



**UNIVERSIDAD DE TALCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA DE AGRONOMÍA**

**Efecto de dos métodos de riego sobre el comportamiento fisiológico y rendimiento
en variedades de arroz (*Oryza sativa* L.) de ciclo corto, intermedio y largo.**

MEMORIA DE TITULO

KAREN ALEJANDRA VERGARA CORDERO

TALCA, CHILE

2022

CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su unidad de procesos técnicos certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Talca, 2022



**UNIVERSIDAD DE TALCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA DE AGRONOMÍA**

**Efecto de dos métodos de riego sobre el comportamiento fisiológico y rendimiento
en variedades de arroz (*Oryza sativa* L.) de ciclo corto, intermedio y largo.**

Por

KAREN ALEJANDRA VERGARA CORDERO

MEMORIA DE TITULO

**Presentada a la Universidad de Talca como
parte de los requisitos para optar al título de**

INGENIERO AGRÓNOMO

TALCA, 2022

APROBACIÓN:



Profesor Guía: Ing. Agr. MSc. Dr. César Acevedo-Opazo
Profesor Asociado
Escuela de Agronomía
Facultad de Ciencias Agrarias



Profesor Co-guía: Ing. Agr. Dr. Paulo Cañete Salinas.
Escuela de Agronomía
Facultad de Ciencias Agrarias

Fecha de presentación de Memoria de Título: 16-08-2022

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer principalmente a mi familia; a mis padres María y Domingo, a mi hermano Domingo Rodrigo por su apoyo incondicional, amor y comprensión no solo en esta etapa universitaria, sino que a lo largo de mis años de vida. También, a mi familia Talquina, principalmente a mi prima Gloria, a su esposo Eric y sus hijos; Evelin y Maximiliano, por abrirme las puertas de su casa apenas supieron que estudiaría en Talca, sin duda me ayudaron demasiado e hicieron mi estadía en esta ciudad más amena con su compañía y cariño.

Por otra parte, un enorme agradecimiento a mi profesor guía César Acevedo Opazo y co-guía Paulo Cañete Salinas por su ayuda y transmisión de sus conocimientos en la realización de esta investigación, por su compromiso, organización, responsabilidad y gran disposición a pesar de los ocupados que pudieran estar. Como también por su gran empatía, noté no solo su calidad profesional y sino también su calidad humana, estoy totalmente agradecida y contenta de mi decisión de haber realizado mi memoria de título con estas grandes personas.

No puedo dejar pasar a las personas que la universidad me ha dejado, principalmente a mis amigas Esperanza, Paula y Patricia, que estuvieron ahí presentes cada día, cada semestre, cada año de carrera, sin duda fueron un apoyo tremendo e hicieron mi vida universitaria más linda, gracias agro-amigas.

Finalmente, gracias a cada una de las personas que conforman o conformaron la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad de Talca en los años fui alumna de Agronomía.

RESUMEN

En Chile anualmente se cultivan alrededor de 26 mil hectáreas de arroz, donde el 80-90% de la superficie cultivada se maneja bajo el sistema de riego por inundación permanente. El uso de este sistema de riego genera un consumo de agua aproximado de 14.000 a 18.000 m³/ha durante toda la temporada de desarrollo del cultivo, lo que debido a la mega sequía que está sufriendo la zona central de Chile es cada vez más difícil de suministrar. En una región tan austral como la zona arroceras de Chile una lámina de agua permanente en el cultivo de arroz es de suma importancia, ya que esta actúa como regulador de la temperatura (buffer térmico) y como controlador de ciertas malezas. Bajo este contexto se evaluó el efecto de dos sistemas de riego (intermitente e inundado optimizado) sobre el intercambio gaseoso de las plantas y los componentes del rendimiento en cuatro variedades de arroz de distinto ciclo de crecimiento, en la zona de Retiro, Región del Maule, Chile. Los resultados obtenidos indican que bajo el sistema de riego por intermitencia la mayor Tr fue alcanzada por el Híbrido 1 con 0,0012 mol m⁻² s⁻¹, en cuanto a la A_n fue Esfera con una media de 27,68 μmol m⁻² s⁻¹ y nuevamente el Híbrido 1 con medias entre 0,86 y 0,66 mol m⁻² s⁻¹ de g_s . Por su parte, bajo el sistema de riego por inundación optimizado, los mayores valores de Tr fue de 0,015 mol m⁻² s⁻¹ alcanzado el mismo día por las variedades Esfera, Loto y Zafiro, mientras que para la A_n solo Loto mostró medias entre 31,92 y 22,88 μmol m⁻² s⁻¹ y finalmente, Esfera fue la variedad que presentó el mayor valor de g_s con una media de 1,32 mol m⁻² s⁻¹. Por otra parte, los resultados obtenidos de los componentes del rendimiento mostraron que bajo el sistema de riego por intermitencia la variedad que destacó fue Esfera con un rendimiento promedio de 9.863 kg/ha, seguida por el Híbrido 1 con 2.126 kg/ha, luego Zafiro con 1.618 kg/ha y por último Loto con 627 kg/ha. Mientras que, bajo el sistema de riego por inundación optimizado, no se observaron diferencias significativas de rendimiento, sin embargo, si se registraron en el N° Granos vanos/Panícula y el Peso de 1000 granos, siendo Loto la variedad más destacada. En conclusión, las variedades de ciclo intermedio (Esfera e Híbrido 1) mostraron la mejor respuesta al estrés hídrico y/o bajas temperaturas, convirtiéndose en las más adecuadas para ser implementadas bajo un sistema de riego por intermitencia.

ABSTRACT

In Chile, around 26 thousand hectares of rice are cultivated annually, where 80-90% of the cultivated area is managed under the permanent flood irrigation system. The use of this irrigation system generates an approximate water consumption of 14,000 to 18,000 m³/ha during the entire growing season, which due to the mega drought that is suffering the central zone of Chile is increasingly difficult to supply. In such a southern region as the rice-growing area of Chile, a permanent sheet of water in the rice crop is of utmost importance, since it acts as a temperature regulator (thermal buffer) and as a controller of certain weeds. In this context, the effect of two irrigation systems (intermittent and optimized flooded) on plant gas exchange and yield components was evaluated in four rice varieties of different growth cycles in the Retiro area, Maule Region, Chile. The results obtained indicate that under the intermittent irrigation system the highest Tr was reached by Híbrido 1 with 0.0012 mol m⁻² s⁻¹, as for A_n was Esfera with a mean of 27.68 μmol m⁻² s⁻¹ and again Híbrido 1 with means between 0.86 and 0.66 mol m⁻² s⁻¹ of g_s. On the other hand, under the optimized flood irrigation system, the highest values of Tr was 0.015 mol m⁻² s⁻¹ reached on the same day by the varieties Esfera, Loto and Zafiro, while for A_n only Loto showed means between 31.92 and 22.88 μmol m⁻² s⁻¹ and finally, Esfera was the variety that presented the highest value of g_s with a mean of 1.32 mol m⁻² s⁻¹. On the other hand, the results obtained from the yield components showed that under the intermittent irrigation system the variety that stood out was Esfera with an average yield of 9,863 kg/ha, followed by Híbrido 1 with 2,126 kg/ha, then Zafiro with 1,618 kg/ha and finally Loto with 627 kg/ha. While, under the optimized flood irrigation system, no significant yield differences were observed, however, they were recorded in the number of empty grains/panicle and 1000-grain weight, with Loto being the most outstanding variety. In conclusion, the intermediate cycle varieties (Esfera and Híbrido 1) showed the best response to water stress and/or low temperatures, making them the most suitable for implementation under an intermittent irrigation system.

ÍNDICE

	Página
1. Introducción.....	12
1.1 Hipótesis.....	14
1.2 Objetivo general.....	14
1.3 Objetivos específicos.....	14
2. Revisión Bibliográfica.....	15
2.1 Situación del cultivo de arroz.....	15
2.2 Descripciones generales del arroz.....	16
2.2.1 Variedades cultivadas en Chile.....	16
2.2.2 Fenología del arroz.....	17
2.3 Condiciones edafoclimáticas.....	18
2.4 Manejo agronómico (Riego).....	18
2.5 Factores limitantes de la producción de arroz.....	19
2.6 Nuevas estrategias para la producción de arroz.....	22
2.6.1 Variedades de ciclo corto y riego por intermitencia.....	22
2.7 Evaluación fisiológica y componentes del rendimiento en arroz.....	23
2.7.1 Fisiología de la planta.....	23
2.7.2 Componentes del rendimiento.....	24
3. Materiales y Métodos.....	25
3.1 Sitio experimental.....	25
3.1.1 Características del clima.....	25
3.1.2 Características del suelo.....	26
3.2 Diseño experimental.....	27
3.3 Mediciones de campo.....	28
3.4 Análisis estadísticos.....	29
4. Resultados y Discusión.....	30

4.1 Análisis estadístico descriptivo.....	30
4.2 Análisis fisiológico.....	32
4.2.1 Tasa de transpiración.....	32
4.2.2 Tasa de asimilación neta.....	34
4.2.3 Conductancia estomática.....	36
4.2.4 Análisis multifactorial.....	38
4.3 Componentes del rendimiento.....	42
5. Conclusiones.....	49
6. Referencias Bibliográficas.....	50

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 3.1: Identificación de variedades de arroz implementadas en el estudio y sus correspondiente ciclos vegetativos.....	27
Cuadro 4.1: Análisis multifactorial entre variables fisiológicas y tratamientos del ensayo (Tipo de riego, Variedad y Fecha de medición).....	38
Cuadro 4.2: Comparación de variables fisiológicas en cada fecha de medición según tipo de riego.....	40
Cuadro 4.3: Análisis multifactorial entre componentes del rendimiento y tratamientos del ensayo (Tipo de riego y Variedad).....	41
Cuadro 4.4: Análisis de varianza de las variables N° Tallos/m ² , N° Panículas/m ² , Largo tallo (cm), Peso tallo (gr/m ²), N° Grano vano/Panícula, N° Grano lleno/Panícula, Peso de 1000 granos (gr) y Rendimiento (kg/ha) de las cuatro variedades de arroz evaluadas para los dos tipos de riego.....	44

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 2.1: Estados fenológicos del arroz según escala BBCH.....	17
Figura 3.1: Imagen satelital del Fundo “El Almendro”, comuna de Retiro, VII región, Chile, en las coordenadas (35°57’28”S 71°47’20”O) donde se realizó el ensayo.....	25
Figura 3.2: Temperaturas promedio, mínimas, máximas y pluviometría entre los meses de octubre y abril de la temporada 2020-2021.....	26
Figura 3.3: Fotografía de distribución espacial del diseño experimental.....	28
Figura 4.1: Análisis de componentes principales para la totalidad de los datos recopilados en el estudio; en los dos tipos de riego, las cuatro variedades de arroz y variables fisiológicas y de rendimiento evaluadas.....	30
Figura 4.2: Gráfico de valores de tasa de transpiración de 4 variedades de arroz en 6 fechas de medición para 2 tipos de riego, junto con análisis de varianza de tasa de transpiración por fechas de medición para cada tipo de riego.....	33
Figura 4.3: Gráfico de valores de tasa de asimilación de 4 variedades de arroz en 6 fechas de medición para 2 tipos de riego, junto con análisis de varianza de tasa de asimilación por fechas de medición para cada tipo de riego.....	35
Figura 4.4: Gráfico de valores de conductancia estomática de 4 variedades de arroz en 6 fechas de medición para 2 tipos de riego, junto con análisis de varianza de conductancia estomática por fechas de medición para cada tipo de riego.....	37

Figura 4.5: Gráfico de interacción significativa entre tipo de riego y fecha de medición, de las variables T_r y g_s39

Figura 4.6: Gráfico de interacción significativa entre tipo de riego y variedad, de la variable rendimiento.....46

1. INTRODUCCIÓN

El cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) tiene gran relevancia a nivel mundial debido al aporte nutricional en la dieta de la población y en la economía global, ya que representa un 20% de la fuente energética alimentaria, siendo superior al aporte de otros cereales como el trigo y el maíz (FAO, 2004). Según un estudio realizado por Laval (2020) sobre las estimaciones de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (ODCE) y de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), se estima una proyección de 582 millones de toneladas en la producción mundial de arroz para el año 2029. Adicionalmente, la OCDE y FAO estiman que dentro de una década el consumo de arroz aumentará en 69 millones de toneladas y que continuará siendo un alimento base importante en la dieta de Asia, África, Latinoamérica, y el Caribe (Laval, 2020; ODCE y FAO, 2019).

En Chile anualmente se cultivan aproximadamente 26 mil hectáreas de arroz (*Oryza sativa* L.), concentradas principalmente en la Región del Maule con 20.185 ha, seguida en menor proporción por la región de Ñuble con 6.394 ha. En cuanto a la producción obtenida durante la temporada 2019/2020, ésta alcanzó 169,7 miles de toneladas con un rendimiento promedio mayor a los 60 qqm/ha (García y Laval, 2021). La producción nacional es destinada en su mayoría al mercado interno, la cual es insuficiente para cubrir la demanda de los consumidores nacionales, por lo cual, debe ser suplida con importaciones. A mediados del 2020 se importaron alrededor de 76.305 toneladas de arroz elaborado desde Argentina, Paraguay, Uruguay y Pakistán (Laval, 2020).

La producción mundial de arroz en su mayoría es obtenida de dos sub-especies: Índica, de granos largos y angostos; y Japónica, de granos cortos y más anchos. El 90% de la comercialización global de arroz corresponde al tipo Índica, de la cual importa Chile. Sin embargo, la producción nacional se basa en variedades del tipo Japónica, siendo más apetecido por los consumidores chilenos debido a sus características organolépticas y culinarias de alta calidad. De la misma forma, el tipo Japónica se cultiva en otras latitudes

de clima templado de Rusia, norte de Japón, Italia, Hungría, California y Australia (Cordero *et al.*, 2020).

Las condiciones climáticas como en cualquier cultivo es un elemento clave, ya que influencia directamente en el rendimiento, desarrollo y procesos fisiológicos del cultivo. El arroz es un cultivo de origen tropical y que producto de su domesticación se han desarrollado muchas variedades adaptadas a distintos tipos de clima, desde tropicales a templados (Acevedo *et al.*, 2006); siendo Chile el país más austral del mundo donde se cultiva arroz (Laval, 2020). El principal problema que presenta la zona arroceras de nuestro país son las bajas temperaturas nocturnas ($< 12^{\circ}\text{C}$), las cuales afectan negativamente el desarrollo vegetativo y reproductivo de la planta de arroz, siendo esta última la etapa más sensible al estrés por frío, produciendo esterilidad floral, lo que se traduce en la disminución del rendimiento en hasta un 60% (Paredes *et al.*, 2015).

Otra de las limitaciones que se presentan en nuestro país es la escasez del recurso hídrico, problema que se ha venido acrecentando durante los últimos años (déficit entre 20 a 40%), por lo tanto, al no contar con este vital elemento en etapas cruciales del cultivo, como floración, formación y llenado de granos, afectarían directamente su rendimiento comercial. El problema descrito se gatilla debido a que el agua actúa como regulador de la temperatura (buffer térmico) y controlador de ciertas malezas. Aproximadamente en Chile del 80-90% de la superficie cultivada de arroz se maneja bajo el sistema de riego por inundación permanente, el cual utiliza entre 14.000 a 18.000 m^3 de agua por temporada/ha para el desarrollo del cultivo (Hidalgo, 2017). En cuanto a la disminución de la superficie cultivada por estrés hídrico se calcula en un 10% del total de la superficie en hectáreas cultivadas (Laval, 2020).

Teniendo en cuenta los factores limitantes para la producción de arroz en Chile es necesario que los productores cuenten con variedades de ciclo más corto que las variedades tradicionales empleadas actualmente, debido a su mayor capacidad de tolerancia al frío, fundamentalmente en la fase reproductiva del ciclo de desarrollo del arroz. A su vez, presentan un mejor comportamiento frente a restricciones hídricas

(Hidalgo, 2017; Paredes *et al.*, 2015), por lo que pueden ser producidas bajo un sistema de riego por intermitencia, generando un importante ahorro de agua, ya que al paso de cada temporada se hace más crítica la disponibilidad de este recurso, debido a las sequías cada vez más continuas que ocasiona el cambio climático. El poseer un ciclo de crecimiento más corto le da a este tipo de variedades la característica de ser precoces, por lo que cuentan con una mayor flexibilidad en la época de siembra. Esto permite escapar de las temperaturas nocturnas frías o lluvias inesperadas al final o inicio de la temporada, que afectan directamente la producción o las labores de establecimiento y cosecha del cultivo de arroz.

A sí mismo, es necesario evaluar el comportamiento de este tipo variedades en las condiciones climáticas chilenas, siendo esta información limitada. Por lo que, a continuación, se plantea la hipótesis y objetivos del presente estudio:

1.1 Hipótesis:

Las variedades de arroz (*Oryza sativa* L.) de ciclo corto presentarán una mayor tasa de intercambio de gases y rendimiento en comparación a las variedades tradicionales de ciclo intermedio y largo bajo condiciones de riego por intermitencia.

1.2 Objetivo general:

Determinar el efecto de dos sistemas de riego sobre el intercambio de gases y los componentes del rendimiento en cuatro variedades de arroz de ciclo de crecimiento corto, intermedio y largo.

1.3 Objetivos específicos:

- a) Evaluar la respuesta del intercambio gaseoso de variedades de ciclo corto, intermedio y largo bajo condiciones de riego por intermitencia e inundado optimizado.
- b) Evaluar los componentes del rendimiento en variedades de ciclo corto, intermedio y largo en condiciones de riego por intermitencia e inundado optimizado.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Situación del cultivo de arroz

El arroz es uno de los cereales más importantes a nivel global ya que alimenta a un gran porcentaje de la población mundial. Su producción está concentrada en el continente asiático, que representa el 90% de la producción y consumo promedio mundial (FAO, 2018; ODEPA, 2017; Hidalgo, 2017). Solo en China e India se produce alrededor del 31% y 22% respectivamente (Hidalgo, 2017). Por otra parte, la proporción del arroz producido en el mundo recae en solo dos sub-especies, del tipo Índica y Japónica, también se encuentran otras variedades especiales de tipo aromático, como basmati o javánica (ODEPA, 2017). La producción mundial de arroz Índica y Japónica para la temporada 2017 fue estimada en 417,3 y 71,3 millones de toneladas respectivamente (Laval, 2020), evidenciando la mayor difusión del arroz tipo Índica. Actualmente se estima que el consumo mundial para el 2020/21 aumentará en 0,5 millones de toneladas y en cuanto al comercio mundial se mantendrá prácticamente en 46,3 millones de toneladas (García y Laval, 2021).

En Chile la situación es distinta a la global, la producción nacional de arroz se basa en variedades del tipo Japónica, y esta se distribuye desde la Región del Maule a la Región de Ñuble. La VII región es la principal zona arrocera del país, durante la temporada 2019/20 representó el 76% de la superficie sembrada en Chile (Laval, 2020). Según cuadros informativos elaborados por García y Laval (2021), la superficie dedicada al cultivo de arroz en Chile se estimó en 27,7 miles de hectáreas para la temporada 2020/2021. La producción nacional representó 169,7 miles de toneladas con un rendimiento de 64,3 qqm/ha durante la temporada 2019/20. Por último, la producción de arroz en Chile se concentra principalmente en pequeños productores, alrededor del 72,3% de las explotaciones son inferiores a las 50 ha y solo el 1,6% de los productores poseen más de 500 ha de superficie según el Censo Agropecuario y Forestal del año 2007 (García y Laval, 2021; Espinoza y Farías, 2017).

2.2 Descripciones generales del arroz

Oryza sativa L., comúnmente llamado arroz, es una especie semiacuática, monocotiledónea que pertenece a la familia Poaceae (Gramineae), la cual tiene su origen y domesticación en zonas húmedas tropicales y subtropicales de Asia (Acevedo *et al.*, 2006). Se comenzó a cultivar hace ya casi 10.000 años, actualmente se producen y comercializan dos principales grupos que son reconocidos como sub-especies del arroz; Índica y Japónica, las cuales difieren en características fisiológicas, moleculares y morfológicas (Hidalgo, 2017). La sub-especie Índica proviene de los trópicos y subtropicos, se caracteriza por poseer granos largos y angostos, mientras que la sub-especie Japónica se encuentra distribuida en zonas no tropicales, es decir, zonas templadas y se destaca por poseer granos cortos y más anchos (Acevedo *et al.*, 2006).

2.2.1 Variedades cultivadas en Chile

En Chile se cultiva la sub-especie de arroz Japónica, debido a sus características organolépticas y culinarias, siendo muy apreciada por los consumidores nacionales. La primera variedad desarrollada en Chile corresponde a la variedad Oro que fue sembrada en casi el 100% de la superficie arroceras por varios años. El principal problema que hizo necesario su cambio fue la presencia de una caña muy débil y por consiguiente susceptible a la tendadura (Paredes *et al.*, 2015). Posteriormente, luego de la consolidación del Programa de Mejoramiento Genético de Arroz (PMGA) del INIA, se lanza al mercado 8 nuevas variedades de arroz desarrolladas en Chile que incluyeron la introducción y evaluación de germoplasma de otros países. Actualmente, la oferta comercializadora por parte de los productores nacionales corresponde en un 60% a la variedad Zafiro-INIA, el 30% a la variedad Diamante-INIA, ambas de grano largo-ancho translúcido de muy buen rendimiento y calidad industrial, y un 10% de otras variedades de grano corto (Espinoza y Farías, 2017).

2.2.2 Fenología del arroz

El arroz es un cultivo anual por lo que su ciclo de crecimiento lo realiza en una temporada, del cual se destacan tres grandes fases de desarrollo: Vegetativa, Reproductiva y de Maduración. Dentro de la fase vegetativa se encuentra el estado fenológico de germinación, plántula, macollaje y elongación del tallo. En la fase reproductiva encontramos el estado fenológico de engrosamiento de la vaina, espigazón y floración. Por último, la fase de maduración engloba el estado fenológico de grano lechoso, grano pastoso y maduración como tal, hasta cosecha o senescencia de la planta (Garcés y Medina, 2018; FAO, 2003).

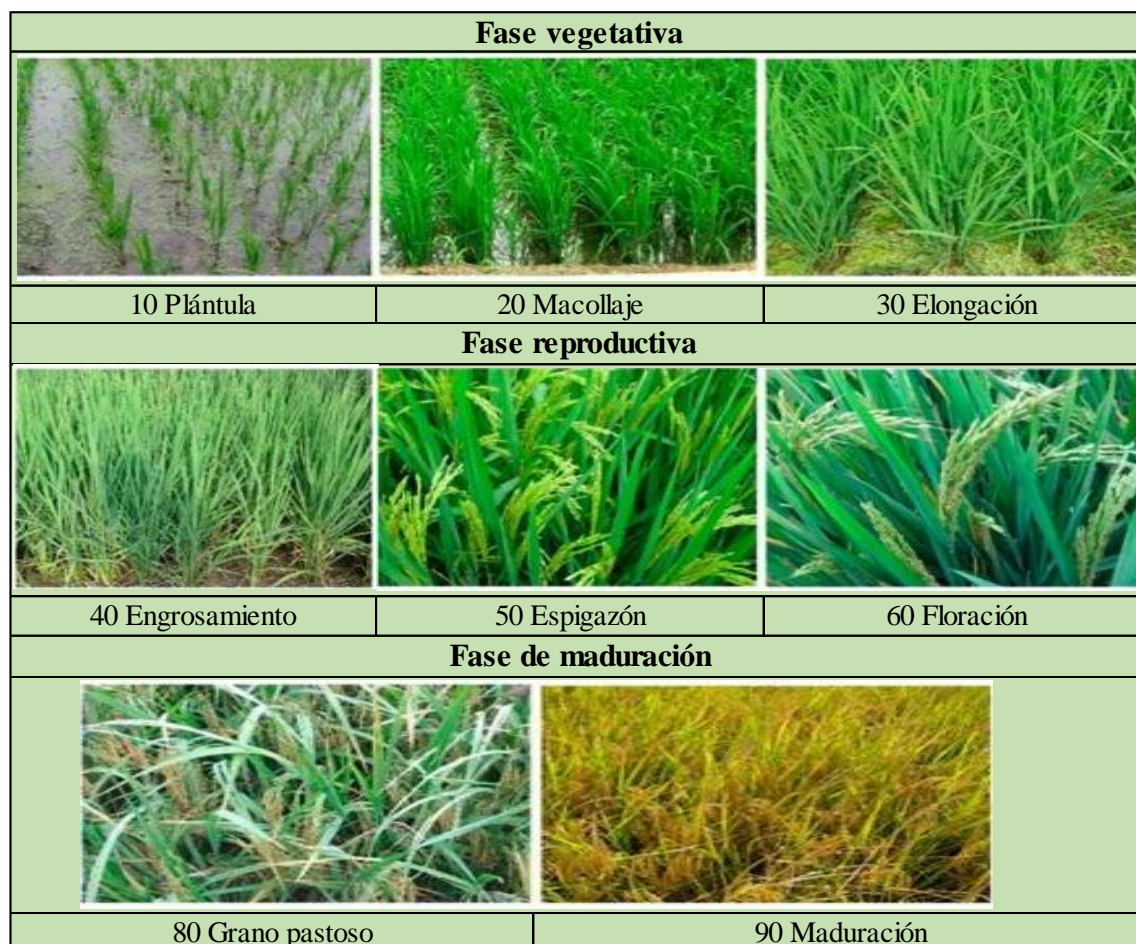


Figura 2.1: Estados fenológicos del arroz según escala BBCH. **Fuente:** Mandal et al., 2019.

2.3 Condiciones edafoclimáticas

En Chile se cultiva arroz en un sistema de producción generalmente sin rotaciones de cultivo, lo que genera “cansancio” de los suelos arroceros. Además, estos suelos que se caracterizan por ser de mal drenaje, debido al alto contenido de arcilla (16-42% en la estrata superficial) y bajo contenido de materia orgánica. Los agricultores en general realizan fertilizaciones con nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) para corregir las deficiencias nutricionales, aunque en casos muy específicos también pueden presentarse deficiencias en azufre, boro, calcio y zinc (Hidalgo, 2017; Alvarado, 2007).

En concordancia al párrafo anterior, también es necesario conocer la situación climática de las zonas arroceras de Chile para un adecuado establecimiento del cultivo. Según Alvarado y Hernaiz (2007), a grandes rasgos el clima es del tipo mediterráneo marino y templado, con noches frías, las cuales muchas veces pueden traer problemas en ciertas etapas fenológicas del arroz por la gran amplitud térmica registrada entre el día y la noche. Las precipitaciones se concentran en mayor proporción entre otoño e invierno y sin lluvias en verano prácticamente, pero pueden surgir lluvias inesperadas en primavera y tempranas en otoño que pueden dificultar ciertas labores del cultivo (preparación de suelo, siembra en seco y/p).

2.4 Manejo agronómico (Riego)

El arroz en Chile tradicionalmente se cultiva en un sistema de riego por inundación, que consiste en mantener el cultivo bajo una lámina de agua permanente durante todo su ciclo de desarrollo, utilizándose entre 14.000 a 18.000 m³ de agua por hectárea por temporada. Aproximadamente un 80 a 90% de la superficie utiliza el sistema de siembra al voleo de semilla pregerminada e inundación permanente (Hidalgo, 2017). Dentro de las ventajas de este método de riego, destaca la regulación de la temperatura ambiente de la planta, sobre todo disminuyendo el impacto de las temperaturas frías nocturnas (buffer

térmico). También, proporciona un mejor control de malezas y mejor rendimiento en las condiciones chilenas (Alvarado, 2007).

Para un adecuado desarrollo del cultivo de arroz y posterior rendimiento el agua es primordial bajo un sistema de riego por inundación permanente. Por lo tanto, según Alvarado (2007), es importante que los agricultores comiencen temprano el establecimiento del cultivo (inicio octubre) y así aprovechar la gran cantidad de agua a inicios de la temporada. La altura de agua desde siembra a macolla debe ser de 5 cm, esta altura estimula la formación de macollas, evitando planta débiles y alargadas. Ahora bien, desde el inicio hasta el termino de macolla, se debe mantener una lámina de agua no mayor a 10 cm de altura. Por otra parte, es necesario mantener la circulación moderada del agua, pero si las temperaturas medias son bajas de debe cortar esta circulación para permitir que el agua se caliente y se mantenga >15 °C, considerada como óptima para la fase vegetativa.

El agua durante la etapa reproductiva tiene la finalidad de proteger los primordios florales, por lo que la altura de la lámina de agua se debe ir aumentando poco a poco hasta una altura máxima de 30 cm, manteniéndose así hasta floración y también, durante toda la etapa de maduración. El momento del corte del agua va a depender si el suelo pierde lenta o fácilmente el agua, se recomienda al término de floración o cuando el grano está maduro respectivamente, cuidando siempre de no dejar el suelo seco durante los períodos de grano lechoso y llenado de granos (Alvarado, 2007).

2.5 Factores limitantes en la producción de arroz

Chile no está ajeno a los efectos negativos del cambio climático que se vienen evidenciando fuertemente durante los últimos años a nivel mundial, por lo que es importante conocer los factores limitantes que este fenómeno trae consigo para los sistemas productivos agrícolas y especialmente como afecta al cultivo del arroz. Según el Ministerio del Medio Ambiente (2021), Chile es considerado un país vulnerable al cambio

climático y en cuanto a las precipitaciones las localidades con mayores déficits en pluviometría se ubican desde Coquimbo a Biobío, con un promedio de -70%. A la fecha se registra más de 10 años consecutivos de precipitaciones deficitarias en comparación a un año normal, por lo que se habla de una mega-sequía.

Dentro del país se siembra arroz en un área promedio de 20 mil hectáreas donde se utiliza 2 mil 500 millones de m³ de agua por año y posee una huella hídrica que supera los 1.200 L kg⁻¹ de arroz producido (Paredes *et al.*, 2015). En los últimos años, en la producción de arroz se ha logrado reducir el consumo de agua al utilizar sistemas de siembra directa, generando ahorros de agua durante los primeros estadios de desarrollo de la planta. Sin embargo, debido a la escasez hídrica esto no es suficiente, la disponibilidad de agua se ha visto afectada en periodos que son críticos para la producción de la planta, los cuales son: en la etapa de floración, formación y llenado de grano (Hidalgo, 2017).

La producción de arroz más austral del mundo es justamente en Chile y por ello el agua juega un rol fundamental como “Buffer térmico”, es decir, regula la temperatura ambiente de la planta y evita que sufra daño por frío, especialmente por temperaturas nocturnas inferiores a los 12 °C. Estas temperaturas bajas afectan el desarrollo vegetativo y reproductivo de la planta de arroz. Sin embargo, las etapas más sensibles ocurren durante el desarrollo reproductivo en donde las temperaturas medias inferiores a 20 °C pueden causar pérdidas en el rendimiento sobre el 60% (Paredes *et al.*, 2015). Fundación Chile (2011), estimó que la persistencia de temperaturas ambientales inferiores a los 12 °C por más de 5 horas generaría esterilidad floral durante el inicio de la diferenciación del polen. Lo anterior se debe a que el polen se encuentra en etapa de microspora juvenil y no lograría desarrollarse completamente, quedando estéril (Paredes *et al.*, 2015).

Podemos adicionar otros factores limitantes atribuibles a las bajas temperaturas durante la fase reproductiva y de maduración del ciclo de desarrollo del arroz como: Madurez irregular por bajas temperaturas entre 12 °C y 18 °C durante la maduración y temperaturas menores a 15 °C demoran la iniciación de la panícula (FAO, 2003). Siguiendo con la idea anterior, se estima que durante una temporada fría la fecha de floración promedio se

incrementaría en 19 días en comparación a una temporada normal, indicando que la baja acumulación térmica afectaría la duración de la fase vegetativa del cultivo (Fundación Chile, 2011).

Por otra parte, se cree que el cambio climático ha generado una mayor ocurrencia del fenómeno de “la niña” en el territorio nacional y la FAO (2012) describe que: “La Organización Meteorológica Mundial define a “La Niña” como un enfriamiento anómalo de las temperaturas del océano en la región del Pacífico, lo que provoca fuertes bajadas de temperatura (heladas) acompañadas de fenómenos extremos como intensas lluvias o sequías prolongadas que pueden durar hasta 18 meses”. Como se mencionó anteriormente la zona central de Chile se encuentra cruzando por una mega-sequía, pero también en el último tiempo han ocurrido fenómenos extremos como lluvias, granizos y bajas de temperatura inesperadas.

Las lluvias inesperadas en la producción de arroz, principalmente en primavera (octubre) o a finales del verano/inicio de otoño (marzo-abril) traen problemas en el establecimiento del cultivo o en la cosecha, ya que para el ingreso de maquinaria es necesario que el suelo se encuentre seco. Según FIA (2018), “cuando los suelos están saturados de agua, la automotriz, carro cerealero o catango se entierran y dejan huellas con profundidades de 20 a 50 cm. En esos casos, la fuerza motriz producida por la automotriz se destina a la tracción de las ruedas en vez de la cosecha del grano. Además, al dejar las huellas en los potreros, necesariamente justo después deben efectuarse trabajos de nivelación y movimiento de suelos, lo que aumenta los costos de producción”. Adicionalmente, lluvias inesperadas cercanas a la cosecha pueden causar la tendadura de las plantas de arroz, dificultando aún más la cosecha mecanizada y también, en cuanto a la siembra si se dificulta el ingreso de maquinaria, este retraso en el establecimiento del cultivo puede ocasionar que las plantas sufran un riesgo de ser dañadas por temperaturas bajas en la fase reproductiva (primera quincena de marzo).

2.6 Nuevas estrategias para la producción de arroz

2.6.1 Variedades de ciclo corto y riego por intermitencia

Teniendo en cuenta todos los factores limitantes para la producción de arroz en Chile es necesario que los agricultores cuenten con variedades de ciclo más corto como alternativa a las variedades tradicionales utilizadas actualmente. Las variedades de ciclo corto podrían hacer frente a los problemas de baja disponibilidad hídrica (más tolerantes a la sequía), con capacidades de mayor tolerancia al frío en etapa vegetativa y reproductiva de la planta, además de una mayor flexibilidad en los periodos de siembra (Hidalgo, 2017, Paredes *et al.*, 2015). Según Salazar (2020), tanto la variedad tradicional Zafiro (ciclo largo) como una variedad híbrida de ciclo intermedio presentaron una recuperación lenta de su actividad fotosintética, después de pasar por una cierta restricción hídrica al aplicar una estrategia de riego por intermitencia, en comparación a 3 variedades de ciclo corto evaluadas en su investigación. Esto demuestra que las variedades de ciclo corto presentan una mejor respuesta a condiciones de restricción hídrica.

Ahora bien, siguiendo con la idea del punto anterior es fundamental aprovechar la capacidad de tolerancia a la escasez hídrica de las variedades de ciclo corto y producirlas bajo un sistema de riego por intermitencia, reduciendo considerablemente el consumo de agua del cultivo de arroz. Según Paredes *et al.*, (2015), investigaciones en Uruguay indican que la productividad del agua al realizar un manejo de riego intermitente aumenta entre 27% y 40% en relación con el riego por inundación o continuo, permitiendo un ahorro en el consumo de agua entre un 20% a un 30%.

Este tipo de variedades al poseer un ciclo más acotado (mayor precocidad) permitiría que el cultivo se desarrolle durante los meses más favorables para su óptimo crecimiento, ya sea para aprovechar la disponibilidad de agua temprano en la temporada o evitar el frío nocturno al final de su desarrollo durante la etapa reproductiva, ya que la floración ocurre normalmente durante la segunda quincena de enero, pero si hay una baja acumulación térmica se atrasará hasta febrero, incrementando la probabilidad de temperaturas

nocturnas bajas (Fundación Chile, 2011). Como se ha mencionado anteriormente las temperaturas frías (<12-15 °C) en el cultivo de arroz provocan aborto floral, impactando los componentes del rendimiento como el número de granos vanos por panícula. Debido a esto se hizo un estudio en la comuna de Retiro, VII región, en donde se obtuvo que las variedades de ciclo corto presentaron valores más bajos de granos vanos frente a variedades de ciclo largo e intermedio, con un porcentaje de esterilidad floral no mayor a 35% en variedades de ciclo corto y sobre 45% en variedades de ciclo intermedio y largo, mostrando que las variedades de ciclo corto poseen mayor tolerancia a las bajas temperaturas que las variedades tradicionales chilenas en condiciones de riego por intermitencia (Salazar, 2020). A su vez, en el mismo estudio se observó que variedades de ciclo corto (ALM-103) duplicó en número de panículas/m² a la variedad tradicional Zafiro, con 911 y 370 panículas/m² respectivamente. Además, se obtuvieron diferencias significativas en el número de granos llenos por panícula, siendo una variedad de ciclo corto (Sandora L-42) la que presentó mejores resultados según Salazar (2020), todo esto siempre acompañado de un sistema de riego por intermitencia.

2.7 Evaluación fisiológica y componentes del rendimiento en arroz

2.7.1 Fisiología de la planta

Las formas de medir la respuesta fisiológica de la planta son a través de la Conductancia Estomática (g_s), Tasa de Respiración (T_r) y Tasa de Asimilación neta (A_n). Estos parámetros de intercambio gaseoso y su efecto sobre la eficiencia instantánea del uso de agua son herramientas importantes para seleccionar nuevas variedades o genotipos de plantas con un mejor comportamiento al estrés hídrico (Pardos, 2007). Sin embargo, los valores más favorables de estos parámetros dependen de la especie, edad e interacciones con su medio ambiente. Un ejemplo de ello; es g_s que disminuye al cerrarse los estomas a medida que aumenta la restricción hídrica, provocando en paralelo una disminución en A_n (Medrano *et al.*, 2002). Debido a esto, las mediciones de intercambio gaseoso se hacen al medio día, cuando se produce la mayor saturación de luz,

correlacionándola con la g_s media diaria promedio, porque a medida que la disponibilidad de agua disminuye la conductancia estomática máxima disminuye, acercándose a los valores que se presentan durante las primeras horas de la mañana (Medrano *et al.*, 2002), como también las demás variables de intercambio gaseoso.

2.7.2 Componentes del rendimiento

El rendimiento en arroz está determinado por los siguientes componentes: Número de plantas por superficie (plantas m^{-2}), Número de macollos por superficie (macollos m^{-2}), Número de panículas por superficie (panículas m^{-2}), Número de granos por panícula (granos panícula⁻¹) y Peso de grano (gr) (FIA, 2018; Fundación Chile, 2011).

Según FIA (2018), el n° de plantas por superficie depende de una serie de aspectos como dosis de semillas por ha, porcentaje de germinación, pureza y de varios manejos durante el establecimiento del cultivo (Ej.: humedad del suelo). Un rango óptimo para un buen rendimiento bajo un sistema de siembra directa es de 200-250 plantas m^{-2} . Además, de que el n° de macollos m^{-2} y peso de grano dependen de los niveles de agua (altura lámina) y disponibilidad de agua, respectivamente.

El número de granos por panícula está determinado en gran parte por las temperaturas bajas, ya que esta condición ambiental durante la etapa de reducción-división y anthesis, principalmente en la etapa de primordio floral pueden inducir a la esterilidad del polen (FAO, 2003) y en consecuencia se obtiene un mayor número de granos vanos por panícula.

Por último, según estudios realizados por el INIA demostraron que el arroz debe ser cosechado entre 18 y 24% de humedad en granos para así obtener mejores rendimientos industriales (Hernaiz y Alvarado, 2008).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Sitio experimental

El estudio fue realizado durante la temporada 2020/2021 en un huerto comercial llamado “El Almendro”, ubicado en la comuna de Retiro, Región del Maule, Chile ($35^{\circ}57'S$ $71^{\circ}41'O$).



Figura 3.1: Imagen satelital del Fundo “El Almendro”, comuna de Retiro, VII región, Chile, en las coordenadas ($35^{\circ}57'28''S$ $71^{\circ}47'20''O$) donde se realizó el ensayo.

3.1.1 Características del clima

El clima de la zona es templado del tipo mediterráneo, que consta de un período seco y uno lluvioso, con cuatro estaciones del año bien marcadas. El 60% de las precipitaciones se concentran durante junio-julio-agosto con un total de 676 mm anuales promedio aproximadamente. En cuanto a las temperaturas se considera un clima templado ya que los meses más fríos alcanzan en promedio temperaturas medias de $8^{\circ}C$ y mínimas que oscilan entre $3-4^{\circ}C$, mientras que durante el verano las máximas alcanzan los de los 29 y $31^{\circ}C$ (Figura 3.2). Adicionalmente, la zona central de la Región del Maule se clasifica como Csb por el sistema Köppen-Geiger, que describe un clima templado cálido con lluvias invernales predominantemente.

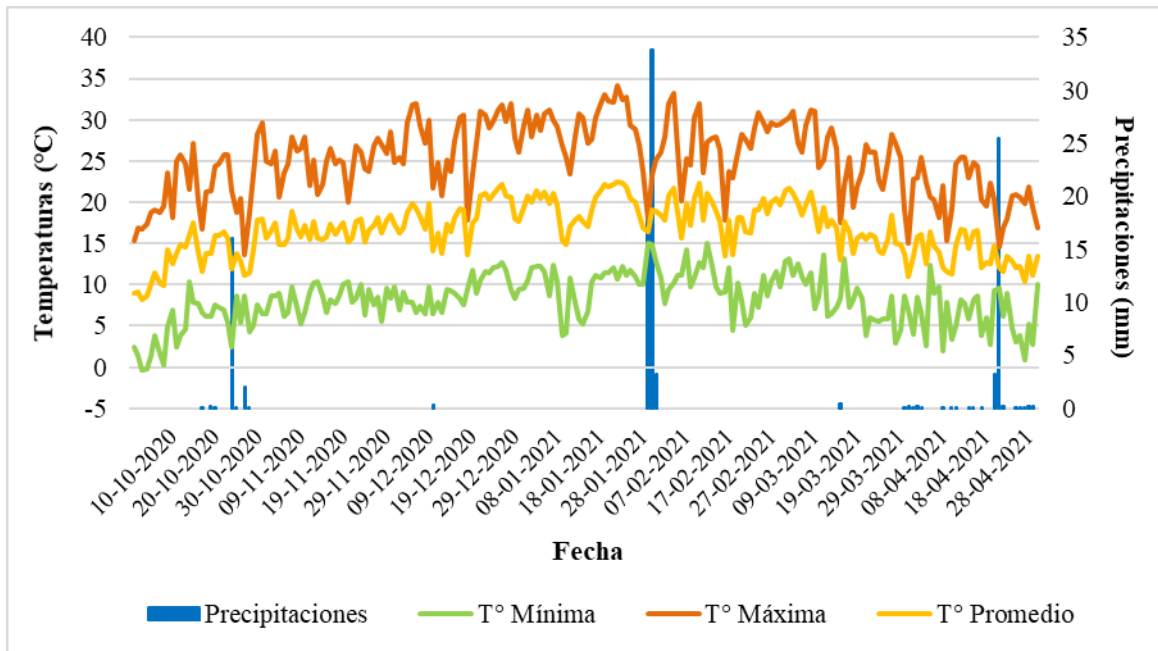


Figura 3.2: Temperaturas promedio, mínimas, máximas y pluviometría entre los meses de octubre y abril de la temporada 2020-2021.

3.1.2 Características del suelo

La serie de suelo en el sitio experimental se denomina Quella (Símbolo cartográfico: QLA); perteneciente al orden Vertisol, caracterizado por suelos delgados a moderadamente profundos, de textura superficial franco-arcillosa y arcillosa en profundidad, de topografía plana, drenaje imperfecto, permeabilidad lenta y escurrimiento superficial muy lento. Su material parental corresponde a arcillas que han evolucionado sobre tobas volcánicas a mixtas (Stolpe, 2006; Santis, 2005: IREN 1964). En los suelos de drenaje imperfecto (clase de drenaje 3) el agua es removida lentamente del suelo, lo que permite mantenerlos húmedos por largos períodos, pero no permanentemente. Presentan niveles freáticos muy altos a casi superficial en invierno, bajando en primavera (Stolpe, 2006; CIREN, 1997).

3.2 Diseño experimental

Para el ensayo se implementó un diseño en bloques completamente al azar debido a la alta variabilidad del suelo (profundidad y fertilidad) en sentido N → S. Estos a su vez se subdividieron en 4 parcelas o unidades experimentales (una por variedad), las que contaron con una superficie aproximada de 15 m² (3x5 m) cada una. Por lo tanto, por cada bloque se implementó una repetición y con un total de 3 repeticiones para cada una de las variedades evaluadas. Para la preparación del suelo se utilizó una rastra de disco, una nivelación láser del terreno a cota cero y aplicaciones de herbicidas pre-emergentes para el control de malezas específicas en arroz. Luego, se procedió a la siembra en seco con una maquina sembradora y una aplicación de fertilización base estándar de NPK.

Cuadro 3.1: Identificación de variedades de arroz implementadas en el estudio y sus correspondientes ciclos vegetativos.

N° Variedad	Nombre Variedad	Ciclo Vegetativo
V1	Zafiro	Largo
V2	Híbrido 1	Intermedio
V3	Esfera	Intermedio
V4	Loto	Corto

Este experimento fue replicado en dos condiciones de manejo hídrico, (i) riego inundado optimizado y (ii) riego por intermitencia. En el riego inundado optimizado se mantuvo una lámina de agua permanente durante todo el desarrollo del cultivo desde siembra, con distintos niveles de agua de acuerdo con la forma tradicional de riego descrita en la sección 2.4 de este documento. Sin embargo, la estrategia de riego optimizado se diferencia del tradicional al no estar el agua circulando constantemente en el cuadro de arroz, sino que se mantiene aposada dentro del cuadro productivo sin un desagüe, solo con una entrada de agua funcionando cuando es necesario elevar el nivel de la lámina de riego, ya sea por su disminución o porque es necesario aumentarlo según el estado fenológico

en que se encuentren las plantas de arroz. Durante toda la temporada en promedio se utilizaron 8.000 m³ de agua, de acuerdo a las mediciones realizadas con caudalímetro.

En el sistema de riego por intermitencia se comienza de la misma forma con una lámina de agua permanente desde siembra, pero una vez que la planta alcanza de 3 a 4 hojas verdaderas se deja que el espejo de agua se evapore y/o infiltre hasta capacidad de campo, para luego reponer una lámina de agua de 50 mm, repitiendo este proceso una y otra vez, con una frecuencia de riego que se determina de acuerdo a las condiciones medio ambientales del suelo y clima de la zona. Posteriormente, desde el término de macolla o durante el periodo de primordio floral se vuelve a implementar el sistema de riego por inundación permanente con una altura de agua de 200 mm, hasta días después de floración, para mantener una lámina de agua en maduración del grano y el suelo seco durante la cosecha. Durante toda la temporada se utilizaron 11.000 m³, de acuerdo a las mediciones realizadas con caudalímetro.



Figura 3.3: Fotografía de distribución espacial del diseño experimental.

3.3 Mediciones de campo

Para caracterizar la respuesta fisiológica de las variedades en ambas condiciones de manejo hídrico, se midieron variables de intercambio gaseoso: Conductancia estomática

(g_s ; $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), Tasa transpiratoria (Tr ; $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) y Tasa de asimilación neta (A_n , $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) con un equipo medidor de intercambio de gases portátil (Li-6800 LI-COR). Estas mediciones se llevaron a cabo durante el mediodía solar (horario 12 a 14 pm); en hojas maduras de plantas sanas completamente expuestas a la radiación solar incidente.

Para evaluar los componentes del rendimiento en arroz a cosecha se realizaron mediciones del Número de Panículas (NP) y Número de Tallos (NT) por metro lineal, Largo de tallos (LT), Peso seco de tallos (PST) y Peso de mil granos (PMG) en una superficie aproximada de 1 m^2 . Además, del Número de Granos Vanos (NGV) y Número de Granos Llenos (NGLL) de 5 panículas. Se utilizaron instrumentos y equipos de medición de masa, cintas métricas y un horno de aire forzado.

3.4 Análisis estadístico

Para comprender la variabilidad y las grandes tendencias entre las variables y los tratamientos (grado de correlación), se realizó un análisis de componentes principales (ACP) a través del software estadístico XLSTAT de Excel 2016.

Para evaluar los datos obtenidos de las mediciones realizadas se utilizó el software Statgraphics Centurion-19, llevando a cabo un Análisis de Varianza (ANDEVA) con un Intervalo de Confianza del 95% ($P \leq 0,05$). En cuanto a la verificación de la homogeneidad de la varianza se utilizó el Test de Levene ($P < 0,05$). Además, se realizó una prueba para comparación múltiple de medias (Tukey $< 0,05$).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis estadístico descriptivo

En la figura 4.1 se presenta un análisis de componentes principales (ACP), que muestra una vista general de los factores (tipo de riego y variedades) y variables fisiológicas de intercambio gaseoso y de rendimiento evaluadas durante el estudio, como también sus correlaciones.

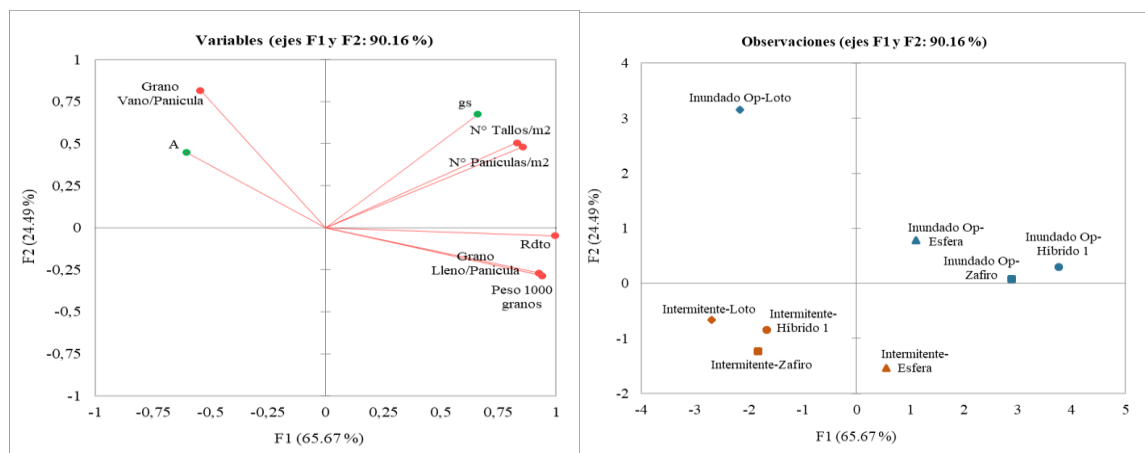


Figura 4.1: Análisis de componentes principales para la totalidad de los datos recopilados en el estudio; en los dos tipos de riego, las cuatro variedades de arroz y variables fisiológicas y de rendimiento evaluadas.

La figura 4.1 representa el 90,16% del total de la variabilidad de los datos analizados en los ejes F1 y F2, los cuales a su vez representan el 65,67% y 24,49%, respectivamente. En el lado izquierdo de la figura 4.1 se observa una alta correlación entre las variables de Grano lleno/Panícula, Peso de 1000 granos y Rendimiento, las que a su vez se correlacionan de manera inversa o negativa con las variables de Grano Vano/Panícula y Tasa de asimilación neta (A_n). Por otro lado, también se observa una correlación positiva entre las variables de N° tallos/m², N° Panículas/m² y Conductancia estomática (g_s), es decir, al aumentar la g_s también se esperaría que aumente el N° tallos/m² y el N°

Panículas/m². Asimismo, se observa un mayor número de tallos y números de panículas por unidad de superficie.

Dentro del círculo de correlación se encuentran mejor representadas por el eje F1 las variables de Grano lleno/Panícula, Peso de 1000 granos y Rendimiento, las que como se mencionó anteriormente se correlacionan positivamente entre sí, esto ejemplifica muy bien que al aumentar o disminuir los Granos llenos/Panícula y el Peso de 1000 granos influirían directamente sobre el rendimiento final de las diferentes variedades de arroz evaluadas en esta investigación. Adicionalmente, se puede observar que las variables se correlacionan inversamente con los Granos vanos/Panícula y Tasa de asimilación neta, es de esperar que mientras más Granos vanos/Panícula se observen, se obtendrán menos Granos llenos/Panícula, afectando negativamente el rendimiento final del arroz (kg/ha).

Adicionalmente, en el ACP se observa como la variedad de ciclo corto Loto en el sistema de riego por inundación optimizado se correlaciona directamente con la variable Grano vano/Panícula. Al respecto, podemos observar que al combinar esta variedad con este método de riego (inundado optimizado) se observan altos valores de Granos vanos/Panícula, traduciéndose en un rendimiento de grano más deficiente por unidad de superficie. Por el contrario, en el sistema de riego por intermitencia el Híbrido 1, Loto y Zafiro no mostraron una buena correlación con las variables de intercambio gaseoso y de componentes del rendimiento.

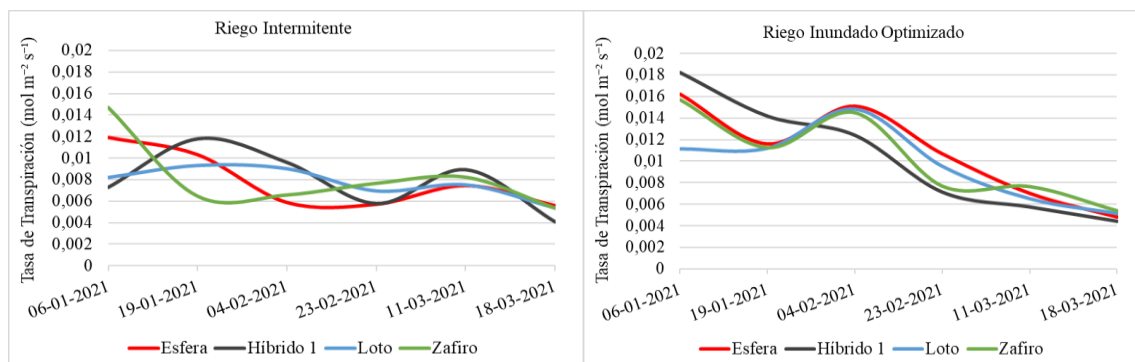
En cuanto a Híbrido 1, Esfera y Zafiro sometidas a un manejo de riego inundado optimizado se observa que están correlacionadas positivamente con las variables fisiológicas de conductancia estomática y con los componentes del rendimiento (N° tallos/m², N° panículas/m², Grano lleno/Panícula, Peso de 1000 granos y Rendimiento). Asimismo, es muy interesante observar que Esfera fue la única variedad manejada en condiciones de riego por intermitencia que mostró una correlación positiva con las variables antes mencionadas (Grano lleno/Panícula, Peso de 1000 granos y Rendimiento). Así, el ACP muestra como esta variedad de ciclo intermedio es la que presentó los mejores resultados bajo condiciones de estrés hídrico y bajas temperaturas (< 12°C).

Carrijo *et al.*, 2017 al realizar un meta-análisis informó que en varios estudios observó tratamientos con rendimientos significativamente altos en arroz, pero ninguno atribuible a la implementación del riego por intermitencia. Sin embargo, específicamente durante la fase de llenado de grano puede aumentar el rendimiento bajo un sistema de riego por intermitencia controlado, ya que esta técnica podría acelerar la senescencia de la planta de arroz, generando una mejor y más rápida removilización de carbono hacia los granos, aumentando de esta manera la tasa de llenado, permitiendo así que la planta de arroz pueda madurar antes de que ocurran condiciones adversas (Li *et al.*, 2016; Yang y Zhang, 2006) Además, de un aumento de biomasa y actividad metabólica de las raíces (Yang *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2016).

4.2 Análisis fisiológico

4.2.1 Tasa de transpiración

En la figura 4.2 se presenta el desempeño transpiratorio de la planta. Al respecto, se muestra la interacción entre distintas variedades de arroz y las estrategias de riego implementadas en el ensayo. Como observación general las variedades mostraron un desempeño diferenciador bajo el sistema de riego por intermitencia, más que en el sistema de riego por inundación optimizado. También, en el riego por inundación optimizado se observó un descenso mucho más notorio en la Tr entre el inicio y el final del periodo de estudio, que fue mucho más marcado que en el sistema de riego por intermitencia.



Riego Intermitente

	06-01-21	19-01-21	04-02-21	23-02-21	11-03-21	18-03-21
Esfera	0,012	0,009	0,006	0,006	0,007	0,006
Híbrido 1	0,007	0,012	0,009	0,006	0,009	0,004
Loto	0,008	0,009	0,009	0,007	0,008	0,005
Zafiro	0,015	0,006	0,007	0,008	0,008	0,005
Valor-p	0,28	0,24	0,75	0,84	0,66	0,65
Significancia	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s

Riego Inundado Optimizado

	06-01-21	19-01-21	04-02-21	23-02-21	11-03-21	18-03-21
Esfera	0,016	0,012	0,015	0,011	0,007	0,005
Híbrido 1	0,018	0,014	0,012	0,007	0,006	0,004
Loto	0,011	0,011	0,015	0,009	0,007	0,005
Zafiro	0,016	0,011	0,015	0,008	0,008	0,005
Valor-p	0,09	0,71	0,45	0,55	0,67	0,80
Significancia	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s

Figura 4.2: Gráfico de valores de tasa de transpiración de 4 variedades de arroz en 6 fechas de medición para 2 tipos de riego, junto con análisis de varianza de tasa de transpiración por fechas de medición para cada tipo de riego. Letras distintas, indica diferencias entre los tratamientos. * valor-p < 0.05; ** valor-p < 0.01; n.s, no significativo.

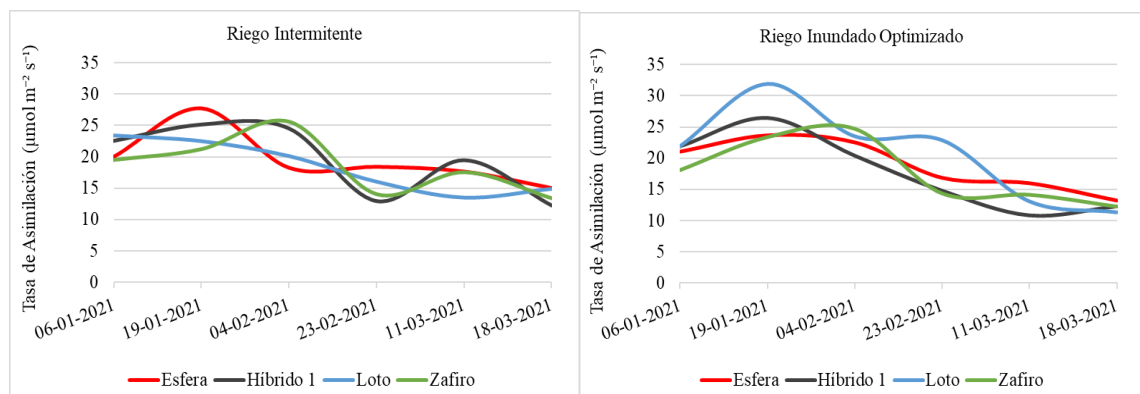
En el tratamiento de riego por intermitencia la variedad de ciclo largo Zafiro presentó inicialmente la mayor tasa transpiratoria con $0,015 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, para posteriormente sufrir una abrupta caída, quedando por debajo de las variedades de ciclo corto e intermedio. Al

respecto, el Híbrido 1 fue la variedad que mostró las mayores alzas durante el período con medias de $0,0012$ y $0,009 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Sin embargo, esta misma variedad bajo el sistema de riego por inundación optimizado, presentó un desempeño completamente diferente, iniciando por encima del resto de las variedades con valores de $0,018 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para luego quedar por debajo del resto de las variedades desde el 04 de febrero, cuando las variedades restantes tuvieron una mejor respuesta, de hasta $0,015 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Aunque los gráficos de tendencias en la figura 4.2 presentaron diferencias marcadas entre las medias, el análisis de varianza no presentó diferencias estadísticas significativas en la tasa transpiratoria de las variedades evaluadas en ninguno de los dos tipos de riego implementados, debido a la alta variabilidad observada en la tasa transpiratoria para una de las variedades evaluadas.

4.2.2 Tasa de asimilación neta

Al igual que en el caso anterior, en la figura 4.3, para la variable de tasa de asimilación, en el sistema de riego por intermitencia todas las variedades evaluadas mostraron un comportamiento más heterogéneo durante todo el periodo de estudio, que lo observado en el sistema de riego por inundación optimizado. Lo anterior estaría indicando que un sistema de manejo hídrico más restrictivo estaría generando una mayor variabilidad de los datos, debido a la presencia de posibles mecanismos fisiológicos adaptados para enfrentar una situación medioambiental más limitante (estrés hídrico y/o bajas temperaturas).



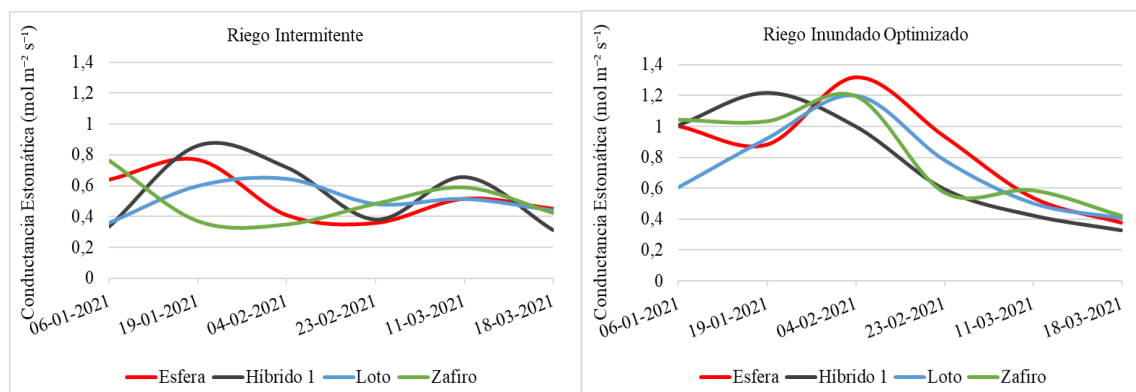
Riego Intermitente						
	06-01-21	19-01-21	04-02-21	23-02-21	11-03-21	18-03-21
Esfera	19,96	27,68	18,22	18,37	17,62	14,97
Híbrido 1	22,52	25,11	24,49	12,96	19,45	12,26
Loto	23,39	22,49	20,12	16,05	13,52	14,91
Zafiro	19,53	21,24	25,63	14,08	17,57	13,42
Valor-p	0,74	0,53	0,16	0,44	0,32	0,89
Significancia	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s
Riego Inundado Optimizado						
	06-01-21	19-01-21	04-02-21	23-02-21	11-03-21	18-03-21
Esfera	21,10	23,73	22,59	16,87	16,00	13,20
Híbrido 1	21,96	26,51	20,45	14,84	10,88	12,34
Loto	21,93	31,92	23,49	22,88	13,05	11,29
Zafiro	18,09	23,35	24,69	14,35	14,13	12,24
Valor-p	0,81	0,05	0,86	0,08	0,69	0,95
Significancia	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s

Figura 4.3: Gráfico de valores de tasa de asimilación de 4 variedades de arroz en 6 fechas de medición para 2 tipos de riego, junto con análisis de varianza de tasa de asimilación por fechas de medición para cada tipo de riego. Letras distintas, indica diferencias entre los tratamientos. * valor-p < 0.05; ** valor-p < 0.01; n.s, no significativo.

Por su parte, la variedad de ciclo intermedio Esfera fue la que mostró el primer y mayor valor en la tasa de asimilación neta en condiciones de manejo hídrico por intermitencia con una media de 27,68 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, siendo además la variedad que se mantuvo ligeramente más estable bajo el sistema de riego por inundación optimizado. Siguiendo con el riego por intermitencia, Zafiro e Híbrido 1 se comportaron de manera similar entre ellos y la variedad de ciclo corto Loto fue la que presentó el comportamiento más homogéneo en el tiempo. Asimismo, Loto en condiciones de riego por inundación optimizado fue la variedad que alcanzó los mayores valores de A_n con medias entre 31,92 y 22,88 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Por último, para esta variable el análisis de varianza no mostró diferencias estadísticamente significativas entre las variedades y los tratamientos de riego aplicados.

4.2.3 Conductancia estomática



Riego Intermitente

	06-01-21	19-01-21	04-02-21	23-02-21	11-03-21	18-03-21
Esfera	0,64	0,77	0,41	0,36	0,52	0,45
Híbrido 1	0,34	0,86	0,71	0,38	0,66	0,31
Loto	0,36	0,59	0,64	0,48	0,51	0,44
Zafiro	0,76	0,37	0,35	0,48	0,51	0,42
Valor-p	0,27	0,14	0,71	0,91	0,65	0,69
Significancia	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s

Riego Inundado Optimizado

	06-01-21	19-01-21	04-02-21	23-02-21	11-03-21	18-03-21
Esfera	1,00	0,88	1,32	0,93	0,54	0,37
Híbrido 1	1,00	1,22	0,99	0,59	0,43	0,33
Loto	0,61	0,92	1,20	0,78	0,50	0,41
Zafiro	1,04	1,03	1,19	0,57	0,59	0,42
Valor-p	0,15	0,75	0,75	0,54	0,77	0,79
Significancia	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s

Figura 4.4: Gráfico de valores de conductancia estomática de 4 variedades de arroz en 6 fechas de medición para 2 tipos de riego, junto con análisis de varianza de conductancia estomática por fechas de medición para cada tipo de riego. Letras distintas, indica diferencias entre los tratamientos. * valor- $p < 0.05$; ** valor- $p < 0.01$; n.s, no significativo.

En la figura 4.4 se observa, que bajo el sistema de riego por intermitencia las variedades de ciclo intermedio y corto mostraron las mayores alzas tempranas en la conductancia estomática y, por el contrario, la variedad de ciclo largo como Zafiro fue la que presentó los valores iniciales más bajos, para posteriormente mostrar un alza tardía durante la temporada. El Híbrido 1 fue la variedad con los mayores valores de conductancia estomática con medias entre $0,86$ y $0,66 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, además de que esta variedad de ciclo intermedio mostró nuevamente un mejor comportamiento fisiológico bajo el sistema de riego por intermitencia, mostrando también una respuesta fisiológica más deficiente en el sistema de riego por inundación optimizado en comparación a las demás variedades de arroz. Bajo el sistema de riego por inundación optimizado, Esfera fue la variedad que alcanzó el mayor valor de g_s con una media de $1,32 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, y en general la mayor parte del periodo mostró una mejor tendencia en su comportamiento en comparación con la variedad tradicionalmente utilizada (Zafiro) en Chile en condiciones de riego por inundación.

Según Song *et al.* (2020), el potencial hídrico del suelo alcanzó hasta -15 kPa bajo un sistema riego por intermitencia, en donde la tasa fotosintética, la tasa de transpiración y la conductancia estomática disminuyeron significativamente, aumentando el contenido de ácido abscísico y eficiencia del uso del agua.

Finalmente, a pesar de las tendencias observadas en las figuras 4.2, 4.3 y 4.4, el ANDEVA mostró que los valores ponderados de los datos obtenidos durante el periodo comprendido en este estudio no mostraron diferencias estadísticas significativas en las variables fisiológicas evaluadas entre las variedades de arroz por tipo de riego. Sin embargo, en el siguiente ítem 4.2.4 se observaron diferencias estadísticas significativas

entre las variables para Tipos de riego y Fechas, como también en la interacción de ambos factores.

4.2.4 Análisis multifactorial

Cuadro 4.1: Análisis multifactorial entre variables fisiológicas y tratamientos del ensayo (Tipo de riego, Variedad y Fecha de medición).

Factores	Variables		
	Tasa de Transpiración (mol m ⁻² s ⁻¹)	Tasa de Asimilación (μmol m ⁻² s ⁻¹)	Conductancia Estomática (mol m ⁻² s ⁻¹)
Factor A: Tipo de Riego			
R. Intermitente	0,0079 a	18,9820 a	0,5175 a
R. Inundado Op.	0,0104 b	18,8352 a	0,7886 b
Valor-p	0,00	0,86	0,00
Significancia	**	n.s	**
Factor B: Variedad			
Esfera	0,0094	19,2044	0,6852
Híbrido 1	0,0091	18,6486	0,6529
Loto	0,0087	19,5875	0,6218
Zafiro	0,0093	18,1940	0,6523
Valor-p	0,83	0,63	0,83
Significancia	n.s	n.s	n. s
Factor C: Fecha			
06-ene-21	0,0129 c	21,0613 b	0,7198 bc
19-ene-21	0,0108 c	25,2717 c	0,8350 c
04-feb-21	0,0110 c	22,4606 bc	0,8540 c
23-feb-21	0,0076 b	16,2976 a	0,5736 ab
11-mar-21	0,0074 ab	15,2784 a	0,5409 ab
18-mar-21	0,0050 a	13,0820 a	0,3948 a

Valor-p	0,00	0,00	0,00
Significancia	**	**	**
Factor D: Bloque			
Valor-p	0,24	0,87	0,22
Significancia	n.s	n.s	n.s
Sig. Interacciones			
AxB	n.s	n.s	n.s
AxC	**	n.s	**
BxC	n.s	n.s	n.s
AxBxC	n.s	n.s	n.s

Letras distintas, indica diferencias entre los tratamientos. * valor-p < 0.05; ** valor-p < 0.01; n.s, no significativo.

Como resultado del análisis multifactorial, no se observaron diferencias estadísticas significativas por Variedad en ninguna de las tres variables fisiológicas evaluadas (Tr , A_n y g_s). Sin embargo, se observaron diferencias altamente significativas en la tasa de transpiración y conductancia estomática según el tipo de riego, pero no así en la tasa de asimilación neta. En cambio, para cada una de las tres variables fisiológicas evaluadas se observaron diferencias altamente significativas entre las 6 fechas de medición; 2 fechas en el mes de enero, febrero y marzo. Esto puede deberse a condiciones climáticas distintas (figura 3.2) y diferentes estados fenológicos de las plantas, entre las fechas de medición.

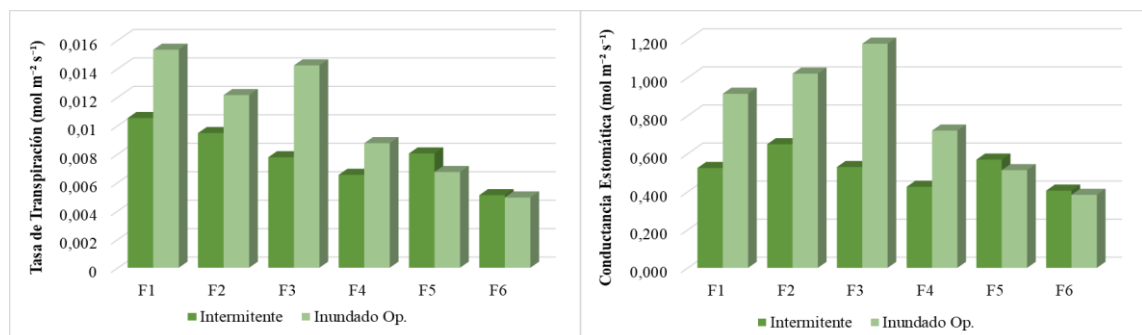


Figura 4.5: Gráfico de interacción significativa entre tipo de riego y fecha de medición, de las variables Tr y g_s .

Por otra parte, la interacción entre los factores en su mayoría no mostró diferencias estadísticas significativas, a diferencia de la interacción AxC para las variables de Tr y g_s. Esto muestra que se obtuvieron diferencias para la tasa de transpiración y conductancia estomática según el tipo de riego en relación a las fechas de medición, concretamente las plantas presentaron una mejor respuesta en las tres primeras fechas (6-ene, 19-ene, 04-feb) especialmente en el sistema de riego inundado optimizado, y como se puede observar en la figura 4.5 en la fecha 4, 5 y 6 se pierden estas diferencias entre los dos tipos de riego. Por último, se observó que las tres primeras fechas coinciden con las temperaturas más altas registradas durante la temporada; con T° máx. de 31 a 33°C que pudieron favorecer la evapotranspiración de las plantas de arroz, y con un evento de precipitaciones estivales de más de 50 mm registradas antes del 4 febrero del 2021, estas condiciones climáticas (figura 3.2) pudieron incidir en una mayor Tr y por consiguiente a una mayor conductancia estomática (figura 4.5).

El cuadro 4.2 muestra específicamente las fechas en que los tipos de riego presentan diferencias significativas (*) y altamente significativas (**). Al respecto, se observan diferencias de tasa de transpiración entre los dos sistemas de riego específicamente en la fecha del 06 de enero y 04 de febrero del año 2021, siendo esta última la más significativa. Mientras que la conductancia estomática mostró diferencias estadísticas significativas en las primeras cuatro fechas; 06 de enero, 19 de enero, 04 de febrero y 23 de marzo del 2021.

Cuadro 4.2: Comparación de variables fisiológicas en cada fecha de medición según tipo de riego.

Tasa de Transpiración (mol m ⁻² s ⁻¹)						
	06-01-21	19-01-21	04-02-21	23-02-21	11-03-21	18-03-21
R. Intermitente	0,011 a	0,010 a	0,008 a	0,007 a	0,008 a	0,005 a
R. Inundado Op.	0,015 b	0,012 a	0,014 b	0,009 a	0,007 a	0,005 a
Valor-p	0,0199	0,0642	0,0001	0,0841	0,0637	0,7667
Significancia	*	n.s	**	n.s	n.s	n.s

Tasa de Asimilación neta ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)						
	06-01-21	19-01-21	04-02-21	23-02-21	11-03-21	18-03-21
R. Intermitente	21,35 a	24,13 a	22,12 a	15,36 a	17,04 a	13,89 a
R. Inundado Op.	20,77 a	26,62 a	22,81 a	17,23 a	13,52 a	12,27 a
Valor-p	0,7737	0,2488	0,7465	0,3239	0,0615	0,3322
Significancia	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s

Conductancia Estomática ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)						
	06-01-21	19-01-21	04-02-21	23-02-21	11-03-21	18-03-21
R. Intermitente	0,52 a	0,65 a	0,53 a	0,43 a	0,57 a	0,41 a
R. Inundado Op.	0,91 b	1,03 b	1,18 b	0,72 b	0,51 a	0,38 a
Valor-p	0,0035	0,0152	0,0004	0,0183	0,4056	0,6791
Significancia	**	*	**	*	n.s	n.s

Letras distintas, indica diferencias entre los tratamientos. * valor-p < 0.05; ** valor-p < 0.01; n.s, no significativo.

4.3 Componentes del rendimiento

En el cuadro 4.3 se presenta un análisis multifactorial con la finalidad de buscar diferencias estadísticamente significativas entre los componentes del rendimiento para los diferentes sistemas de riego y variedades de arroz evaluadas durante el ensayo, como también analizar la posible existencia de interacciones entre los factores analizados.

Cuadro 4.3: Análisis multifactorial entre componentes del rendimiento y tratamientos del ensayo (Tipo de riego y Variedad).

Factores	Variables			
	N° Tallos/m ²	N° Panículas/m ²	Largo tallo (cm)	Peso tallo (gr/m ²)
Factor A: Tipo de Riego				
R. Intermitente	692,13 a	618,86 a	198,79	498,16 a

R. Inundado Op.	961,63 b	930,99 b	204,57	1017,49 b
Valor-p	0,04	0,03	0,81	0,00
Significancia	*	*	n.s	**
Factor B: Variedad				
Esfera	814,37	775,67	200,27	740,10
Híbrido 1	895,72	857,5	215,12	712,27
Loto	771,27	693,33	178,83	703,48
Zafiro	826,15	773,20	212,50	875,45
Valor-p	0,90	0,80	0,68	0,59
Significancia	n.s	n.s	n.s	n.s
Factor C: Bloque				
Valor-p	0,88	0,75	0,91	0,96
Significancia	n.s	n.s	n.s	n.s
Sig. Interacción				
AxB	n.s	n.s	n.s	n.s
Variables				
Factores	N° Grano vano/Panícula	N° Grano lleno/Panícula	Peso 1000 granos (gr)	Rto. (kg/ha)
Factor A: Tipo de Riego				
R. Intermitente	55,15	27,67	12,26	3558,4 a
R. Inundado Op.	85,38	41,98	18,49	11212,4 b
Valor-p	0,08	0,08	0,10	0,01
Significancia	n.s	n.s	n.s	**
Factor B: Variedad				
Esfera	52,33 a	51,03 b	21,38 b	10313,1 b
Híbrido 1	42,03 a	42,87 b	19,63 b	10050,5 b
Loto	137,60 b	7,43 a	3,03 a	453,9 a
Zafiro	49,10 a	37,97 ab	17,45 ab	8724,1 ab
Valor-p	0,00	0,01	0,01	0,03
Significancia	**	**	**	*

Factor C: Bloque				
Valor-p	0,22	0,16	0,30	0,13
Significancia	n.s	n.s	n.s	n.s
Sig. Interacción				
AxB	n.s	n.s	n.s	*

Letras distintas, indica diferencias entre los tratamientos. * valor-p < 0.05; ** valor-p < 0.01; n.s, no significativo.

Al respecto, no se observaron diferencias estadísticas significativas entre las variables de Largo tallo, N° Grano vano/Panícula, N° Grano lleno/Panícula y Peso de 1000 granos en relación con el tipo de riego implementado. Sin embargo, para las variables N° Tallos/m², N° Panícula/m², se observaron diferencias estadísticas significativas y altamente significativas para el Peso de Tallo y Rendimiento, siendo el sistema de riego por inundación optimizado el tratamiento que presentó los mejores resultados. Lo anterior era predecible, debido a que las plantas sometidas a riego por intermitencia sufrieron un estrés hídrico mayor y posiblemente se vieron mayormente afectadas por las bajas temperaturas.

En cuanto a las diferencias observadas entre variedades, sin considerar la interacción con los sistemas de riego, se observaron diferencias estadísticas significativas en las variables de N° Grano vano/Panícula, N° Grano lleno/Panícula, Peso de 1000 granos y Rendimiento. La variedad que en términos promedio mostró el mejor comportamiento fue el Híbrido 1, seguida por Esfera, luego Zafiro y finalmente Loto muy por debajo de las demás variedades, especialmente debido al alto número de granos vanos por panícula.

El análisis multifactorial (cuadro 4.3) mostró la existencia de interacciones estadísticas significativas entre el tipo de riego y la variedad, específicamente para Rendimiento. Por ello se realizó un ANDEVA para componentes del rendimiento de las variedades estudiadas con relación al sistema de riego (cuadro 4.4), además de una observación gráfica de esta interacción en la figura 4.6.

Cuadro 4.4: Análisis de varianza de las variables N° Tallos/m², N° Panículas/m², Largo tallo (cm), Peso tallo (gr/m²), N° Grano vano/Panícula, N° Grano lleno/Panícula, Peso de 1000 granos (gr) y Rendimiento (kg/ha) de las cuatro variedades de arroz evaluadas para los dos tipos de riego.

Riego Intermitente						
	Esfera	Híbrido 1	Loto	Zafiro	Valor-p	Sig.
N° Tallos/m²	768	678	642	680	0,90	n.s
N° Panículas/m²	727	624	539	585	0,75	n.s
Largo tallo (cm)	178	217	178	222	0,56	n.s
Peso tallo (gr/m²)	472	353	462	706	0,13	n.s
N° Grano vano/Panícula	15	50	99	56	0,14	n.s
N° Grano lleno/Panícula	59 b	24 ab	9 a	19 ab	0,04	*
Peso de 1000 granos (gr)	23	12	4	10	0,11	n.s
Rendimiento (kg/ha)	9863 b	2126 a	627 a	1618 a	0,00	**
Riego Inundado Optimizado						
	Esfera	Híbrido 1	Loto	Zafiro	Valor-p	Sig.
N° Tallos/m²	860	1113	901	972	0,78	n.s
N° Panículas/m²	824	1091	848	961	0,73	n.s
Largo tallo (cm)	222	214	180	203	0,82	n.s
Peso tallo (gr/m²)	203	1071	945	1045	0,95	n.s
N° Grano vano/Panícula	89 ab	34 a	176 b	42 a	0,01	**
N° Grano lleno/Panícula	43	61	6	57	0,05	n.s
Peso de 1000 granos (gr)	20 ab	27 b	2 a	25 ab	0,04	*
Rendimiento (kg/ha)	10763	17976	281	15830	0,12	n.s

Letras distintas, indica diferencias entre los tratamientos. * valor-p < 0.05; ** valor-p < 0.01; n.s, no significativo.

Sin duda la variedad que destacó bajo condiciones de riego por Intermitencia fue Esfera, en donde sobresalió la variable de Rendimiento con una media de 9863 kg/ha, mostrando una diferencia promedio con su sucesora la variedad Híbrido 1 de hasta 7737

kg/ha. En tercer lugar, se observa la variedad de ciclo largo Zafiro con una media de 1618 kg/ha y por último la variedad Loto de ciclo corto con una media de 627 kg/ha. La siguiente variable de componentes del rendimiento que mostró diferencias estadísticas altamente significativas fue el N° Grano lleno/Panícula, siendo nuevamente Esfera la variedad que se diferenció por sobre las demás variedades bajo un sistema de riego por intermitencia con una media de 59 Granos Llenos por Panícula, seguida de la variedad de ciclo intermedio Híbrido 1 con una media de 24 Granos llenos/Panícula, luego Zafiro y Loto con 19 y 9 Granos llenos/Panícula en promedio, respectivamente. A pesar de que en el ANDEVA no mostró diferencias estadísticamente significativas entre las variedades para el N° Panículas/m² ni el N° Tallos/m², la variedad que mostró el mayor número y la menor diferencia entre estos valores fue Esfera, con medias de 768 Tallos/m² y 727 Panículas/m², siendo la variedad que mostró la mayor relación promedio entre número de tallos y panículas por unidad de superficie. Según Alvarado (2007), el número óptimo de Panículas/m² debe ser mayor o igual a 600 para obtener un buen rendimiento y como se mencionó anteriormente en el presente estudio bajo el sistema de riego por intermitencia las únicas variedades que alcanzaron este valor fue Esfera y el Híbrido 1, ambas de ciclo intermedio.

Por otro lado, la situación es completamente distinta para los resultados del sistema de riego por inundación optimizado. Al respecto, los componentes del rendimiento que mostraron diferencias estadísticas significativas entre las variedades fueron el N° Grano vano/Panícula y el Peso de 1000 granos. La variedad que resultó más perjudicada fue Loto de ciclo corto, con medias de 176 Granos vanos/Panícula y 2 gr para el Peso de 1000 granos. Estas dos variables están correlacionadas, ya que mientras se realizaban las mediciones en laboratorio se observó que mientras más granos vanos presente una muestra, menor será el número de granos llenos y en algunas muestras ni siquiera se alcanzará el total de los 1000 granos reduciendo su peso considerablemente, debido a la alta cantidad de granos vanos. En promedio la variedad con menor N° Granos vanos/Panícula fue el Híbrido 1 con 34, luego Zafiro con 25 y Esfera con 89. Mientras que el mayor Peso de 1000 granos fue para el Híbrido 1 con 27 gr, luego Zafiro con 25 gr y Esfera con 20 gr en promedio.

Siguiendo con la idea anterior, en Chile se ha investigado el número de granos vanos por panícula con la finalidad de determinar la esterilidad del polen de arroz asociada como causa las bajas temperaturas y/o factores de manejo agronómico como fertilización nitrogenada, entre otros (Ortega, 2007). El frío afecta tanto el desarrollo vegetativo como reproductivo, pero sin duda la etapa reproductiva es la más sensible donde incluso temperaturas medias menores a 20°C generarían esterilidad floral, así el daño se produce a nivel de las anteras durante el inicio de la diferenciación del polen o microsporogénesis, provocando un desarrollo incompleto del polen el cual queda estéril (Paredes *et al.*, 2015). En la figura 3.2 se puede observar que durante la temporada comprendida en este estudio las temperaturas promedio del mes de febrero (etapa reproductiva) se mantuvo el 61% de los días con temperaturas bajo los 20°C y un 7% bajo 15°C, por lo que se registró una alta probabilidad de ocurrencia de esterilidad floral por bajas temperaturas.

Aunque la variable Rendimiento entre las variedades de arroz evaluadas, no registraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados, en los valores promedio se observan grandes diferencias especialmente en el rendimiento de la variedad Loto con 281 kg/ha, quedando hasta más de 10.000 kg/ha por debajo del resto de las variedades. La variedad con mejor Rendimiento fue el Híbrido 1 con una media de 17.976 kg/ha, luego Zafiro con 15.830 kg/ha y Esfera con 10.763 kg/ha bajo un sistema de riego por inundación optimizado.

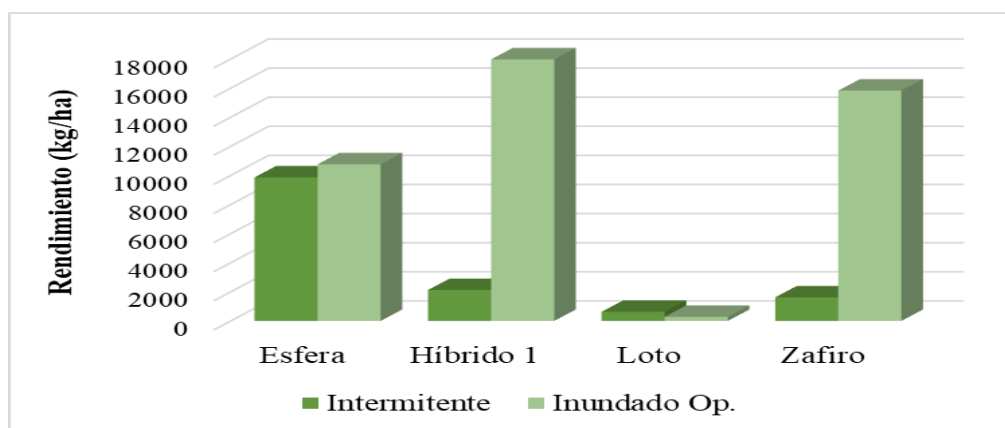


Figura 4.6: Gráfico de interacción significativa entre tipo de riego y variedad, de la variable rendimiento.

En la figura 4.6 se presenta gráficamente la interacción entre variedades y sistemas de riego. El rendimiento en kg/ha bajó considerablemente cuando las variedades fueron sometidas a un manejo de riego por intermitencia, el que aumentó considerablemente al implementar el sistema de riego por inundación optimizado. Sin embargo, la variedad Esfera no presentó diferencias de rendimiento al comparar ambos sistemas de riego, lo que estaría indicando la alta tolerancia a la restricción hídrica y a las bajas temperaturas durante el periodo reproductivo de esta variedad. Debido a esto, en términos de rendimiento, Esfera con un ciclo de crecimiento intermedio es la variedad que presenta el mejor comportamiento al aplicar un sistema de riego por intermitencia. Por su parte, el Híbrido 1 fue la variedad que presentó los mayores valores de rendimiento por unidad de superficie al aplicar un sistema de riego por inundación optimizado.

5. CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos en el presente estudio muestran que las variedades de ciclo intermedio, principalmente Esfera, presentó un mejor comportamiento de intercambio gaseoso y de rendimiento que las variedades Loto (ciclo corto) y Zafiro (ciclo largo) al implementar una estrategia de riego por intermitencia. Lo que indicaría que esta variedad se encuentra mejor adaptada a las condiciones de restricción hídrica y/o bajas temperaturas nocturnas durante la fase de microsporogénesis del arroz.
- En la implementación de un sistema de riego por inundación optimizado, la variedad de ciclo intermedio Híbrido 1, fue la que presentó el mejor comportamiento de intercambio gaseoso y de rendimiento promedio que la variedad tradicionalmente utilizada (Zafiro) bajo un sistema de riego por inundación optimizado, debido a una mayor tolerancia a las condiciones medioambientales frías de la zona arrocera en estudio.
- La implementación de una estrategia de riego por intermitencia permitiría un sistema productivo de arroz más sustentable, al reducir el volumen de agua consumido durante la temporada de desarrollo del cultivo en un 28%, que en, combinación con variedades de ciclo intermedio, altamente tolerante a la falta de agua y temperaturas nocturnas menores a 12°C, se transformarían en una estrategia interesante al ser implementadas en la principal zona arrocera de nuestro país. Al respecto, la variedad Esfera presentó el mayor rendimiento por unidad de superficie, 84% mayor que la variedad de ciclo largo (Zafiro) normalmente utilizada en la principal zona arrocera de Chile.
- Los componentes del rendimiento son una herramienta fundamental para poder establecer diferencias estadísticas entre las distintas variedades de arroz manejadas bajo un sistema de riego por intermitencia. Debido a que las variables fisiológicas utilizadas (intercambio gaseoso) no fueron capaces de detectar diferencias estadísticas entre las distintas variedades evaluadas.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acevedo, M., Castrillo, W., y Belmonte, U. 2006. Origen, evolución y diversidad del arroz. *Agronomía Tropical*. 56: 151-170.

Alvarado, R. 2007. Arroz: Manejo tecnológico. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Chillán, Chile. 164 p. [En línea] Recuperado de: <<https://biblioteca.inia.cl/handle/123456789/7123>>. Consultado el 10 de junio del 2021.

Alvarado, R. y Hernaiz, S. 2007. Antecedentes generales sobre el arroz en Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). [En línea] Recuperado de: <<https://biblioteca.inia.cl/handle/123456789/7145>>. Consultado el 07 de junio del 2021.

Carrijo, D., Lundy, M. y Linqvist, B. 2017. Rice yields and water use under alternate wetting and drying irrigation: A meta-analysis. *Field Crops Research*. 203: 173-180.

Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). 1997. Estudio agrológico VII Región: Materiales y Símbolos. Publicación CIREN N° 117. Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile. [En línea] Recuperado de: <<http://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/123456789/2276>>. Consultado el 26 de junio del 2021.

Cordero, K., Matus, I., González, J. y Castillo, D. 2020. Cultivo de cereales anuales: trigo, arroz, avena y maíz. Colección Libros INIA, 39. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Chillán, Chile. [En línea] Recuperado en: <<http://biblioteca.inia.cl/medios/biblioteca/libros/NR42046.pdf>>. Consultado el 26 de abril 2021.

Espinoza, A. y Farías, C. 2017. La cadena del arroz en Chile. ODEPA (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias). [En línea] Recuperado de: <<https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2018/02/ARROZ2018Final.pdf>>. Consultado el 31 de mayo del 2021.

Fundación Chile. 2011. Manual de recomendaciones cultivo de arroz inundado desde siembra. Cropcheck Chile 2da Edición. Santiago, Chile. 52 p. [En línea] Recuperado de: <<https://www.indap.gob.cl/docs/default-source/default-document-library/cultivo-arroz-inundado-desde-siembra.pdf?sfvrsn=0#:~:text=Los%20componentes%20de%20rendimiento%20en,manejo%20agron%C3%B3mico%20en%20el%20cultivo>>. Consultado el 29 de julio del 2021.

Fundación para la Innovación Agraria (FIA). 2018. Manual de manejos bajo sistema de siembra directa con taipas de arroz en Chile. Serie de estudios para la innovación FIA 1era Edición. Santiago, Chile. 129 p. [En línea] Recuperado de: <<http://www.fia.cl/wp-content/uploads/2018/10/Manual-de-manejos-bajo-el-sistema-de-siembra-directa-con-taipas-de-arroz-en-Chile.pdf>>. Consultado el 29 de julio del 2021.

García, A. y Laval, E. 2021. Boletín de cereales, febrero 2021. ODEPA (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias). [En línea] Recuperado en: <<https://www.odepa.gob.cl/publicaciones/boletines/boletin-de-cereales-febrero-2021>>. Consultado el 25 de abril del 2021.

Garcés y Medina. 2018. La fisiología del cultivo del arroz en el programa AMTEC. FEDEARROZ (Fondo Nacional del Arroz). [En línea] Recuperado de: <<http://www.fedearroz.com.co/docs/cartillafisiologia.pdf>>. Consultado el 05 de junio del 2021.

Hernaiz, S. y Alvarado, R. 2008. Calidad industrial del arroz: un factor importante en la modernización del cultivo. Informe Agropecuario Bioleche INIA Quilamapu. Chillán, Chile. 3 p. [En línea] Recuperado de: <<https://biblioteca.inia.cl/handle/123456789/41404>>. Consultado el 30 de julio del 2021.

Hidalgo, M. 2017. Agenda de innovación agraria para la Cadena del Arroz en Chile. Fundación para la Innovación Agraria (FIA). Editorial Barclau. Santiago, Chile. 41.

Instituto de Investigación de Recursos Naturales (IREN). 1964. Suelo: Descripciones Proyecto Aerofotogramétrico Chile/OEA/BID, Publicación N° 2. CORFO (Corporación de Fomento de la Producción), Ministerio de Economía, Fomento y Turismo, Gobierno de Chile. [En línea] Recuperado de: <<http://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/123456789/18011>>. Consultado el 26 de junio del 2021.

Laval, E. 2020. Arroz: temporada 2019/20 - 2020/21. ODEPA (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias). [En línea] Recuperado en: <<https://bibliotecadigital.odepa.gob.cl/bitstream/handle/20.500.12650/70425/Articulo-arroz.pdf>>. Consultado el 24 de abril del 2021.

Li, Z., Azeem, S., Zhang, Z., Li, Z., Zhao, H., y Lin, W. 2016. Promising Role of Moderate Soil Drying and Subsequent Recovery Through Moderate Wetting at Grain-Filling Stage for Rice Yield Enhancement. *Journal of Plant Growth Regulation*. 35: 838-850.

Mandal, D., Kumar, V., Rao, Ys. y Bhattacharya, A. 2019. Experimental Field Campaigns at Vijayawada Test Site. *ResearchGate*, 10.17605.

Medrano, H., Escalona, J., Bota, J., Gulías, j. y Flexas, J. 2002. Regulation of Photosynthesis of C3 Plants in Response to Progressive Drought: Stomatal Conductance as a Reference Parameter. *Annals of botany*, 89: 895-905.

Ministerio de Medio Ambiente (MMA). 2021. Cambio climático. [En línea] Recuperado de: <<https://cambioclimatico.mma.gob.cl/>>. Consultado el 10 de junio del 2021.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2012. La Niña y sus consecuencias sobre el sector agropecuario en América Latina. *FAO.org*. [En línea] Recuperado de: <<http://www.fao.org/in-action/agronoticias/detail/es/c/509146/>>. Consultado el 09 de junio del 2021.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2004. El Arroz y la Nutrición humana. Año internacional del arroz 2004, el arroz es vida. División de Alimentación y Nutrición de la FAO. [En línea] Recuperado de: <<http://www.fao.org/rice2004/es/f-sheet/hoja3.pdf>>. Consultado el 25 de abril del 2021.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2003. Guía para identificar las limitaciones de campo en la producción de arroz. [En línea] Recuperado de: <<http://www.fao.org/3/Y2778S/y2778s00.htm#Contents>>. Consultado el 09 de junio del 2021.

Organización mundial para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) y Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2019. OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2019-2028. OCDE. París, Francia. 145 p. [En línea] Recuperado de: <<https://doi.org/10.1787/3930e850-es>>. Consultado el 24 de abril del 2021.

Ortega, R. 2007. Analysis of factors affecting spikelet sterility in flooded rice under field conditions in Chile. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 53: 183-192.

Paredes, M., Hube, S., Alfaro, M., Ramírez, L., Donoso, G., Becerra, V. *et al.* 2015. Producción de arroz: Buenas prácticas agrícolas (BPA). Boletín INIA N° 306. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Santiago, Chile. 100 p. [En línea] Recuperado de: <<https://biblioteca.inia.cl/handle/123456789/7815>>. Consultado el 30 de abril del 2021.

Pardos, J. 2007. Perspectiva fisiológica en la producción y mejora del eucalipto: con énfasis en *Eucalyptus globulus* Labill. Boletín del CIDEU 3: 7-55.

Santis, G. 2005. Mapa de reconocimiento de suelos de la región de Bío-Bío (sector norte). Memoria para optar al título profesional de Ingeniero Agrónomo. Santiago, Chile. Facultad de ciencias Agronómicas, Universidad de Chile, 179.

Salazar, V. 2020. Evaluación de la respuesta fisiológica de 5 variedades de arroz (*Oryza sativa* L.) de ciclo largo y corto bajo una estrategia de riego por intermitencia. Memoria para optar al título profesional de Ingeniero Agrónomo. Talca, Chile. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad de Talca, 35.

Song, T., Yang, F., Das, D., Chen, M., Hu, Q., Tian, Y. *et al.* 2020. Transcriptomic analysis of photosynthesis-related genes regulated by alternate wetting and drying irrigation in flag leaves of rice. *Food and Energy Security*. 10.1002/fes3.221.

Stolpe, N. 2006. Descripciones de los principales suelos de la VIII Región de Chile. ResearchGate. 956-227-293-1.

Yang, J. y Zhang, J. 2006. Grain filling of cereals under soil drying. *New Phytologist*. 169: 223-236.

Yang, J., Zhou, Q. y Zhang, J. 2017. Moderate wetting and drying increases rice yield and reduces water use, grain arsenic level, and methane emission. *The Crop Journal*. 5: 151-158.