfato ferroso heptahidratado. Estas cantidades de fertilizantes se fraccionaron en cuatro aplicaciones durante el ciclo de cultivo y se aplicaron en función del estado fenológico de cada genotipo (Tabla 2).

Tabla 2. Dosis y fraccionamiento de fertilizantes en el experimento.

Elemento	Dosis (kg h^{-1})	Trasplante	5 DDT	10 DDT	IP
N	200,0	-	20%	50%	30%
P_2O_5	60,0	100%	-	-	-
K_2O	130,0	50%	-	50%	-
Zn	7,3	100%	-	-	-
Fe	21,0	100%	-	-	-

DDT= días después de trasplante; IP= inicio de primordio

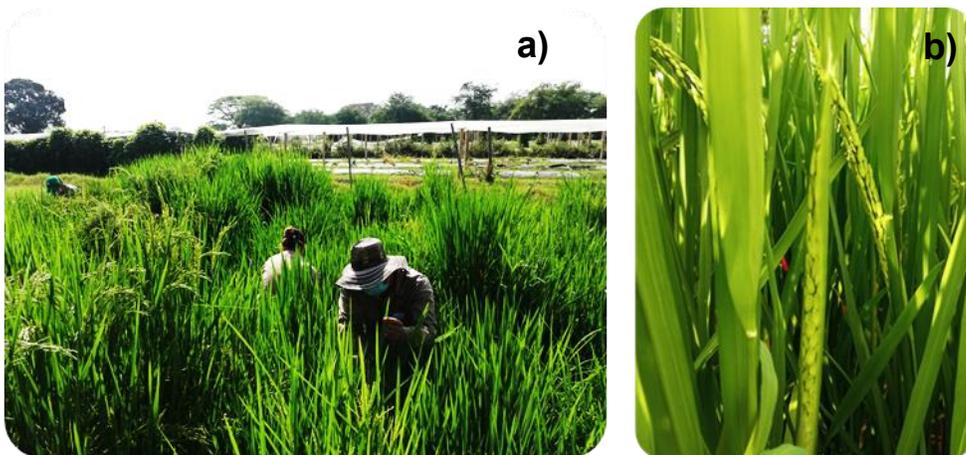
El manejo de malezas, plagas y enfermedades se efectuó de acuerdo con las recomendaciones técnicas para el cultivo en CIAT. El riego fue manejado por inundación, con una lámina permanente de 5 cm desde trasplante hasta diez días antes de la cosecha.

4.2.3 Muestreos y mediciones

4.2.3.1 Seguimiento y registro de datos fenológicos. Se registraron fechas de siembra, trasplante, floración y cosecha para cada genotipo.

4.2.3.2 Marcación de panículas. Al final de la fase reproductiva en cada parcela se seleccionaron dos plantas y en cada una de ellas se marcó un tallo que se encontrara con la hoja bandera emergida y en estado de embuchamiento.

Figura 7. Marcación de tallos en estado de embuchamiento. a) marcación de tallos. b) panícula en estado 8 de desarrollo.



4.2.3.3 Medición de contenidos de humedad. Para monitorear la humedad del suelo en ambos tratamientos, se realizaron dos lecturas semanales del tensiómetro (Irrometer, Riverside, California, USA) y AquaPro (AquaPro-Sensors, Reno, Nevada, USA). Las lecturas del AquaPro se hicieron a profundidades de

(10, 20, 40 y 60 cm); para el tensiómetro, se obtuvo una lectura a una profundidad de 60 cm.

4.2.4 Tratamiento de estrés. A partir de la marcación de las panículas se inició el tratamiento de altas temperaturas nocturnas; éste se llevó a cabo desde el estado de embuchamiento hasta la maduración del grano. El estrés consistió en aumentar la temperatura dentro del invernadero en 5°C por encima de la temperatura ambiente nocturna (Figura 8; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), utilizando una calefacción a gas (Modine PDP200AE0130SBAN Natural Gas Unit Heater), por un periodo de 12 horas (6:00 pm- 6:00 am). A las 6:00 am se programaba la apertura automática de las cortinas superiores del invernadero, con la finalidad de estabilizar la temperatura interna con la temperatura ambiente. Las variables climáticas (radiación solar (S-LIB-M003), temperatura (S-THB-M00x) y humedad relativa (S-THB-M00x)) se monitorearon dentro y fuera del invernadero, utilizando una estación meteorológica (HOBO U30 USB Weather Station Data Logger; Onset Computer Corporation, Bourne, Massachusetts, USA). El proceso consistió en desplazar el invernadero a través de los rieles desde su posición inicial hasta donde se encontraba ubicado el ensayo, seguidamente se conecta la manguera al punto del gas para encender la calefacción, una vez conectado el sistema al punto del gas, se hace la programación del cierre y apertura de las cortinas del invernadero, así mismo se programa la hora de encender y apagar la calefacción automáticamente (Figura 9).

Figura 8. Perfil de temperatura (a) y humedad relativa (b) al inicio del tratamiento de estrés de altas temperaturas nocturnas en el Invernadero High Tunnel Móvil.

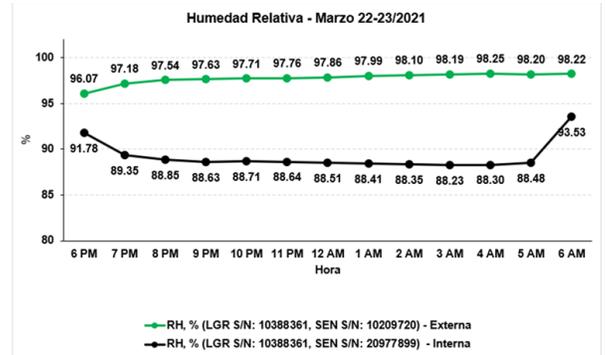
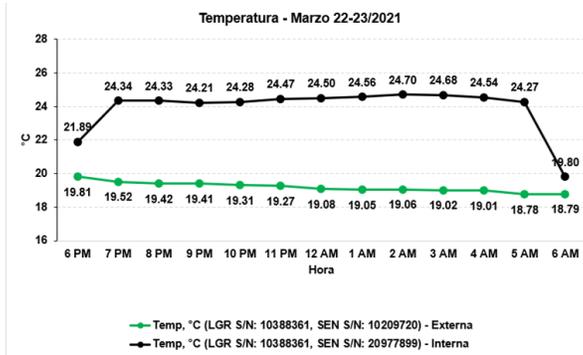


Figura 9. Invernadero High Tunnel Móvil. a) desplazamiento del invernadero. b) conexión al punto del gas. c) encendido de la calefacción. d) programación del cierre y apertura automática de las cortinas del invernadero. e) temporizador. f) vista del interior del invernadero. g) vista del exterior del invernadero.



4.2.5 Cosecha. Por causas del paro nacional que inicio el 28 de abril del año 2021, el tratamiento de estrés de altas temperaturas nocturnas no se finalizó como estaba programado. Adicionalmente, el retraso que se generó para realizar la cosecha ocasionó el desgrane de las panículas, lo que afectó finalmente la determinación del rendimiento y sus componentes. Por tal motivo, solo se presenta la parte metodológica del experimento.

4.3 EVALUACIÓN PARA LA TOLERANCIA A SEQUÍA EN EL RAINOUT SHELTER

4.3.1 Sitio experimental y material genético. Los experimentos de sequía para híbridos de arroz y variedades comerciales fueron realizados en el invernadero Rainout Shelter del CIAT durante los meses de junio y noviembre de 2021. En estos experimentos, se evaluó la respuesta de 11 genotipos al estrés por sequía. Para fines del informe se presentarán los resultados para la variedad comercial Fedearroz 67 y los híbridos HL23057 y HL23035 en el método de trasplante.

4.3.2 Diseño experimental y manejo agronómico. Se realizaron dos experimentos simultáneos bajo dos métodos de siembra (trasplante y siembra directa). Los experimentos se establecieron bajo un diseño de parcelas divididas en un arreglo de bloques completos al azar con tres repeticiones y dos tratamientos (control = riego y estrés = sequía) para cada método de siembra. La parcela principal estuvo representada por el tratamiento de riego y las subparcelas por el genotipo para cada método de siembra. Para el método de trasplante, el suelo fue fangueado; cada unidad experimental tenía un área de $5,6\text{m}^2$, con nueve surcos por parcela y 10 plantas por surco. Por su parte, para el método de siembra directa, cada unidad experimental tenía un área de $3,37\text{m}^2$, con seis surcos por parcela y nueve plantas por surco.

Figura 10. Distribución experimental de los tratamientos en campo para el método de trasplante.

R1		R2		R3		R1		R2		R3	
2,25 m				0,5 m							
1	Cent. F 67	24	HL26225	25	HL23021	48	Curinga	49	HL23035	72	HL26248
2	Curinga	23	HL26248	26	HL23057	47	HL26238	50	HL26248	71	Cent. F 67
3	ST603-188-1S-10-M	22	HL23035	27	Cent. F 67	46	Cent. F 67	51	HL26245	70	HL23021
4	HL26225	21	HL26158	28	HL26248	45	HL26245	52	HL26225	69	HL23035
5	HL23021	20	Cent. F 67	29	HL26238	44	HL23021	53	ST603-188-1S-10-M	68	HL23057
6	HL23057	19	ST603-188-1S-10-M	30	HL23035	43	HL23057	54	Curinga	67	HL26158
7	HL26248	18	HL26245	31	Cent. F 67	42	HL26248	55	Cent. F 67	66	ST603-188-1S-10-M
8	Cent. F 67	17	Curinga	32	HL26225	41	HL26158	56	HL23021	65	HL26225
9	HL23035	16	HL26238	33	HL26245	40	HL23035	57	Cent. F 67	64	Curinga
10	HL26238	15	Cent. F 67	34	Curinga	39	Cent. F 67	58	HL23057	63	HL26245
11	HL26245	14	HL23057	35	ST603-188-1S-10-M	38	HL26225	59	HL26158	62	Cent. F 67
12	HL26158	13	HL23021	36	HL26158	37	ST603-188-1S-10-M	60	HL26238	61	HL26238
7,75 m						7,75 m					
IRRIGACIÓN						SEQUÍA					

Figura 11. Distribución experimental de los tratamientos en campo para el método de siembra directa.

R1			R2			R3			R1			R2			R3		
2 m			0,5 m														
1	HL248	22	HL26245	23	HL2021	44	HL225	45	HL23057	66	HL2021						
2	HL23021	21	Curinga	24	Curinga	43	HL23035	46	Cent. F 67	65	HL26245						
3	HL23035	20	HL258	25	HL23035	42	HL23057	47	HL245	64	HL26225						
4	HL23057	19	Cent. F 67	26	HL238	41	HL26158	48	ST603-188-1S-10-M	63	HL26248						
5	HL258	18	HL26248	27	HL23057	40	Cent. F 67	49	HL26248	62	Curinga						
6	HL26245	17	HL257	28	HL26225	39	Curinga	50	HL23035	61	HL26238						
7	HL26238	16	HL23021	29	ST603-188-1S-10-M	38	HL26238	51	HL258	60	HL26158						
8	Cent. F 67	15	HL26238	30	HL26248	37	HL26245	52	HL26238	59	HL23035						
9	ST603-188-1S-10-M	14	HL235	31	HL26158	36	ST603-188-1S-10-M	53	HL26225	58	HL257						
10	Curinga	13	HL26225	32	Cent. F 67	35	HL2021	54	HL23021	57	Cent. F 67						
11	HL26225	12	ST603-188-1S-10-M	33	HL245	34	HL26248	55	Curinga	56	ST603-188-1S-10-M						
7 m						7 m											
IRRIGACIÓN						SEQUÍA											

Los puntos en rojo indican la distribución de los tensiómetros en campo

Para lograr que los genotipos tuvieran el estrés de sequía en el mismo estado fenológico, se realizaron siembras y trasplantes escalonados para conseguir la sincronización en la floración en ambos experimentos. La siembra para el método de trasplante se realizó en camas a una densidad de 5g por metro lineal (Figura 12a) y el trasplante se efectuó a los 28 días después de la emergencia, a una distancia de 0,25m entre plantas y surcos (Figura 12c). Para el método de siembra

directa, se hizo un trazado manual a una distancia de siembra entre plantas y surcos de 0,25m (Figura 12b).

Figura 12. Siembra de genotipos. a) plántulas de genotipos en camas. b) trazado manual. c) ensayo de siembra directa establecido. d) trasplante.



La fertilización del experimento consistió en la aplicación de 200 kg ha^{-1} de N como urea, 60 kg ha^{-1} de P_2O_5 como fosfato diamónico, 130 kg ha^{-1} K_2O como cloruro de potasio, $7,3 \text{ kg ha}^{-1}$ Zn como sulfato de zinc y 21 kg ha^{-1} Fe como sulfato ferroso heptahidratado. Estas cantidades de fertilizantes se fraccionaron en cuatro aplicaciones en función del estado fenológico de cada genotipo, durante el ciclo de cultivo para el método de trasplante y tres fraccionamientos para el método de siembra directa.

Tabla 3. Dosis y fraccionamiento de fertilizantes en el experimento (trasplante).

Elemento	Dosis (kg h ⁻¹)	Trasplante	5 DDT	10 DDT	IP
N	200,0	-	20%	50%	30%
P₂O₅	60,0	100%	-	-	-
K₂O	130,0	50%	-	50%	-
Zn	7,3	100%	-	-	-
Fe	21,0	100%	-	-	-

DDT= días después de trasplante; IP= inicio de primordio

Tabla 4. Dosis y fraccionamiento de fertilizantes en el experimento (siembra directa).

Elemento	Dosis (kg h ⁻¹)	Básica	25 DDE	IP
N	200,0	20%	50%	30%
P₂O₅	60,0	100%	-	-
K₂O	130,0	50%	25%	25%
Zn	7,3	100%	-	-
Fe	21,0	100%	-	-

DDE= días después de emergencia; IP= inicio de primordio

El manejo de malezas, plagas y enfermedades se efectuó de acuerdo con las necesidades del ensayo y a las recomendaciones técnicas para el cultivo en CIAT, el riego para el método de trasplante fue manejado por inundación con lámina de agua constante y para el método de siembra directa se manejó por aspersión.

4.3.3 Muestreos y mediciones

4.3.3.1 Seguimiento y registro de datos fenológicos. Durante el ciclo de cada genotipo, se registraron fechas de siembra, trasplante, floración y cosecha.

4.3.3.2 Medición de variables genotípicas

El número de panículas se evaluó cuando las plantas alcanzaron la floración y la altura de las plantas antes y después de inicio de estrés (Figura 13).

Figura 13. Medición de altura de las plantas.



4.3.3.3 Medición de contenidos de humedad. Para monitorear la humedad del suelo en ambos tratamientos de siembra directa, se realizaron dos lecturas semanales del tensiómetro (Irrometer, Riverside, California, USA) a una profundidad de 60cm, antes y después del inicio del tratamiento de estrés.

Figura 14. Medición de tensiómetros.



Se realizó una lectura semanal del contenido de humedad en las diferentes subparcelas a profundidades de 10 y 20cm con el instrumento portátil de medida de humedad del suelo HydroSense II (Hydrosense II Campbell Scientific, Edmonton, AB, CAN)Figura 15. Medición de humedad con equipo portátil Hydrosense. (Figura 15), tomando tres lecturas en diferentes sitios de la subparcela para cada profundidad, esto se hizo tanto para el método de siembra directa como para el método de trasplante a partir del inicio del tratamiento de estrés.

Figura 15. Medición de humedad con equipo portátil Hydrosense.



4.3.3.4 Medición de SPAD. Una vez establecidos los tratamientos, se midió el contenido relativo de clorofila utilizando un SPAD (chlorophyll meter SPAD-502 Plus, Minolta Co. Ltd., Japan) (Figura 16). Se seleccionaron cinco hojas bandera en cinco plantas diferentes, se realizaron tres lecturas en la parte central de la hoja sin incluir la nervadura central, el dato para cada hoja correspondía al promedio de las tres lecturas. Esta lectura se realizó semanalmente antes y después del inicio del tratamiento de estrés por sequía hasta cosecha.

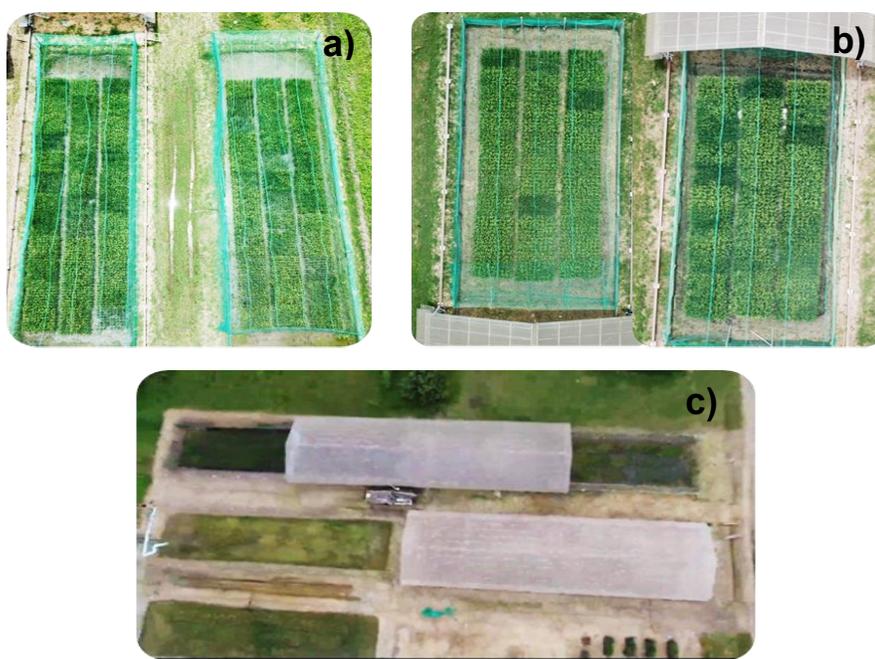
Figura 16. Medición de contenidos relativos de clorofila.



4.3.4 Tratamiento de estrés. El tratamiento de sequía para ambos experimentos consistió en la suspensión de la aplicación de agua de riego (tratamiento de estrés) desde el estado de embuchamiento (cuando la mayoría de las panículas en las plantas se encontraban embuchadas y en estado 8 de desarrollo) hasta la madurez fisiológica de la semilla. Para impedir el aumento en la humedad del suelo debido a las lluvias, se movía el Rainout shelter sobre el tratamiento de estrés durante las noches o en días nublados con altas probabilidades de lluvia. Se evitaba tener el Rainout shelter sobre el tratamiento de estrés en días soleados

para evitar la disminución de la radiación sobre las plantas por efecto de la cubierta (Figura 17c). Los lotes donde se llevaron a cabo los experimentos están protegidos por una cubierta plástica a una profundidad de un metro para evitar la infiltración de agua en los tratamientos.

Figura 17. Rainout Shelter en ensayos establecidos de siembra directa y fangueo. a) parcelas de fangueo. b) parcelas de siembra directa. c) Rainout shelter de ambos ensayos.



4.3.5 Cosecha de panículas y selección de plantas. En cada parcela se cosecharon las panículas de tres plantas, (Figura 18a) las cuales se utilizaron para la evaluación de componentes de rendimiento. Para la determinación del rendimiento, se cosecharon las plantas restantes de la parcela, sin incluir bordes laterales, superior e inferior y sus panículas fueron trilladas en una cosechadora estacionaria (LD 350, Wintersteiger, Ried, Austria) (Figura 18b). A la muestra de grano obtenida de la trilla, se le tomó la humedad y su respectivo peso; con estos datos se ajustó el rendimiento a kg ha^{-1} utilizando la (Ecuación 6).

Ecuación 6. Rendimiento ton/ha.

$$\text{RTO ton/ ha} = \text{Peso de grano (kg)} \times \frac{(100 - \text{humedad de cosecha (\%)})}{(100 - \text{humedad final (\%)})} \times \frac{10}{\text{Área cosechada m}^2}$$

Figura 18. Cosecha de parcelas. a) cosecha de plantas. b) trilla de plantas cosechadas.



4.3.6 Resultados y discusión. El análisis de varianza mostró efecto significativo para el genotipo ($P < 0,05$), el tratamiento ($P < 0,05$) y la interacción genotipo por tratamiento ($P < 0,01$). Estos resultados sugieren que los genotipos evaluados son contrastantes para el rendimiento y que la respuesta de estos fue diferencial al tratamiento de sequía, esto se atribuye a la constitución genética de cada genotipo. El tratamiento de sequía condujo a una reducción significativa del rendimiento del 26,31%, lo que evidencia que este estrés abiótico es un factor limitante para la productividad del cultivo y que el arroz es sensible a la falta de agua durante la fase de llenado de grano.

El rendimiento de grano de los cultivares de arroz bajo condiciones de estrés hídrico está asociada con el estado hídrico de la planta, y principalmente con el mantenimiento de un alto potencial hídrico de la hoja en la etapa de floración y

llenado del grano (Sibounheuang et al., 2006). El estrés por sequía en la fase de llenado del grano da como resultado una reducción dramática de la fertilidad de las espiguillas y consecuentemente del rendimiento del grano (He & Serraj, 2012).

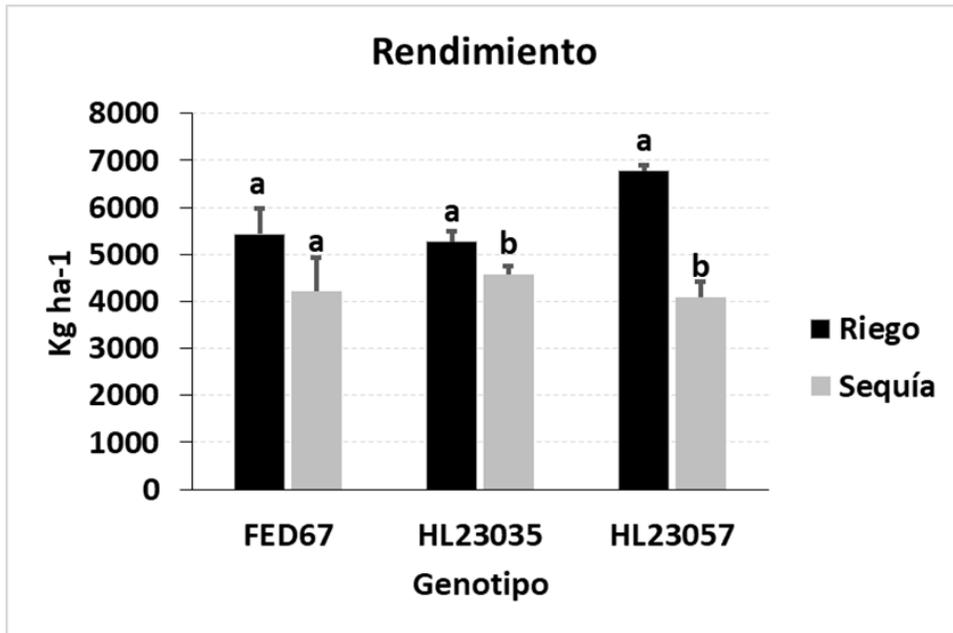
Tabla 5. Análisis de varianza para el rendimiento en el método de trasplante.

Variable	Método de Siembra	Tratamiento	Media	Mínimo - Máximo	Efectos		
					G	T	GxT
RTO	Trasplante	Riego	5821.08	5,180.60 - 6,769.37	*	*	**
		Sequía	4289.18	4,086.53 - 4,573.53			

RTO = rendimiento. Nivel de significancia: ***P<0,001, **P<0,01, *P< 0,05, ns= no significativo, G= genotipo, T= tratamiento, GXT= interacción genotipo por tratamiento.

El tratamiento de sequía (Figura 19) redujo significativamente el rendimiento en 13,14% y 39,63% para los híbridos HL23035 y HL23057 respectivamente. Esto sugiere que el híbrido HL23057 fue el más sensible a las condiciones de falta de irrigación durante la última fase de crecimiento del cultivo en comparación al híbrido HL23035 que presentó una menor reducción de rendimiento, lo que puede indicar que es menos sensible a la ausencia de irrigación y su explicación puede ser genética, tal vez el tener una combinación genética con mayor capacidad de amortiguación de sus locis en estado heterocigoto. Por su parte la reducción de rendimiento en FED67 (22,50%) no fue significativa.

Figura 19. Efecto del tratamiento de sequía en rendimiento para la variedad Fedearroz 67 y los híbridos HL23035 y HL23057.



Letras diferentes indica diferencia estadística significativa entre tratamientos para el mismo genotipo al $P < 0,05$ de significancia.

5. CONCLUSIONES

- El tratamiento de sombra en fase de llenado de grano redujo significativamente el rendimiento, esta pérdida se atribuye a la reducción de los componentes de rendimiento porcentaje de fertilidad y peso de 1000 granos, mientras que el número de panículas por metro cuadrado y el número de espiguillas por panículas, no fueron afectadas por la baja radiación.
- El estrés por sequía afectó significativamente el rendimiento de los híbridos de arroz siendo el híbrido HL23057 el más sensible a la pérdida de rendimiento y el híbrido HL23035 el que menos sensibilidad mostró a este estrés abiótico.

6. RECOMENDACIONES

- Realizar nuevos ensayos en una época de siembra diferente, para evaluar el comportamiento de estos materiales bajo otra oferta ambiental.
- Al procesar las muestras en laboratorio, dejarlas totalmente libres de impurezas, para evitar tener errores en el proceso de conteo de las espiguillas.
- Se recomienda que los trabajadores de campo al realizar aplicaciones de agroquímicos u otras labores que requieren elementos de protección personal, hagan uso de ellos.
- Tener en cuenta los registros de floración de cada genotipo para que puedan sincronizar esta etapa fenológica al momento de someter los tratamientos de estrés.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Acevedo, M., Castrillo, W., & Belmonte, U. (2006). *Origen, evolución y diversidad del arroz*. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2006000200001

Álvarez, R., Pérez, M., Reyes, E., Moreno, O., Delgado, N., Torrealba, G., Acevedo, M., Castrillo, W., Navas, M., Salazar, M., Torres, O., Torres, E., García, P., & Pérez, A. (2008). Evaluación comparativa de híbridos y variedades de arroz en los Llanos Centrocidentales de Venezuela. *Agronomía Tropical*, 58(2), 101-110. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2008000200001&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Bioversity international, & CIAT. (2018). *Alianza CIAT- Bioversity alcanza importantes hitos*. <https://ciat.cgiar.org/ar18/the-alliance/?lang=esien>

Bioversity International, & CIAT. (2019). *Centro Internacional de Agricultura Tropical*. <https://ciat.cgiar.org/about/>

Bioversity International, & CIAT. (2021). *Mejoramiento de cultivos*. <https://ciat.cgiar.org/lo-que-hacemos/mejoramiento-de-cultivos/?lang=es>

Chaudhary, R., Nanda, J., & Tran, D. (2003). *Guía para identificar las limitaciones de campo en la producción de arroz* (FAO (ed.)). <https://www.fao.org/3/y2778s/y2778s.pdf>

Chen, H., Li, Q., Zeng, Y., Deng, F., & Ren, W. (2019). Effect of different shading materials on grain yield and quality of rice. *Scientific Reports*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46437-9>

CIAT. (1986). *Componentes del rendimiento en arroz* (N.º 001). http://ciat-library.ciat.cgiar.org/ciat_digital/CIAT/books/historical/143.pdf

Counce, P., Keisling, T., & Mitchell, A. (2000). A Uniform, Objective, and Adaptive

System for Expressing Rice Development. *Crop Science*, 40(2), 436-443.
<https://doi.org/10.2135/CROPSCI2000.402436X>

Dar, M., Bano, D., Waza, S., Zaidi, N., Majid, A., Shikari, A., Ahangar, M., Hossain, M., Kumar, A., & Singh, U. (2021). Abiotic Stress Tolerance-Progress and Pathways of Sustainable Rice Production. *Sustainability*.
<https://doi.org/10.3390/su13042078>

Deng, F., Wang, L., Yao, X., Wang, J., Ren, W., & Yang, W. (2009). Effects of different-growing-stage shading on rice grain-filling and yield. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 27(3), 265-269.

Dobermann, A., & Fairhurst, T. (2000). *Arroz: Desórdenes Nutricionales y Manejo de Nutrientes*. 214.

Dolferus, R. (2014). To grow or not to grow: A stressful decision for plants. *Plant Science*, 229, 247-261. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2014.10.002>

Fageria, N. . (2007). Yield physiology of rice. *Journal of plant Nutrition*, (Vol 30).
<https://doi.org/10.1080/15226510701374831>

FAO. (2017). *Seguimiento del mercado del arroz de la FAO*. Seguimiento del mercado del arroz de la FAO. <http://www.fao.org/3/l8317ES/i8317es.pdf>

Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., & Basora, S. (2009). Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Agron. Sustain. Dev.*, 185-212. <https://doi.org/https://doi.org/10.1051/agro:2008021>

FEDEARROZ. (2020). *Area, Producción y Rendimientos*.
http://www.fedearroz.com.co/new/apr_public.php

FEDEARROZ. (2021). Arroz híbrido otro logro tecnológico de FEDEARROZ para Colombia. *ARROZ*, 69(553), 6-8.
https://fedearroz.s3.amazonaws.com/media/documents/Revista_Arroz553.pdf

FLAR. (2021). *HIAAL: Nueve años impulsando el desarrollo de híbridos en la región - FLAR*. <https://flar.org/hiaal-nueve-anos-impulsando-desarrollo-hibridos-en-la-region/>

Fukagawa, N., & Ziska, L. (2019). Rice: Importance for Global Nutrition. *J Nutr Sci Vitaminol*, 65, 2-3. <http://www.riceassociation.org.uk/content/1/18/types->

Gao, J., Chao, D., & Lin, H. (2007). Understanding abiotic stress tolerance mechanisms: Recent studies on stress response in rice. *Journal of Integrative Plant Biology*, 49(6), 742-750. <https://doi.org/10.1111/J.1744-7909.2007.00495.X>

Guan, Y., Serra, R., Liu, S., Xu, J., Ali, J., Wang, W., Venus, E., Zhu, L., & Li, Z. (2010). Simultaneously improving yield under drought stress and non-stress conditions: a case study of rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Experimental Botany*, 61, 4145-4156. <https://doi.org/doi:10.1093/jxb/erq212>

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. *Am-Euras. J. Agric. & Environ. Sci.*, 12, 100-104. [https://www.researchgate.net/profile/Zulqarnain-](https://www.researchgate.net/profile/Zulqarnain-Haider/publication/281240180_Correlation_and_Path_Coefficient_Analysis_of_Yield_Components_in_Rice_Oryza_sativa_L_Under_Simulated_Drought_Stress_Condition/links/55dc76ec08aec156b9b17d53/Correlation-and-Path-)

[Haider/publication/281240180_Correlation_and_Path_Coefficient_Analysis_of_Yield_Components_in_Rice_Oryza_sativa_L_Under_Simulated_Drought_Stress_Condition/links/55dc76ec08aec156b9b17d53/Correlation-and-Path-](https://www.researchgate.net/profile/Zulqarnain-Haider/publication/281240180_Correlation_and_Path_Coefficient_Analysis_of_Yield_Components_in_Rice_Oryza_sativa_L_Under_Simulated_Drought_Stress_Condition/links/55dc76ec08aec156b9b17d53/Correlation-and-Path-)

He, H., & Serraj, R. (2012). Involvement of peduncle elongation, anther dehiscence and spikelet sterility in upland rice response to reproductive-stage drought stress. *Environmental and Experimental Botany*, 75, 120-127. <https://doi.org/10.1016/J.ENVEXPBOT.2011.09.004>

Impa, S., Raju, B., Hein, N., Sandhu, J., Prasad, P., Walia, H., & Jagadish, S. (2021). High night temperature effects on wheat and rice: Current status and way forward. *Plant, cell & environment*, 44(7), 2049-2065. <https://doi.org/10.1111/PCE.14028>

Ishibashi, Y., Okamura, K., Miyazaki, M., Phan, T., Yuasa, T., & Iwaya-Inoue, M. (2014). Expression of rice sucrose transporter gene OsSUT1 in sink and source organs shaded during grain filling may affect grain yield and quality. *Environmental and Experimental Botany*, 97, 49-54. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2013.08.005>

Khush, G. (2001). Green revolution the way forward. *Nature Reviews Genetics*, 2(10), 815-822.

Kim, Y., Chung, Y., Lee, E., Tripathi, P., Heo, S., & Kim, K. (2020). Root Response to Drought Stress in Rice (*Oryza sativa* L.). *International Journal of Molecular Sciences* 2020, Vol. 21, Page 1513, 21(4), 1513. <https://doi.org/10.3390/IJMS21041513>

Li, J., Wang, J., & Zeigler, R. (2014). The 3,000 rice genomes project: new opportunities and challenges for future rice research. *GigaScience*, 3(1), 8. <https://doi.org/10.1186/2047-217X-3-8>

Li, T., Ohsugi, R., Yamagishi, T., & Sasaki, H. (2006). Effects of weak light on rice starch accumulation and starch synthesis enzyme activities at grain filling stage. *Chinese Journal of Rice Science*, 19(6), 545-550.

Liakat Ali, M., McClung, A., Jia, M., Kimball, J., McCouch, S., & Eizenga, G. (2011). A rice diversity panel evaluated for genetic and agro-morphological diversity between subpopulations and its geographic distribution. *Crop Science*, 51(5), 2021-2035. <https://doi.org/10.2135/cropsci2010.11.0641>

Liu, K., Yang, R., Lu, J., Wang, X., Lu, B., Tian, X., & Zhang, Y. (2019). Radiation Use Efficiency and Source-Sink Changes of Super Hybrid Rice under Shade Stress during Grain-Filling Stage. *Agronomy Journal*, 111(4), 1788-1798. <https://doi.org/10.2134/AGRONJ2018.10.0662>

Liu, Q., Wu, X., Chen, B., Ma, J., & Gao, J. (2014). Effects of Low Light on Agronomic and Physiological Characteristics of Rice Including Grain Yield and Quality. *Rice Science*, 21(5), 243-251. [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S1672-6308\(13\)60192-4](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S1672-6308(13)60192-4)

Lu, B., Cai, X., & Jin, X. (2009). Efficient indica and japonica rice identification based on the InDel molecular method: Its implication in rice breeding and evolutionary research. *Progress in Natural Science*, 19(10), 1241-1252. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2009.01.011>

Lynam, J., & Byerlee, D. (2017). Siempre pioneros-CIAT: 50 años contribuyendo a la sostenibilidad alimentaria futura. En *CIAT No. 446. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT)*. Publicación CIAT No.446. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/89083>

Moldenhauer, K., Counce, P., & Hardke, J. (2013). Rice Growth and Development. En U. of A. Cooperative Extension Service (Ed.), *Arkansas Rice Production Handbook - MP192* (1.^a ed., Vol. 192, pp. 9-20). <https://www.uaex.uada.edu/publications/pdf/mp192/mp192.pdf>

Moldenhauer, K., & Gibbons, J. (2003). Rice Morphology and Development. En In W. Smith & R. Dilday (Eds.) (Ed.), *Rice origin history technology and production* (pp. 103-125). Rice: Origin, History, Technology, and Production. https://books.google.es/books?id=-mLZY-PCC-kC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

Mostajeran, A., & Rahimi-Eichi, V. (2009). Effects of Drought Stress on Growth and Yield of Rice (*Oryza sativa* L.) Cultivars and Accumulation of Proline and Soluble Sugars in Sheath and Blades of Their Different Ages Leaves. *undefined*.

Murata, Y., & Matsushima, S. (1978). Rice. En L. Evans (Ed.), *Crop Physiology* (Cambridge, pp. 73-99).

Murty, K. (1977). Physiological aspects of production in rice. En B. Padhi (Ed.), *Frontiers of plant sciences* (Utkal Univ, pp. 79-86).

Nakano, H. (2000). Effect of early-stage shading of direct seeded rice on growth and yield components. *Japanese Journal of Crop Science*, 69(2), 182-188. <https://doi.org/10.1248/cpb.37.3229>

Pan, S., Liu, H., Mo, Z., Patterson, B., Duan, M., Tian, H., Hu, S., & Tang, X. (2016). Effects of Nitrogen and Shading on Root Morphologies, Nutrient Accumulation, and Photosynthetic Parameters in Different Rice Genotypes. *Scientific reports*, 6(August), 32148. <https://doi.org/10.1038/srep32148>

Peng, S., Laza, R., Visperas, R., Khush, G., Virk, P., & Zhu, D. (2004). Rice: Progress in Breaking the Yield Ceiling. *Proceedings of the 4th International Crop Science Congress, Chandler 1982*, 1-11.

Pingali, P. (2012). Green Revolution:Impacts, Limits, and the path ahead. *Proceedings of the National Academy of Science*, 109(31), 12302-12308. <https://doi.org/10.1073/pnas.0912953109>

Prasad, P., Boote, K., Allen, L., Sheehy, J., & Thomas, J. (2006). Species, ecotype and cultivar differences in spikelet fertility and harvest index of rice in response to high temperature stress. En *Field Crops Research* (pp. 398--411). <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.04.008>

- Raza, A., Razzaq, A., Mehmood, S., Zou, X., Zhang, X., Lv, Y., & Xu, J. (2019). plants Impact of Climate Change on Crops Adaptation and Strategies to Tackle Its Outcome: A Review. *plants*, 8. <https://doi.org/10.3390/plants8020034>
- Ren, W., Yang, W., Fan, G., Zhu, X., Ma, Z., & Xu, J. (2003). Effect of low light on dry matter accumulation and yield of rice. *J Sichuan Agric Univ*, 29(4), 292–296.
- Ren, W., Yang, W., Xu, J., Fan, G., Wang, L., & Guan, H. (2002). mpact of low-light stress on leaves characteristics of rice after heading. *J Sichuan Agric Univ*, 20(3), 205–208.
- Schaarschmidt, S., Lawas, L., Glaubitz, U., Li, X., Erban, A., Kopka, J., Krishna Jagadish, S., Hinch, D., & Zuther, E. (2020). Season Affects Yield and Metabolic Profiles of Rice (*Oryza sativa*) under High Night Temperature Stress in the Field. *International Journal of Molecular Sciences* 2020, Vol. 21, Page 3187, 21(9), 3187. <https://doi.org/10.3390/IJMS21093187>
- Sharma, A., & Singh, D. (1999). Rice. En D. Smith & C. Hamel (Eds.), *Crop Yield* (pp. 109-168). Springer.
- Sibounheuang, V., Basnayake, J., & Fukai, S. (2006). Genotypic consistency in the expression of leaf water potential in rice (*Oryza sativa* L.). *Field Crops Research*, 97(2-3), 142-154. <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2005.09.006>
- Singh, T., Pun, K., Saikia, K., Satapathy, B., Bhagat, K., Das, A., & Lal, B. (2015). Abiotic Stress Management in Rice. *Researchgate*. https://www.researchgate.net/publication/315688729_Abiotic_Stress_Management_in_Rice

SOSBAI. (2018). Arroz Irrigado - Recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil. *Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado - XXXII REUNIÃO TÉCNICA DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO*.

Suryanto, A., Maghfoer, M., & Kartinaty, T. (2018). Radiation use efficiency on the different varieties and the number of seedlings of rice (*Oryza sativa* L.). *Agrivita*, 40(3), 536-543. <https://doi.org/10.17503/AGRIVITA.V40I3.1851>

Vaughan, D., Lu, B., & Tomooka, N. (2008). The evolving story of rice evolution. *Plant Science*, 174(4), 394-408. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2008.01.016>

Wang, L., Deng, F., & Ren, W. (2015). Shading tolerance in rice is related to better light harvesting and use efficiency and grain filling rate during grain filling period. *Field Crops Research*, 180, 54-62. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.05.010>

Wei, H., Zhu, Y., Qiu, S., Han, C., Hu, L., Xu, D., Zhou, N., Xing, Z., HU, Y., Cui, P., Dai, Q., & Zhang, H. (2018). Combined effect of shading time and nitrogen level on grain filling and grain quality in japonica super rice. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(11), 2405-2417. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)62025-8](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)62025-8)

Wu, W., Nie, L., Liao, Y., Shah, F., Cui, K., Wang, Q., Lian, Y., & Huang, J. (2013). Toward yield improvement of early-season rice: Other options under double rice-cropping system in central China. *European Journal of Agronomy*, 45, 75-86. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.10.009>

Xiong, Z., Zhang, S., Ford-Lloyd, B., Jin, X., Wu, Y., Yan, H., Liu, P., Yang, X., & Lu, B. R. (2011). Latitudinal distribution and differentiation of rice germplasm: Its implications in breeding. *Crop Science*, 51(3), 1050-1058. <https://doi.org/10.2135/cropsci2010.07.0431>

- Yamori, W., Shikanai, T., & Makino, A. (2015). Photosystem I cyclic electron flow via chloroplast NADH dehydrogenase-like complex performs a physiological role for photosynthesis at low light. *Scientific reports*, 5(August), 13908. <https://doi.org/10.1038/srep13908>
- Yang, J., & Zhang, J. (2010). Grain-filling problem in «super» rice. *Journal of Experimental Botany*, 61(1), 1-5. <https://doi.org/10.1093/jxb/erp348>
- Yoshida, S. (1981). *Fundamentals of Rice Crop Science* (I. R. R. I. (IRRI) (ed.)).
- Zhang, J., Chen, L., Xing, F., Kudrna, D., Yao, W., Copetti, D., Mu, T., Li, W., Song, J., Xie, W., Lee, S., Talag, J., Shao, L., An, Y., Zhang, C., Ouyang, Y., Sun, S., Jiao, W., Lv, F., ... Zhang, Q. (2016). Extensive sequence divergence between the reference genomes of two elite indica rice varieties Zhenshan 97 and Minghui 63. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113(35), E5163-E5171. <https://doi.org/10.1073/pnas.1611012113>
- Zhu, P., Yang, S., Ma, J., Li, S., & Chen, Y. (2008). Effect of shading on the photosynthetic characteristics and yield at later growth stage of hybrid rice combination. *Acta Agronomica Sinica*, 34(11), 2003-2009.
- Zuluaga, A., Bidzinski, P., Chanclud, E., Ducasse, A., Cayrol, B., Gomez Selvaraj, M., Ishitani, M., Jauneau, A., Deslandes, L., Kroj, T., Michel, C., Szurek, B., Koebnik, R., & Morel, J. (2020). The Rice DNA-Binding Protein ZBED Controls Stress Regulators and Maintains Disease Resistance After a Mild Drought. *Frontiers in Plant Science*, 11, 1265. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2020.01265/BIBTEX>