

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



Arroz de secano intermitente var. INIA 516 LM1: Una alternativa sostenible para la cuenca del río Huallaga

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Autor:

Abner Giezi Antezana Moscaiza
Jonathan Gabriel Guevara Zumaeta
Antoni Gabriel Carranza Perez

Asesor:

Mg. Ceila Paquita Laos Olivares

Tarapoto, septiembre de 2025

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo, Ceila Paquita Lao Olivares, docente de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: “**Arroz de secano intermitente var. INIA 516 LM1: Una alternativa sostenible para la cuenca del río Huallaga**” de los autores Abner Giezi Antezana Moscaiza, Jonathan Gabriel Guevara Zumaeta y Antoni Gabriel Carranza Perez tiene un índice de similitud de 0% verificable en el informe del programa Turnitin, y fue realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponde ante cualquier falsedad u omisión de los documentos como de la información aportada, firmo la presente declaración en la ciudad de Tarapoto, a los 09 días del mes de noviembre del año 2025.



Ceila Paquita Lao Olivares
DNI: 43226643

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS



En San Martín, Tarapoto, Morales, a... 18 día(s) del mes de... septiembre del año 2025 siendo las... 02:30 horas, se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión Campus Tarapoto, bajo la dirección del (de la) presidente(a): Mtra. Betsabeth teresa Padilla Macedo, el (la) secretario(a): Ing. Serey Rengifo Arevalo y los demás miembros: Mg. Carmelino Almestar villegas y Mg. Andres Erick Gonzales Lopez y el (la) asesor(a) Mtra. Ceila Paquiza Lao Olivares y Co. asesor Yuri Gandhi Arevalo Aranda con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulado: Arroz de secano intermitente var. INIA S16 LM1: Una alternativa sostenible para la cuenca del río Huallaga

del(los) bachiller(es): a) Abner Giezi Antezana Moscaiza
 b) Antoni Gabriel Carranza Perez
 c) Jonathan Gabriel Guevara Zumaeta

conducente a la obtención del título profesional de: Ingeniería Ambiental
(Denominación del Título Profesional)

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Bachiller-(a): Abner Giezi Antezana Moscaiza

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>APROBADO</u>	<u>16</u>	<u>B</u>	<u>Con nominación de Bueno</u>	<u>Muy Bueno</u>

Bachiller -(b): Antoni Gabriel Carranza Perez

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>APROBADO</u>	<u>16</u>	<u>B</u>	<u>Con nominación Bueno</u>	<u>Muy Bueno</u>

Bachiller -(c): Jonathan Gabriel Guevara Zumaeta

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>APROBADO</u>	<u>16</u>	<u>B</u>	<u>Con nominación Bueno</u>	<u>Muy Bueno</u>

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

[Firma]
Presidente/a
[Firma]
Asesor/a
[Firma]
Bachiller (a)





[Firma]
Miembro
[Firma]
Bachiller (b)

[Firma]
Secretario/a
[Firma]
Miembro
[Firma]
Bachiller (c)

ÍNDICE

RESUMEN	5
1. INTRODUCCIÓN	5
2. MATERIALES Y MÉTODOS	7
2.1 <i>Alcance de estudio</i>	7
2.2 <i>Diseño experimental</i>	8
2.3 <i>Características fisicoquímicas del suelo</i>	8
2.4 <i>Gestión experimental de parcelas</i>	8
2.5 <i>Determinación de variables morfológicas</i>	9
2.6 <i>Determinación de variables fitosanitarias</i>	9
2.7 <i>Determinación de variables agronómicas</i>	9
2.8 <i>Determinación de la huella hídrica</i>	9
2.9 <i>Análisis estadístico</i>	10
3. RESULTADOS	11
3.1 <i>Efectos del tratamiento sobre los parámetros evaluados</i>	11
3.2 <i>Efecto sobre la incidencia de plagas y enfermedades</i>	11
3.3 <i>Cuantificación de la huella hídrica</i>	11
4. DISCUSIÓN.....	13
5. CONCLUSIONES	17
6. REFERENCIAS	19
7. ANEXOS	23
7.1 <i>7.1. Evidencia de sumisión del artículo</i>	23
7.2 <i>7.2. Copia de la resolución</i>	24

Arroz de secano intermitente var. INIA 516 LM1: Una alternativa sostenible para la cuenca del río Huallaga

Jonathan Guevara ¹, Abner Antezana ¹, Antoni Carranza ¹ Ceila Lao ¹

Resumen

Se prevé que el cambio climático aumentará las temperaturas globales y alterará los patrones de precipitaciones. En Perú, estos cambios podrían afectar negativamente a la cuenca central del río Huallaga al aumentar la incidencia de plagas y enfermedades, la evapotranspiración y el consumo de agua. Esta cuenca es una de las principales regiones productoras de arroz del país, donde el cultivo se cultiva tradicionalmente mediante prácticas ineficientes, como el riego continuo por inundaciones. Este estudio evaluó los efectos de diferentes estrategias de manejo del riego sobre el crecimiento y rendimiento del arroz (*Oryza sativa* var. INIA 516 LM1-La Unión 23), la huella hídrica como indicador de la eficiencia en el uso del agua y la incidencia de plagas y enfermedades asociadas a los regímenes de riego. Se implementaron tres tratamientos de riego: Inundación tradicional T1 (mantenimiento de una capa de agua de 0,15 m con reposición cada 4 días), Inundación optimizada T2 (reposición cada 7 días) y Riego intermitente de secano T3 (reposición cada 14 días). Aunque no se observaron diferencias significativas en los parámetros biométricos, el rendimiento o la incidencia de plagas y enfermedades, se observó una tendencia a la disminución del rendimiento con intervalos de riego más largos: inundaciones tradicionales ($7,91 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$) > reducción de inundaciones ($7,82 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$) > secano intermitente ($7,14 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$). La incidencia del virus de la hoja blanca y *Burkholderia glumae* fue mayor en el tratamiento intermitente de secano, seguido de inundaciones optimizadas, con la incidencia más baja en las inundaciones tradicionales. La reducción del rendimiento y el uso de agua de lluvia para cubrir las necesidades de agua dieron como resultado una menor huella hídrica total para las inundaciones tradicionales ($834,0 \text{ m}^3\cdot\text{t}^{-1}$), seguido de inundaciones optimizadas ($843,6 \text{ m}^3\cdot\text{t}^{-1}$) y secano intermitente ($923,9 \text{ m}^3\cdot\text{t}^{-1}$). Esto refleja una mejora en la eficiencia del uso del agua de lluvia. Los hallazgos sugieren que el riego intermitente de secano mejora la eficiencia del uso del agua sin comprometer significativamente el rendimiento del arroz ni aumentar la incidencia de enfermedades en la variedad de arroz. INIA 516 LM1-La Unión 23 en la cuenca central del río Huallaga.

Palabras clave: huella hídrica; cronograma de riego; plaga; productividad del agua; gestión sostenible del agua

1. INTRODUCCIÓN

Se espera que la estacionalidad de las variables climáticas, como las precipitaciones y la temperatura, se vuelva más pronunciada debido al cambio climático, y se proyecta una intensificación hacia finales del siglo XXI [1]. Las predicciones siguen sin ser concluyentes en regiones con topografía compleja, como los Andes y las zonas adyacentes de alta selva tropical. Sin embargo, múltiples estudios sugieren un aumento de las temperaturas extremas y una variabilidad significativa en los patrones de precipitaciones [1,2,3]. En la selva tropical del norte de Perú, se prevé que aumente la frecuencia de días y noches calurosos, mientras que se espera que aumenten las precipitaciones [2,4]. La intensidad de estos cambios dependerá de la Vía Socioeconómica Compartida adoptada para el desarrollo global [5]. Por lo tanto, los posibles aumentos del suministro de agua se producirían junto con un aumento de la evapotranspiración de la vegetación debido al aumento de la temperatura.

Si bien estos cambios pueden tener un impacto limitado en áreas con altas precipitaciones, las regiones con climas secos o semiáridos probablemente experimentarán consecuencias más graves, como la cuenca central del río Huallaga en Perú, donde aumenta el consumo de agua [6,7] se espera. Estos cambios climáticos podrían provocar una mayor incidencia de

plagas y enfermedades, una mayor evapotranspiración de la cobertura vegetal y, en consecuencia, un mayor consumo de agua y sequías más frecuentes [8,9,10].

En este contexto, la gestión eficiente de los recursos hídricos es una necesidad apremiante en un mundo que enfrenta crecientes desafíos ambientales, climáticos y sociales. Como principal actividad consumidora de agua, la agricultura es crucial para buscar alternativas sostenibles para optimizar el uso del agua [11]. Para ello, es fundamental mejorar la eficiencia en el uso del agua y aumentar la productividad [12]. En Perú, la eficiencia del riego nacional se estima en aproximadamente el 35%, debido principalmente a la infraestructura hidráulica inadecuada, los bajos ingresos por tarifas de distribución y el uso generalizado de métodos de riego tradicionales [13]. Sin embargo, estas cifras deben evaluarse localmente, considerando las prácticas agrícolas y la disponibilidad de agua [14]. Aunque Perú posee alrededor del 4,6% de los recursos de agua dulce de América del Sur [15], su distribución desigual afecta negativamente al rendimiento de los cultivos y a la seguridad alimentaria en determinadas regiones [16].

Arroz (*Oryza sativa*) es un cereal de importancia mundial valorado por su alto contenido calórico y nutricional y su cultivo generalizado [17]. Es uno de los cultivos más importantes, y aproximadamente el 43% de la producción nacional se produce en la selva peruana [18]. En Perú, durante 2022, la producción de arroz en la Amazonía representó el 50,5% de la producción nacional, y aproximadamente el 87% provino de las regiones de San Martín, Amazonas, Cajamarca y Huánuco [19]. Entre ellas, San Martín fue la principal región productora de arroz del país con casi 860,5 mil toneladas de arroz para la campaña de 2024 [18]. En la región de San Martín, la agricultura contribuye con el 29% del valor agregado bruto, siendo el arroz el cultivo dominante, representando el 32,5% del volumen total de producción hasta septiembre de 2024 [18].

El riego por inundaciones sigue siendo el método dominante de cultivo de arroz, a pesar de los diversos ecosistemas en los que se cultiva el arroz y de la extensa investigación destinada a reducir su consumo de agua y su impacto ambiental [20]. Esta persistencia se atribuye principalmente a la baja tasa de adopción de técnicas de riego alternativas, debido principalmente a los altos costos iniciales de implementación [21]. Sin embargo, el riego por inundaciones sobrecarga significativamente los recursos hídricos locales y regionales, socava la sostenibilidad agrícola y aumenta la vulnerabilidad de los cultivos a las plagas. Estos factores, a su vez, impactan negativamente los medios de vida de las comunidades y la salud de los ecosistemas, principalmente a través de la contaminación difusa que puede generar [22,23,24]. A pesar de estos inconvenientes, el uso de sistemas saturados y agua estancada proporcionan un control eficaz de las malezas, reduciendo significativamente la necesidad de herbicidas [25,26].

Dada la continua dependencia del riego por inundaciones, es esencial explorar estrategias para optimizar su eficiencia y evaluar los beneficios adicionales que pueden surgir de mejores prácticas de gestión. En este contexto, el concepto de Huella Hídrica (WF) en la agricultura proporciona un marco valioso para evaluar la sostenibilidad del riego en relación con la eficiencia del uso del agua [27]. Este enfoque cuantifica el volumen total de agua dulce consumido directa e indirectamente en la producción agrícola, expresado en $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ [14]. La huella hídrica consta de tres componentes: Verde WF, que considera el agua de lluvia evaporada o incorporada al proceso productivo; Azul WF, que representa el volumen de agua superficial o subterránea utilizada para riego que posteriormente se evapora o se incorpora al cultivo; y Gris WF, que se refiere a la cantidad de agua necesaria para diluir los contaminantes generados durante la producción para cumplir con los estándares de calidad ambiental [28].

La cantidad de agua necesaria para la producción de arroz varía según el método de cultivo, las condiciones ambientales locales y las prácticas agrícolas utilizadas [29]. Por lo tanto, son necesarias evaluaciones complementarias para evaluar el impacto de diferentes estrategias de manejo restringido del riego sobre factores como las plagas del arroz y la incidencia de enfermedades. En este contexto, este estudio tuvo como objetivo cuantificar el impacto de los sistemas hídricos saturados y estancados en el desarrollo y rendimiento del cultivo de arroz, utilizando la huella hídrica como indicador clave y evaluando su influencia en la incidencia de plagas y enfermedades.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Alcance de estudio

2.1.1. Ubicación

La investigación se realizó en la Estación Experimental Agraria El Porvenir del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) en el distrito Juan Guerra, departamento de San Martín. La parcela experimental se estableció en $6^{\circ}35'00''$ S, $76^{\circ}19'46''$ W ([Figura 1](#)). El área de estudio tiene un clima semiárido, con temperaturas mínimas y máximas promedio que oscilan entre 19 y $34,5^{\circ}\text{C}$. La precipitación media anual es de 1123 mm, con una precipitación media mensual entre 43 mm (julio) y 151 mm (febrero). La humedad relativa media mensual (HR) varía entre el 69% y el 75%, y la velocidad media del viento es de $2,4\text{ ms}^{-1}$. Los promedios históricos y registros meteorológicos diarios durante la investigación se obtuvieron de la estación El Porvenir ($6^{\circ}35'20.62''$ S, $76^{\circ}19'5.66''$ W) del Servicio Meteorológico e Hidrológico Nacional del Perú (SENAMHI, 2024) como se muestra en [Figura 2](#).

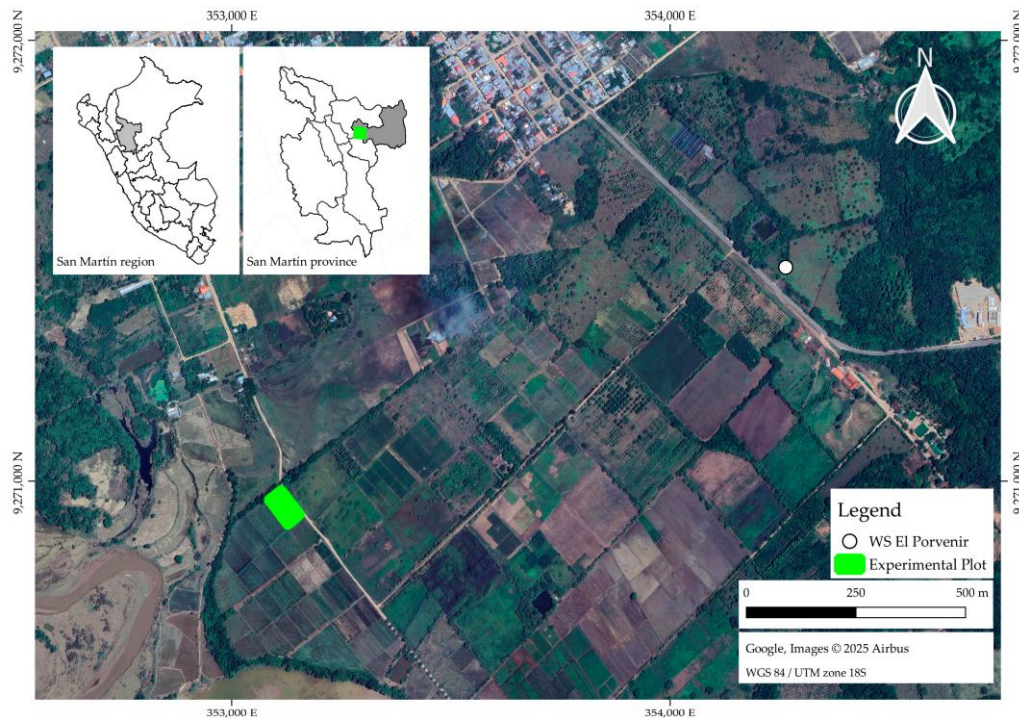


Figura 1. Área de estudio ubicada en el distrito de Juan Guerra, provincia de San Martín, departamento de San Martín en Perú. Se muestra una vista aérea de las parcelas experimentales.

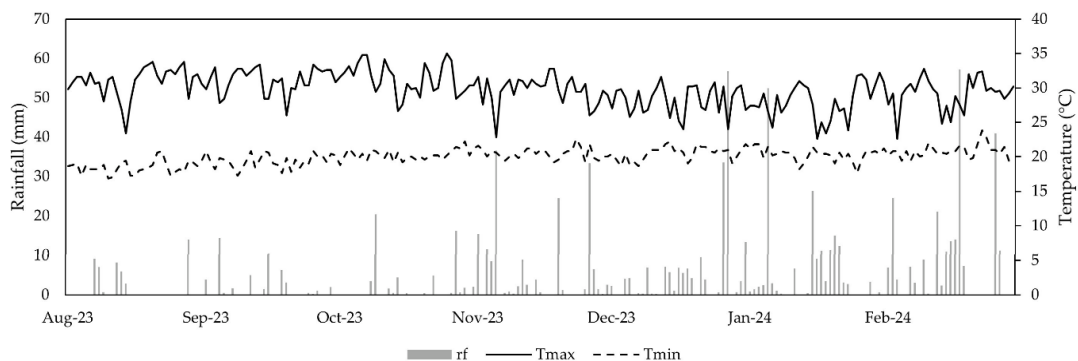


Figura 2. Datos meteorológicos a escala diaria de la estación meteorológica El Porvenir para la temporada 2023–2024, incluyendo precipitaciones (rf), temperatura máxima (Tmax) y temperatura mínima (Tmin)

2.2 Diseño experimental

Se empleó un diseño de bloques completamente al azar (CRBD). El experimento consistió en tres tratamientos de manejo de riego para el cultivo de arroz: T1 (inundación tradicional): mantenimiento de una capa de agua de inundación de 0,15 m con reposición cada 4 días; T2 (inundación optimizada): reposición de las capas de agua de inundación de 0,15 m cada 7 días; y T3 (riego intermitente de secano): reposición de las capas de agua de inundación de 0,15 m cada 14 días. Cada unidad experimental comprendía un pozo de 10 m × 12 m con bordes de 0,20 m de altura. Con tres réplicas por tratamiento, el experimento incluyó nueve unidades experimentales. El agua de riego era proporcionada por surcos ([Figura 3](#)).

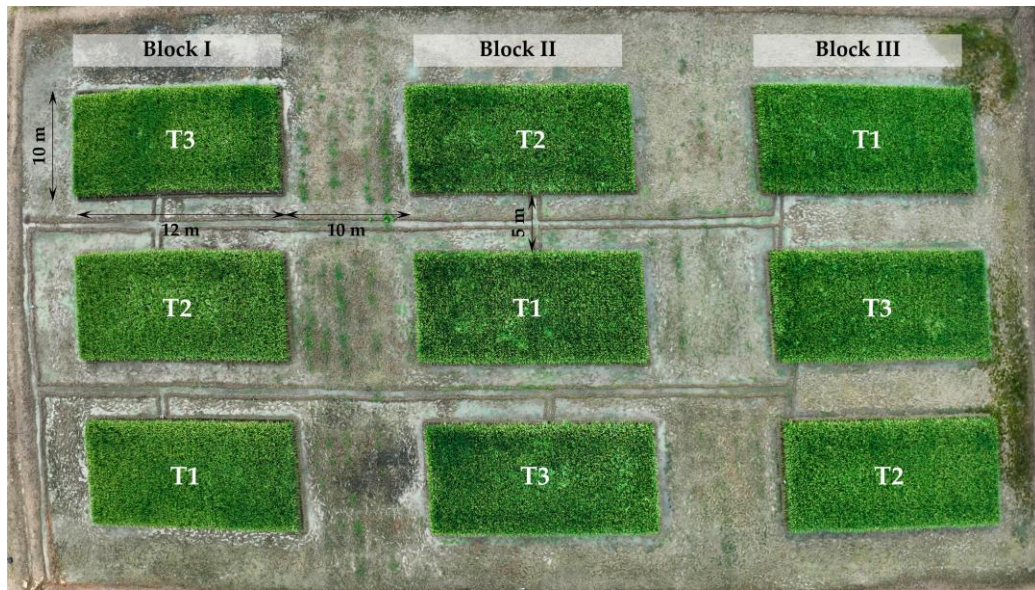


Figura 3. Distribución en campo de las unidades experimentales.

2.3 Características fisicoquímicas del suelo

Antes de la instalación, se excavó una zanja de 1 m × 1 m × 1,2 m en el área de parcela experimental designada. Luego de identificar los horizontes del suelo, se recolectaron muestras de suelo de la zona central de cada horizonte y se analizaron en el Laboratorio de Suelo, Agua y Foliar (LABSAF)-INIA El Porvenir. Los parámetros analizados incluyeron textura [30], pH [31], conductividad eléctrica (CE) [32], materia orgánica (OM) [30], nitrógeno total [33], fósforo disponible [30], potasio disponible [34], y concentraciones de cationes intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , y Na^+) [30]. El suelo tenía una textura predominantemente arcillosa, con un pH de 7,6 y una fertilidad media ([Tabla S1](#)).

2.4 Gestión experimental de parcelas

La parcela experimental se estableció entre octubre de 2023 y febrero de 2024 mediante un sistema de siembra indirecta (trasplante). Los semilleros se prepararon con semillas pregerminadas de *Oryza sativa* var. INIA 516 LM1-La Unión 23 [35] que se sometió a remojo previo en agua durante 24 h seguido de 12 h en refugio. Las semillas se sembraron a $80 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ densidad en pozos de suelo construidos manualmente. El control fitosanitario en los semilleros implicó la aplicación de lambda-cihalotrina y tiametoxam ($0,3 \text{ L}\cdot\text{ha}^{-1}$) y fipronil ($0,2 \text{ L}\cdot\text{ha}^{-1}$) para gestionar *Hydrellia Wirthi* y *Tagosodes oryzicolus*. Fertilización con urea ($200 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) se aplicó en agua laminar 12 días después de la siembra (DAS).

Antes del trasplante, se araba la tierra y se volteaba utilizando una grada semipesada tirada por un tractor. Luego se niveló con un cultivador mecánico, mientras que los bordes del pozo (0,20 m de altura) y los canales de riego se moldearon utilizando

herramientas manuales. A los 21 DAS, el trasplante se realizó con un espaciamiento de 0,20 m entre plantas y 0,25 m entre hileras, colocando cuatro plántulas por carrera. La fertilización del suelo se aplicó con base en la caracterización físicoquímica del suelo: fosfato diamónico (DAP) a $150 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ Antes del trasplante, cloruro de potasio (KCl) a $150 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ Antes del trasplante, urea a $150 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ 15 días después del trasplante y 200 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ 25 días después del trasplante y Sulpomag a $150 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ 75 días después del trasplante. Para el control de malezas, se aplicó butacloro en una dosis de $4 \text{ L}\cdot\text{ha}^{-1}$ 2 días después del trasplante. Durante la etapa de floración se aplicó propineb a $2 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ Dosis para prevenir la formación de manchas en los granos e imidacloprid a $200 \text{ cc}\cdot\text{ha}^{-1}$ controlar *Hydrellia Wirthi* y *Tagosodes oryzae*.

2.5 Determinación de variables morfológicas

Las plantas se evaluaron dentro de un área acumulada de 10 m^2 , compuesto por 10 zonas representativas de 1 m^2 cada una, ubicado en el área central de cada unidad experimental para evaluar variables morfológicas y agronómicas. Las evaluaciones siguieron los métodos descritos por Rosero [36]. Durante la etapa 2 (cultivo), se registró el número de macollos por golpe (NMG). En la etapa 9 (grano maduro), se midieron la altura de la planta (AP), el número de panículas por carrera (NPG), la longitud de la panícula (LP) y la fertilidad de la panícula (FP).

2.6 Determinación de variables fitosanitarias

Para la evaluación de enfermedades fitosanitarias se utilizó un enfoque similar al de la evaluación de variables morfológicas y agronómicas, centrándose en las principales enfermedades que afectan al cultivo. Durante la etapa 2 (labranza), se registró la incidencia (VHB_2) del virus de la hoja blanca. Para identificar los síntomas asociados a esta enfermedad en las plantas, se realizó una evaluación visual de las hojas. Las observaciones se centraron en la presencia de moteado o variegación en la coloración de las hojas, característica de las infecciones virales, con especial atención a la aparición de franjas o bandas longitudinales que varían en color desde verde amarillento hasta amarillo blanquecino, carentes de bordes bien definidos. En la etapa 9 (grano maduro) la incidencia (BG2) de infecciones bacterianas por *Burkholderia glumaefuera* fueron evaluados. La evaluación de los síntomas de la enfermedad se realizó visualmente a través de observaciones de campo centradas en la identificación de la decoloración de la panícula asociada con la clorosis.

2.7 Determinación de variables agronómicas

Para evaluar las variables de cosecha, seguimos el método descrito por Rosero [36]. Se recolectaron plantas de un total de 10 m^2 , distribuidos en 10 1 m^2 representativas zonas ubicadas en la parte central de cada unidad experimental, evitando filas fronterizas. Luego se determinó el rendimiento comercial del grano (RC2) en kg/ha de arroz con cáscara, estandarizado al 14% del contenido de humedad del grano.

2.8 Determinación de la huella hídrica

Los tres componentes de la huella hídrica (WF) ($\text{m}^3 \text{ t}^{-1}$) se calcularon: huella hídrica verde (WF_{verde}), huella hídrica azul (WF_{azul}), y huella hídrica gris (WF_{gris}). Para lograrlo, se parametrizó un modelo de desarrollo de cultivos utilizando el software CROPWAT 8.0 desarrollado por la FAO, permitiendo diferenciar los insumos de lluvia y riego en función de los tratamientos propuestos. Los módulos de clima y precipitaciones se completaron con datos a escala diaria de la estación meteorológica El Porvenir ($6^{\circ}35'20.62'' \text{ S}$; $76^{\circ}19'5.66'' \text{ W}$), incorporando precipitaciones, temperatura máxima y mínima, velocidad del viento, humedad relativa y horas de sol. Evapotranspiración de referencia (ET_0) se estimó utilizando la ecuación de Penman–Monteith [37], mientras que las precipitaciones efectivas (P_{ef}) se determinó siguiendo la metodología del Servicio de Conservación de Suelos del USDA [38]. El módulo de cultivo se actualizó con base en los datos de la FAO

para el cultivo de arroz [39]. En este módulo se actualizó la información sobre fenología, fecha de trasplante, profundidad de enraizamiento y altura máxima de la planta con base en observaciones de la parcela experimental y consulta a expertos. Además, el coeficiente de cultivo para la etapa inicial ($K_{c\text{ ini}}$), la etapa de mitad de temporada ($K_{c\text{ medio}}$), y para el final de la etapa de final de temporada ($K_{c\text{ fin}}$) se actualizaron con base en las correcciones propuestas por la FAO para áreas semihúmedas [37].

El módulo de suelo se completó utilizando la base de datos del modelo AquaCrop, seleccionando parámetros del suelo basados en el análisis de textura [40]. Los tratamientos propuestos se simularon ajustando los intervalos de riego en simulaciones independientes. El modelo facilitó el cálculo de las necesidades de agua de los cultivos en función de la evapotranspiración (ET_c) y permitió la determinación de WF_{verde} , WF_{azul} , y WF_{gris} insumos, siguiendo la metodología descrita por Martins et al. [41].

$$WF = WF_{\text{green}} + WF_{\text{blue}} + WF_{\text{grey}} = \frac{10 \times \sum_{n=1}^C ET_{\text{green}}}{Y} + \frac{10 \times \sum_{n=1}^C ET_{\text{blue}}}{Y} + \frac{WR_{\text{dilution}}}{Y} \quad (1)$$

WF_{green} está determinado por el volumen de agua precipitada almacenada en la zona radicular del suelo, que posteriormente es evapotranspirada o incorporada a las plantas. WF_{azul} representa el volumen de agua suministrada a través del sistema de riego y posteriormente evapotranspirada por el cultivo. WF_{gris} indica el volumen de agua necesario para asimilar la carga contaminante en los cuerpos de agua receptores. En la ecuación, Y denota el rendimiento comercial ($t \cdot ha^{-1}$), n representa el número de días del ciclo del cultivo, C es el último día del ciclo y ET se refiere a la evapotranspiración. En consecuencia, los componentes verde y azul del WF se estimaron como la acumulación diaria de evapotranspiración del cultivo (ET_c) durante el ciclo del cultivo:

$$ET_{\text{green}} = \min(ET_c; P_{\text{ef}}) \quad (2)$$

$$ET_{\text{blue}} = \max(0; ET_c - ET_{\text{green}}) \quad (3)$$

El volumen de agua necesario para diluir los contaminantes que regresan al medio ambiente ($WR_{\text{dilución}}$) se calculó en función de la dosis aplicada (AR , $kg \cdot ha^{-1}$), la fracción de pérdida (α), la concentración natural del contaminante en el medio receptor (c_{nat} , $kg \cdot m^{-3}$), y su concentración límite aceptable (c_{max} , $kg \cdot m^{-3}$) [28]:

$$WR_{\text{dilution}} = \frac{\alpha \times AR}{(c_{\text{max}} - c_{\text{nat}})} \quad (4)$$

El $WR_{\text{dilución}}$ se calculó individualmente para cada compuesto analizado utilizando la Ecuación (4). Posteriormente, el WR más alto $_{\text{dilución}}$ se seleccionó el valor para determinar el WF_{green} [42]. El valor α se estimó con base en las condiciones locales según la metodología de Franke et al. [43]. El c_{nat} El valor se estimó con base en el monitoreo de la calidad del agua evaluado por la Autoridad Nacional del Agua del Perú (ANA) para la cuenca media del río Huallaga en 2021 [44]. El c_{max} El valor se obtuvo del Estándar de Calidad Ambiental del Agua [45].

2.9 Análisis estadístico

Las variables del suelo, junto con las variables morfológicas, fenológicas, agronómicas, fitosanitarias y de cosecha del cultivo de arroz, se analizaron utilizando R (versión 4.1.1) con el `dplyr` [46] y [47] paquetes. Las variables analizadas incluyeron NMG, AP, NPG, LP, FP y RC2. Para estas variables se evaluaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas. Cuando se cumplieron estos supuestos, se realizó un ANOVA con comparaciones de medias utilizando la prueba LSD de Fisher ($p < 0,05$). Se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal–Wallis si no se cumplían los supuestos ($p < 0,05$).

3. RESULTADOS

3.1 Efectos del tratamiento sobre los parámetros evaluados

El análisis de varianza ($p < 0,05$) realizado para los parámetros NMG, AP, NPG, LP, FP y RC2 no reveló diferencias significativas entre los tratamientos evaluados ([Tabla 1](#)). Sin embargo, T2 exhibió los valores más altos para NMG (12,27 macollos por golpe), LP (32,05 cm) y FP (83,00%), seguidos por los tratamientos T1 y T3. Por el contrario, para NMG, los tratamientos T1 y T3 registraron los valores más altos (16,45 macollos por golpe), mientras que T2 tuvo los más bajos (15,92 macollos por golpe). En cuanto a la HP, el tratamiento T1 alcanzó la mayor altura (120,32 cm), seguido de T3 (119,22 cm) y T2 (118,21 cm). En términos del año fiscal 2, se observó una tendencia en la que T1 alcanzó los valores más altos (RC2: 8,69 t·ha⁻¹), seguido de T2 (RC2: 7,82 t·ha⁻¹), y finalmente, T3 (RC2: 7,14 t·ha⁻¹).

Tabla 1. Comparación de variables morfológicas y agronómicas según tratamiento

Tratamiento	NMG (Unidades)	AP (cm)	NPG (Unidades)	LP (cm)	FP (%)	RC2 (t·ha ⁻¹)
T1	16.45 ± 0.48 ^{ns}	120.32 ± 3.48 ^{ns}	11.67 ± 0.83 ^{ns}	31.70 ± 0.68 ^{ns}	82.67 ± 2.06 ^{ns}	7.91 ± 0.50 ^{ns}
T2	15.92 ± 0.36 ^{ns}	118.21 ± 2.91 ^{ns}	12.27 ± 0.85 ^{ns}	32.05 ± 1.56 ^{ns}	83.00 ± 2.19 ^{ns}	7.82 ± 0.80 ^{ns}
T3	16.45 ± 1.51 ^{ns}	119.22 ± 4.03 ^{ns}	12.00 ± 0.56 ^{ns}	30.67 ± 0.94 ^{ns}	81.89 ± 2.19 ^{ns}	7.14 ± 0.86 ^{ns}

Notas: Los datos de la tabla representan la media y la desviación estándar ($\mu \pm \sigma$) de los parámetros evaluados: NMG (número de macollos por golpe), AP (altura de la planta), NPG (número de panículas por golpe), LP (longitud de la panícula), FP (fertilidad de la panícula) y RC2 (rendimiento comercial). ns: diferencia no significativa según la prueba LSD de Fisher ($p < 0,05$).

3.2 Efecto sobre la incidencia de plagas y enfermedades

El análisis de varianza ($p < 0,05$) realizado para el parámetro VHB_2 no reveló diferencias significativas entre los tratamientos evaluados ([Tabla 2](#)). De manera similar, la prueba de Kruskal–Wallis ($p < 0,05$) para BG2 tampoco mostró diferencias significativas ([Tabla 2](#)). Sin embargo, la mayor incidencia de infecciones virales y bacterianas se observó en T3 (VHB_2: 1,21%, BG2: 2,52%), seguida de T2 (VHB_2: 0,9, BG2: 2,34%) y la más baja en T1 (VHB_2: 0,53%, BG2: 1,34%). Estos resultados sugieren que la incidencia de infecciones virales y bacterianas fue mayor en T3, intermedia en T2 y menor en T1.

Tabla 2. Comparación de variables fitosanitarias

Tratamiento	VHB_2 (%)	BG2 (%)
T1	0.53 ± 0.3 ^{ns}	1.34 ± 0.38 ^{ns}
T2	0.9 ± 0.52 ^{ns}	2.34 ± 1.39 ^{ns}
T3	1.21 ± 0.71 ^{ns}	2.52 ± 1.4 ^{ns}

Notas: Los datos de la tabla representan la media y la desviación estándar ($\mu \pm \sigma$) de los parámetros evaluados: VHB_2 (incidencia del virus de la hoja blanca) y BG2 (*Burkholderia glumae* incidencia). ns: diferencia no significativa según la prueba de LSD de Fisher ($p < 0,05$) y Kruskal–Wallis ($p < 0,05$) respectivamente.

3.3 Cuantificación de la huella hídrica

Para todos los tratamientos, el aporte efectivo de lluvia (Reff) superó el requerimiento de riego (IR) como se muestra en [Figura 4A](#). En el caso de T3, la ausencia de IR indica que el cultivo puede desarrollarse únicamente con el aporte de lluvia sin afectar significativamente el rendimiento comercial. En consecuencia, WF_{verde} está directamente relacionado con los intervalos de riego, y los riegos más espaciados dan como resultado una WF_{verde} con valores altos ([Figura 4B](#)). Por el contrario, WF_{azul} Los valores fueron más bajos cuando los intervalos de irrigación fueron más largos, como se observó en T3. Respecto a WF_{gris} , el volumen estimado de nitrógeno percolado requirió más agua para cumplir con el estándar de calidad propuesto que el fósforo. En consecuencia, el WF_{gris} La huella osciló entre 216 y 240 m³·t⁻¹, con los valores más altos registrados para T3, correspondientes a una ligera

reducción del año fiscal 2. Los valores totales de WF calculados para cada tratamiento fueron los siguientes: T1: $806,3 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$, T2: $815,5 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$, y T3: $893,2 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$

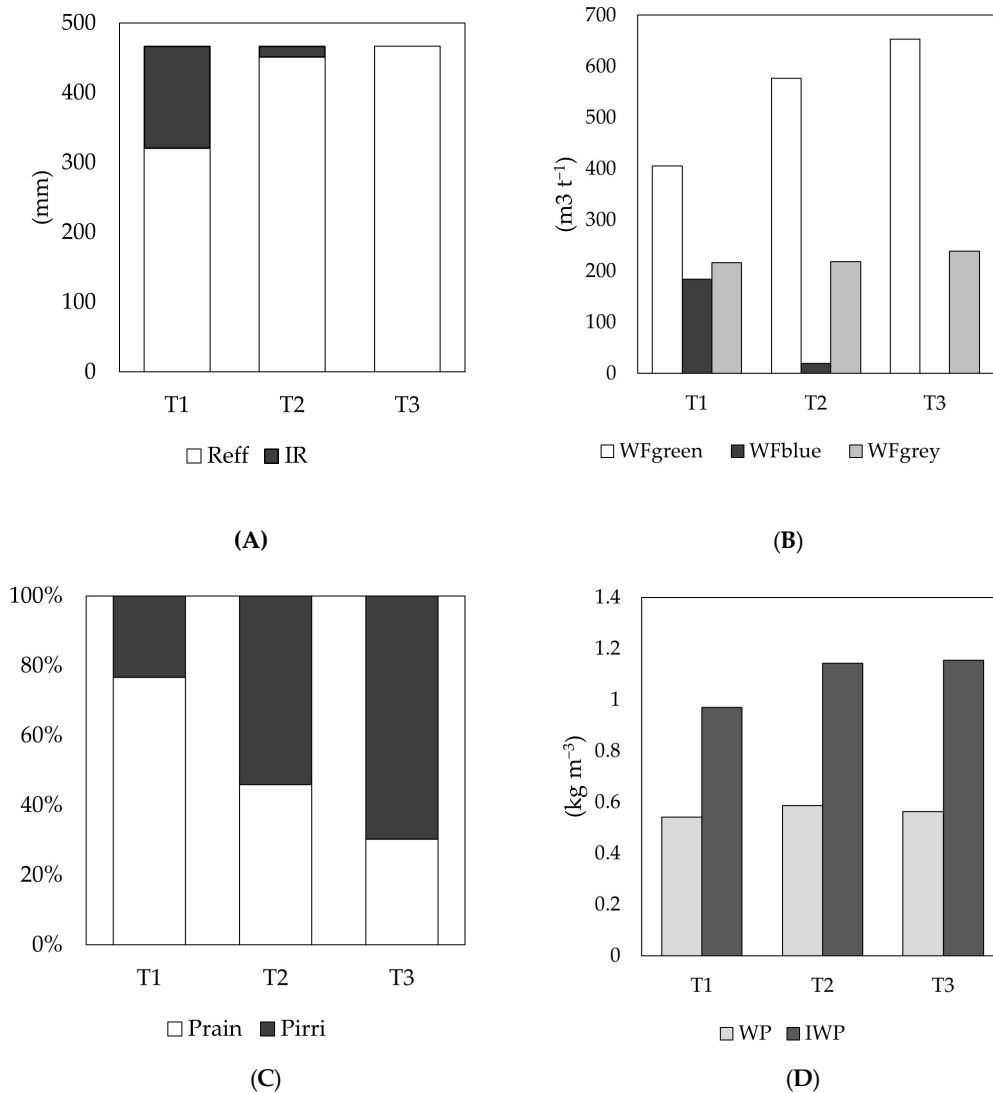


Figure 4: Componentes del balance hídrico, huella hídrica y productividad hídrica del cultivo de arroz bajo los tratamientos evaluados. (A) Componentes de la huella hídrica efectiva. (B) Relación entre las precipitaciones efectivas y los requerimientos de riego. (C) Composición de las pérdidas por percolación. (D) Productividad total del agua y riego. T1, T2 y T3 representan los tratamientos de manejo de riego evaluados. WF_{verde} , WF_{azul} , y WF_{gris} denotan las huellas hídricas verde, azul y gris, respectivamente. Reff: lluvia efectiva; IR: requerimiento de riego; Prain: capa percolada de lluvia; Pirri: capa percolada de agua de riego; WP: productividad total del agua; IWP: productividad del agua de riego.

Las pérdidas por percolación se mantuvieron constantes en los tres tratamientos ($425,4 \text{ mm}$). Sin embargo, su composición variaba dependiendo de los intervalos de riego, siendo los riegos más espaciados los que resultaban en mayores pérdidas referidas al volumen aplicado (Figura 4C). La productividad total del agua (WP) exhibió valores similares en todos los tratamientos, oscilando entre $0,54$ y $0,59 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (Figura 4D). Por el contrario, la productividad del agua de riego (IWP) fue notablemente mayor en T2 ($1,14 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) y T3 ($1,15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) comparado con T1 ($0,97 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$).

4. DISCUSIÓN

Los resultados de los parámetros evaluados indican que los diferentes tratamientos no afectaron significativamente el número de macollos ni la producción de panículas, ya que todos los tratamientos cumplieron adecuadamente con los requerimientos hídricos del cultivo. En consecuencia, la producción de macollos y panículas se mantuvo estable, sin diferencias significativas entre los niveles de inundación aplicados. Estos hallazgos coinciden con los informados por Sarwar y Khanif [48], quien afirmó que el estrés hídrico no afecta la producción de macollos y panículas siempre que el cultivo se mantenga por encima del nivel de saturación. Esto se ve reforzado por las observaciones de Zhang et al. [49], quien demostró que el riego controlado con recolección de lluvia puede preservar parámetros fisiológicos estables en el arroz, incluso bajo estrategias de ahorro de agua. En cuanto a la altura de la planta, nuestros resultados difieren de los de Talpur et al. [50], quienes observaron diferencias significativas durante la etapa intermedia de crecimiento del cultivo en un sistema en contenedores. Señalaron además que la altura de la planta era mayor en los tratamientos con una capa de agua más baja. Por el contrario, para la longitud de la panícula, Konaté et al. [51] informaron que este parámetro no se ve afectado incluso en condiciones de estrés hídrico. En nuestro estudio, aunque se ampliaron los intervalos de riego, no se alcanzaron situaciones de estrés hídrico, ya que el nivel freático no descendió por debajo del punto de saturación.

A pesar de no haberse encontrado diferencias significativas entre los tratamientos evaluados, se observó una tendencia en la que T3 presentó menores rendimientos (FY2: 7,14 t·ha⁻¹) en comparación con el sistema de inundación optimizado (FY2: 7,82 t·ha⁻¹) y el sistema de riego continuamente inundado (FY2: 8,69 t·ha⁻¹). Esta tendencia se puede atribuir a las limitaciones asociadas con los sistemas de riego con intervalos de reposición espaciados, similares a las condiciones de secano, donde las sequías prolongadas o las lluvias erráticas, junto con la proliferación de plagas, enfermedades y malezas, plantean desafíos importantes para el cultivo de arroz [52]. Además de estas limitaciones agronómicas, los factores socioeconómicos contribuyen a reducir la eficiencia técnica en el manejo de cultivos [53]. En consonancia con ello, Autovino et al. [54] demostró que para optimizar la gestión del riego con agua es necesario considerar factores agronómicos y económicos (p. ej., rendimiento del cultivo, uniformidad de la distribución del campo, evaluaciones económicas). Sin embargo, a pesar de estas limitaciones, nuestros resultados indican que los rendimientos obtenidos superan los promedios globales reportados tanto para secano (2,3 t·ha⁻¹) y de regadío (5,0 t·ha⁻¹) sistemas arroceros, así como los promedios estimados para el distrito de Juan Guerra en la región de San Martín del Perú (7–8 t·ha⁻¹) [18,55,56]. Esta tendencia puede explicarse por las condiciones climáticas en el área de estudio, ya que las precipitaciones durante el período experimental fueron suficientes para satisfacer las necesidades de agua del cultivo de arroz. En ese sentido, Kima et al. [57] demostró que un suelo saturado con riego semanal puede alcanzar altos niveles de eficiencia hídrica sin pérdidas significativas de rendimiento. Además, las tecnologías de ahorro de agua, como la humectación y el secado alternativos, han demostrado ser eficaces no sólo para reducir el uso de agua sino también para ofrecer beneficios agronómicos y ambientales más amplios, como menores emisiones de metano, menor incidencia de plagas y enfermedades, mejor calidad del grano y mayores rendimientos [58]. Además, estudios como el de Gao et al. [59] demostró que las estrategias moderadas de ahorro de agua (reducción del 20%) pueden incluso superar al riego convencional en rendimiento y calidad de grano, gracias a una mejor fisiología y al equilibrio de especies reactivas de oxígeno.

La importancia antes mencionada de la producción de cultivos de arroz en la selva peruana resalta la necesidad de desarrollar y evaluar variedades de arroz que se adapten bien a las condiciones específicas de la región amazónica. Aunque la variedad de arroz INIA 516 LM1-La Unión 23 fue desarrollada para la Región de San Martín bajo las condiciones específicas de riego del Valle del Alto Mayo [35], nuestros hallazgos sugieren que tiene el potencial de adaptarse a otros regímenes de riego utilizados en diferentes regiones amazónicas con, en promedio, una mejor

disponibilidad de agua. Además, nuestros resultados de rendimiento muestran rendimientos superiores a otras variedades adaptadas a condiciones similares como Esperanza, Conquista y Capirona [60].

Esta adaptabilidad lo convierte en un candidato prometedor para un cultivo más amplio en diversos entornos dentro de la Amazonía. Además, aunque el uso de patrones de riego que ahorran agua, como el riego intermitente, puede afectar ciertos parámetros agronómicos, un metanálisis mostró que estas técnicas reducen el CH₄ emisiones en un 52,3% y CO₂-emisiones equivalentes en un 18,6% [61].

En cuanto a la incidencia de virus de hoja blanca e infecciones bacterianas, el tratamiento con T3 tuvo una mayor prevalencia de la enfermedad, aunque las diferencias no fueron estadísticamente significativas. Esto, a su vez, puede afectar negativamente los parámetros de rendimiento, como se refleja en los resultados obtenidos. Sin embargo, no se detectaron diferencias significativas, lo que coincide con estudios que sugieren que los sistemas de tierras bajas de secano no proporcionan condiciones óptimas para el desarrollo de enfermedades y plagas de insectos [62]. Además, Zhang et al. [49] y Tyagi et al. [63] coinciden en que los sistemas de riego controlado, cuando se gestionan adecuadamente con monitoreo de humedad y fertilización ajustada, no aumentan los niveles de estrés fitosanitario, especialmente cuando se mantiene un equilibrio entre la humedad y la recolección eficiente de la lluvia.

La huella hídrica proporciona una visión integral de las contribuciones de las precipitaciones y el riego al consumo de agua de los cultivos y el impacto potencial de la movilización de nutrientes y contaminantes en los cuerpos de agua receptores [64]. Su análisis debe considerar las oportunidades y desafíos del contexto hídrico regional y al mismo tiempo tener en cuenta la sensibilidad de la agricultura a las variaciones espaciotemporales [65,66]. Específicamente para el cultivo de arroz, las variaciones climáticas, edáficas y de gestión influyen significativamente en la productividad del agua [31]. Esta heterogeneidad complica la extrapolación de resultados y el desarrollo de estrategias para optimizar el uso del agua [66]. Tradicionalmente, el arroz se cultiva bajo inundaciones continuas, lo que puede maximizar la producción debido al mayor consumo de agua y una mayor huella hídrica azul [64]. Este estudio cuantificó la WF_{verde} y WF_{azul} basado en los volúmenes de agua consumidos por la evapotranspiración de las plantas excluyendo las pérdidas por percolación [28]. Sin embargo, la validez de este supuesto depende en gran medida del factor suelo y de la frecuencia de riego. En particular, la baja permeabilidad de los suelos arcillosos limitó el movimiento del agua hacia horizontes más profundos. Un volumen de percolación estimado de 4254 m³·ha⁻¹ se registró para el área de estudio, representando el 29–34% del aporte total de agua (es decir, lluvia + riego efectivo). La simulación de pérdidas por percolación fue similar en todos los tratamientos, ya que una vez que el suelo alcanzó la saturación y se mantuvo una capa de agua superficial, el movimiento del agua a través del suelo se produjo a un ritmo casi constante (K_{sat} , conductividad hidráulica saturada) [67]. En este contexto, es fundamental analizar cómo las precipitaciones y los insumos de riego influyen en el cambio del volumen de percolación dependiendo de la frecuencia y el momento de su aplicación. Bajo el tratamiento tradicional T1, las precipitaciones representaron la mayor proporción de percolación, mientras que en T2 y T3 este porcentaje disminuyó. Con una reposición frecuente de riego cada 4 días (T1), la eficiencia en el uso del agua de lluvia fue menor (49,6%). Sin embargo, con intervalos de riego más largos (T3), las precipitaciones se utilizaron de manera más eficiente, reduciendo las pérdidas por percolación y logrando una eficiencia de aproximadamente el 80,0%. Además, la capa de reposición de riego por evento fue mayor en T3 que en T1. Sin embargo, el requerimiento total de riego acumulado fue menor al permitir que la capa de lluvia se repusiera y mantuviera el nivel del agua. Mientras que T1 tenía un requerimiento de riego mayor que T2 (Figura 4A), esto se debió a la estrategia de manejo de mantener una capa de agua por encima de la saturación del suelo más que a las necesidades reales de agua del cultivo. En T3, el riego era innecesario, ya que el suministro oportuno de precipitaciones era suficiente para satisfacer las necesidades de agua del cultivo de arroz. En consecuencia, el modelo no simuló reducciones de rendimiento y no se observaron pérdidas de rendimiento significativas en el campo.

Los patrones de consumo de agua están determinados por la evapotranspiración del cultivo, que a su vez depende del coeficiente del cultivo (K_c). Este factor integra los efectos de las características biométricas y fisiológicas del cultivo, las prácticas de manejo y las condiciones climáticas y del suelo asociadas [68]. Para el presente estudio, el inicial ($K_{c\text{ ini}}$: 1.10), mitad de temporada ($K_{c\text{ medio}}$: 1.21), y fin de temporada ($K_{c\text{ fin}}$: 0,89) Los coeficientes de cultivo se estimaron con base en el método de ajuste de la FAO para las condiciones climáticas locales [37]. Sin embargo, es necesario ampliar los esfuerzos de calibración de los coeficientes de cultivo (K_c) a través de observaciones de campo que capturan las características específicas de la variedad, así como las condiciones locales del suelo, climáticas y de manejo [69,70].

Por un lado, el reciente lanzamiento de la variedad INIA 516 LM1–La Unión 23 [71] limitó la disponibilidad de publicaciones anteriores. Además, hay información científica limitada disponible sobre los coeficientes de cultivo (K_c) de arroz en climas semiáridos y subhúmedos en América del Sur [72,73]. Entre ellos, se han reportado valores tabulados tanto diferenciados como similares a los de la FAO, lo que refuerza la necesidad de ampliar la investigación en esta línea de trabajo

En cuanto a la huella hídrica, los hallazgos descritos anteriormente se reflejan en un WF_{verde} mayor que WF_{azul} en todos los tratamientos. Esto indica que las precipitaciones cumplieron significativamente con los requerimientos hídricos del cultivo en las condiciones de estudio y las estrategias de riego propuestas (T1, T2 y T3). En consecuencia, en este estudio, WF_{verde} aumentó a medida que WF_{azul} disminuyó, cubriendo en última instancia el consumo total de agua del cultivo en T3. Esto sugiere que, dadas las condiciones meteorológicas del área de estudio, un cronograma de riego más espaciado permitió un mejor aprovechamiento de las precipitaciones y al mismo tiempo redujo el volumen de agua de riego aplicada. Estos hallazgos se alinean con estudios previos que demuestran que las técnicas de riego intermitente pueden reducir el consumo de agua hasta en un 30% en comparación con el riego por inundación continua sin afectar significativamente el rendimiento [30,74,75], incluso en regiones tropicales [30,41]. Además, Silalertruksa et al. [76] demostró que la recolección de agua de lluvia en regiones tropicales puede reducir la huella de escasez de agua hasta en un 17%, particularmente en sistemas que emplean riego de matriz alternativa. Históricamente y ecológicamente, Iriarte et al. [77] destaca también que en la Amazonia existen desde hace mucho tiempo formas sostenibles de gestión del agua basadas en el uso eficiente del agua disponible, como lo ejemplifica la domesticación temprana del arroz en los humedales amazónicos.

El riego por inundaciones, aunque eficaz en términos de rendimiento, implica un alto consumo de agua, lo que aumenta la huella hídrica azul y compromete la disponibilidad de agua en zonas con estrés hídrico [31]. La relación entre WF_{verde} y WF_{azul} Los insumos pueden variar considerablemente debido a variaciones temporales y espaciales de factores agroclimáticos, geomorfológicos y edáficos [32,64]. Por ejemplo, en distritos cercanos de la India, la huella hídrica de consumo ($WF_{\text{verde}} + WF_{\text{azul}}$) se ha informado que oscila entre 3.980,43 y 5.924,77 $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ [32], mientras que las estimaciones para las localidades de las llanuras indogangéticas oscilan entre 1920 y 2660 $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ [33]. Comparativamente, los valores de WF calculados en este estudio son similares a los informados por Mboyerwa et al. [30] para África tropical (Etiopía) pero inferiores a los informados por Martins et al. [41] para el sureste de Brasil (1554 $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$), una región con condiciones climáticas similares. De la misma manera, Recktenwalt et al. [78] determinó el WF del arroz entre 783–1348 $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ con una baja participación del WF_{gris} . Por otro lado, estudios previos de FM realizados en la costa peruana contrastan con nuestros hallazgos, debido al pequeño volumen acumulado de lluvia que resulta en una contribución no significativa de FM_{verde} [79]. Esto sugiere que la variedad INIA 516 LM1-La Unión 23 se ha adaptado con éxito a las condiciones locales, demostrando un uso eficiente del agua disponible manteniendo el rendimiento promedio regional (7,87 $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$) en todos los tratamientos [18].

Por otro lado, los desafíos inherentes asociados con la recopilación de datos in situ y las limitaciones metodológicas relacionadas con los límites estandarizados a menudo resultan en WF_{gris} siendo pasado por alto en los análisis de la huella hídrica [34,66,80,81]. En el cultivo de arroz, las pérdidas de nutrientes por lixiviación y escorrentía dependen de factores como el tipo y la dosis del fertilizante aplicado, así como la gestión del agua de riego [82]. Este estudio determinó los requerimientos nutricionales del cultivo con base en el análisis del suelo y las recomendaciones de fertilizantes siguieron las prácticas locales. El riego se gestionó en estanques sin drenaje postrasplante, lo que limitó el transporte de nutrientes a través de la escorrentía superficial. En consecuencia, la lixiviación se convirtió en el proceso dominante. Sin embargo, dada la naturaleza arcillosa del suelo, las tasas de infiltración se mantuvieron bajas. Como se mencionó anteriormente, las pérdidas por percolación simuladas fueron similares en todos los tratamientos. En estas condiciones, los coeficientes de pérdida de fertilizantes se estimaron con base en Franke et al. [43]. Además, los procesos de utilización y transformación de fertilizantes influyen en la lixiviación y las pérdidas de nutrientes al medio ambiente.

En cuanto al nitrógeno, las condiciones anaeróbicas resultantes de la constante de saturación del suelo inhibieron los microorganismos nitrificantes al tiempo que promovieron la desnitrificación, lo que llevó a la producción de amonio (NH_4^+-N) como forma iónica predominante del nitrógeno lixiviado [82]. En este contexto, el factor de lixiviación de nitrógeno estimado del 10,6% coincide estrechamente con los valores informados por Qi et al. [82] para diferentes formas de nitrógeno bajo inundaciones tradicionales (10,7%) y riego superficial con manejo de esclusas profundas (7,3%). Mientras tanto, el alto contenido de arcilla y materia orgánica y la baja concentración de fósforo disponible en los horizontes superficiales afectaron la difusión y movilidad del fósforo, limitando así sus pérdidas por lixiviación a un factor del 0,26%.

En este estudio, el WF_{gris} representó aproximadamente el 22% de la huella hídrica total de la producción de arroz. Sin embargo, su estimación mediante evaluación indirecta debe complementarse con el monitoreo de la calidad del agua tanto en los puntos de entrada como de salida de las parcelas, así como en los cuerpos de agua receptores, para evaluar su capacidad de purificación. Las herramientas más comunes para medir la lixiviación de contaminantes en parcelas experimentales incluyen tanto la metodología de extracción con ventosa cerámica como la del lisímetro de drenaje [83]. Sin embargo, las limitaciones económicas inherentes de estas técnicas deben abordarse mediante investigaciones que proporcionen metodologías para cuantificar la calidad y cantidad del agua de lixiviación [83]. Esto permitiría realizar ajustes más precisos a las recomendaciones de fertilizantes adaptadas a los agroecosistemas tropicales. Además, sería valioso integrar estudios ambientales sobre la huella de carbono y las emisiones de gases de efecto invernadero, dado su vínculo con los procesos de inundación [84]. Dadas estas consideraciones, el concepto de huella hídrica tiene un fuerte componente ambiental, que las prioridades de los agricultores' pueden eclipsar, ya que su enfoque principal es maximizar los rendimientos y garantizar la rentabilidad [85]. El agua no se percibe como un recurso limitante en el área de estudio, lo que resulta en un bajo costo de oportunidad. En consecuencia, las posibles mejoras en la productividad del agua deberían apuntar a asignar el excedente de agua a la producción agrícola de alto valor [86]. La transición hacia sistemas de producción más eficientes en el uso del agua debe considerar la viabilidad económica, la eficiencia energética de las actividades de gestión asociadas (es decir, el consumo de combustible para la extracción y distribución de agua) y la accesibilidad de tecnologías sostenibles en diversos contextos socioeconómicos. Si bien la productividad del arroz ha sido ampliamente estudiada, el lanzamiento de la variedad INIA 516 LM1-La Unión 23 es relativamente reciente [71], destacando la necesidad de realizar más investigaciones para desarrollar un paquete integral de apoyo a los agricultores.

Nuestros hallazgos indican que reponer la capa de agua cada 15 días no resultó en pérdidas significativas de rendimiento comercial en comparación con las inundaciones continuas con un intervalo de reposición de 4 días. La tendencia no significativa en la reducción del rendimiento comercial justifica la mayor huella hídrica observada en este tratamiento (T3). Sin embargo, esta estrategia de riego también optimizó el uso de los recursos hídricos al mejorar la eficiencia de la utilización del agua de lluvia. Estos resultados sugieren que, para la variedad de arroz INIA 516 LM1 cultivada durante la temporada octubre–febrero, la gestión del riego se puede ajustar a intervalos de reposición de 15 días, siempre que las precipitaciones mantengan la capa de saturación del suelo dentro de los estanques. En el contexto del cambio climático, se ha observado que el rango de temperatura óptimo para el cultivo de arroz es de aproximadamente 28–32 °C. Más allá de este rango, otros aumentos de temperatura pueden resultar perjudiciales, con un umbral crítico de alrededor de 35 °C. [87]. Para las temporadas de crecimiento de octubre–febrero en el área de estudio, los modelos climáticos estiman temperaturas promedio de 29,3 °C y 33,1 °C en los escenarios de cambio climático más optimistas (SSP1-2,6) y más pesimistas (SSP5-8,5), respectivamente; así como temperaturas máximas promedio de 35,0 °C y 38,6 °C [5]. Esto presenta una perspectiva desafiante que nos obliga a ampliar los esfuerzos de investigación hacia una mejor gestión del cultivo de arroz en la selva tropical sudamericana, con un enfoque particular en optimizar la gestión del agua como estrategia adaptativa [87]. Las investigaciones futuras deberían investigar estrategias de gestión del agua más estrictas, ampliar las campañas de evaluación para incorporar ensayos en estación seca, implementar sensores de humedad del suelo a diferentes profundidades, compararlos con variedades resistentes al estrés hídrico y evaluar los impactos potenciales del cambio climático en diferentes escenarios proyectados.

Las investigaciones futuras deberían investigar estrategias de gestión del agua más estrictas, ampliar las campañas de evaluación para incorporar ensayos en estación seca, implementar sensores de humedad del suelo a diferentes profundidades, compararlos con variedades resistentes al estrés hídrico y evaluar los impactos potenciales del cambio climático en diferentes escenarios proyectados. Además, es fundamental resaltar la importancia de desarrollar investigaciones que consideren diversos patrones de fertilización nitrogenada en conjunto con el manejo del riego [59,63] y mediciones in situ de la lixiviación de nitratos, el principal contaminante en los arrozales. Además, sería beneficioso incluir índices complementarios como la Huella de Degradación del Agua (WDF) o el Indicador de Contaminación del Agua (PWI) para integrar la toxicidad de los elementos y su efecto sobre la funcionalidad del agua en ecosistemas potencialmente afectados; o la Huella de Escasez de Agua (WSF) [76], que permite identificar regiones donde el uso intensivo de agua agrícola podría generar desequilibrios. Implementar una gestión eficiente del riego del arroz es esencial para promover múltiples Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), incluidos el ODS 2 (Hambre Cero), el ODS 6 (Agua Limpia y Saneamiento), el ODS 12 (Consumo y Producción Responsables) y el ODS 13 (Acción Climática) [88].

5. CONCLUSIONES

Si las condiciones climáticas siguen siendo favorables, la implementación de estrategias de riego a más largo plazo podría representar una alternativa viable para reducir el consumo de agua sin comprometer significativamente la producción de arroz. Las proyecciones futuras respaldan esta alternativa garantizando la disponibilidad de agua la mayor parte del tiempo. Sin embargo, los aumentos de temperatura deben analizarse en profundidad como un factor de fracaso de los cultivos. Optimizar la utilización de las precipitaciones en la gestión del riego puede reducir la huella hídrica azul y mejorar la sostenibilidad de los cultivos, particularmente en regiones con estrés hídrico. Sin embargo, se debe considerar el potencial de una mayor incidencia de enfermedades y plagas en sistemas con una frecuencia de riego reducida. Esto subraya la importancia de integrar estrategias eficaces de gestión fitosanitaria para mitigar los riesgos potenciales y garantizar rendimientos estables.

Este estudio proporciona información esencial sobre el impacto de diferentes estrategias de riego en el rendimiento del arroz y la eficiencia hídrica. La capacidad de la variedad INIA 516 LM1-La Unión 23 para adaptarse a intervalos de riego extendidos sin reducir significativamente el rendimiento comercial resalta su potencial para el cultivo en condiciones de disponibilidad limitada de agua. Estos hallazgos son particularmente relevantes para mejorar la sostenibilidad de los cultivos y optimizar la gestión de los recursos hídricos en la región de San Martín y otras áreas con condiciones agroclimáticas similares.

Se recomiendan estudios a largo plazo para evaluar los efectos de las estrategias de riego intermitente sobre la calidad del grano y la sostenibilidad del suelo. Además, se debe explorar la influencia de la variabilidad climática en la respuesta del arroz a diferentes regímenes de riego para desarrollar modelos predictivos para una gestión óptima del agua. Teniendo en cuenta la tendencia ascendente de las precipitaciones y las temperaturas estimadas en diversos escenarios de cambio climático para esta región de estudio, las investigaciones futuras deberían centrarse principalmente en la gestión del estrés térmico en el arroz. Para ello, herramientas como los modelos de desarrollo de cultivos han demostrado ser robustas y permiten evaluar las estrategias de riego como una alternativa adaptativa. Las investigaciones futuras también deberían evaluar el impacto de las prácticas de riego en las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con el cultivo de arroz con el objetivo de reducir su huella ambiental y contribuir a la mitigación del cambio climático.

En conclusión, los hallazgos de este estudio respaldan la viabilidad de implementar estrategias de riego más eficientes para el cultivo de arroz. Estos resultados proporcionan evidencia valiosa para desarrollar políticas y prácticas agronómicas que optimicen la eficiencia del uso del agua y al mismo tiempo promuevan la sostenibilidad de la producción de arroz.

Materiales complementarios:

La siguiente información de respaldo se puede descargar en: <https://www.mdpi.com/article/10.3390/w17091262/s1>, Tabla S1. Análisis textural del foso de pruebas en seis horizontes.

Contribuciones de los autores:

Conceptualización, RF-M. y RdCB.; Metodología, RF-M., RdCB y EET-C.; Análisis formal, YA-A.; Investigación, RF-M., JG, AA y AC.; Redacción—preparación del borrador original, RF-M., RdCB y YA-A.; Escritura—revisión y edición, RSA; Supervisión, RS-A. y CL Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiamientos:

Esta investigación fue financiada por el proyecto INIA CUI 2487112 “Mejoramiento de los servicios de investigación y transferencia tecnológica en el manejo y recuperación de suelos agrícolas degradados y aguas para riego en la pequeña y mediana agricultura en los departamentos de Lima, Ancash, San Martín, Cajamarca, Lambayeque, Junín, Ayacucho, Arequipa, Puno y Ucayali”

Declaración de disponibilidad de datos:

Los datos presentados en este estudio están disponibles previa solicitud al autor correspondiente.

Conflicto de intereses:

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

6. Referencias

1. Almazroui, M.; Ashfaq, M.; Islam, M.N.; Rashid, I.U.; Kamil, S.; Abid, M.A.; O'Brien, E.; Ismail, M.; Reboita, M.S.; Sörensson, A.A.; et al. Assessment of CMIP6 Performance and Projected Temperature and Precipitation Changes Over South America. *Earth Syst. Environ.* **2021**, *5*, 155–183. [CrossRef]
2. SENAMHI. *Escenarios Climáticos en el Perú para el año 2030*; Proyecto Segunda Comunicación Nacional del Perú a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático; SENAMHI: Lima, Peru, 2009. Available online: <https://hdl.handle.net/20.500.12542/141> (accessed on 27 December 2024).
3. ANA; Consorcio Tyspa—Tecnoma—Engecorps. *Grupo Inclam Evaluación de Recursos Hídricos en la Cuenca de Huallaga*; Autoridad Nacional del Agua: San Isidro, Peru, 2015.
4. SENAMHI. *Escenarios Climáticos en la cuenca del río Mayo para el año 2030*; Proyecto Segunda Comunicación Nacional del Perú a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático; SENAMHI: Lima, Peru, 2009. Available online: <https://hdl.handle.net/20.500.12542/122> (accessed on 27 December 2024).
5. Fernandez-Palomino, C.A.; Hattermann, F.F.; Krysanova, V.; Vega-Jácome, F.; Menz, C.; Gleixner, S.; Bronstert, A. High-resolution climate projection dataset based on CMIP6 for Peru and Ecuador: BASD-CMIP6-PE. *Sci. Data* **2024**, *11*, 34. [CrossRef]
6. Vargas Rivera, J. *Memoria Descriptiva de Clima*; Zonificación Ecológica Económica de la Región San Martín; Gobierno Regional de San Martín: Moyobamba, Peru, 2005; p. 59.
7. Castro, A.; Davila, C.; Laura, W.; Cubas, F.; Avalos, G.; López-Ocaña, C.; Villena, D.; Valdez, M.; Urbiola, J.; Trebejo, I.; et al. *Climas Del Perú—Mapa de Clasificación Climática Nacional*, 1st ed.; SENAMHI: Lima, Peru, 2021; ISBN 978-612-48315-3-9. Available online: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01404SENA-4.pdf> (accessed on 27 December 2024).
8. Ahmed, M.; Islam, M.K.; Das, S. Climate Change Effects on Crop Area Dynamics in the Cachar District of Assam, India: An Empirical Study. *Nat. Environ. Pollut. Technol.* **2024**, *23*, 2435–2440. [CrossRef]
9. Ritchie, P.D.L.; Parry, I.; Clarke, J.J.; Huntingford, C.; Cox, P.M. Increases in the Temperature Seasonal Cycle Indicate Long-Term Drying Trends in Amazonia. *Commun. Earth Environ.* **2022**, *3*, 199. [CrossRef]
10. Ukkola, A.M.; De Kauwe, M.G.; Roderick, M.L.; Abramowitz, G.; Pitman, A.J. Robust Future Changes in Meteorological Drought in CMIP6 Projections Despite Uncertainty in Precipitation. *Geophys. Res. Lett.* **2020**, *47*, e2020GL087820. [CrossRef]
11. Rocha, L.O.D.S.; Guimaraes, C.R.R.; Oliveira, R.A.P.D. Exploração Do Uso Eficiente de Recursos Hídricos Na Agricultura: Investigação de Técnicas de Irrigação e Tecnologias Para a Minimização Do Desperdício de Água. *Rev. Foco* **2024**, *17*, e4950. [CrossRef]
12. Xue, J.; Guan, H.; Huo, Z.; Wang, F.; Huang, G.; Boll, J. Water Saving Practices Enhance Regional Efficiency of Water Consumption and Water Productivity in an Arid Agricultural Area with Shallow Groundwater. *Agric. Water Manag.* **2017**, *194*, 78–89. [CrossRef]
13. ANA. *Plan Nacional de Recursos Hídricos del Perú*; Carrillo Mendoza, J.L., Inga Colonia, C., Eds.; ANA: San Isidro, Peru, 2013.
14. Mekonnen, M.M.; Pahlow, M.; Aldaya, M.M.; Zarate, E.; Hoekstra, A.Y. Sustainability, Efficiency and Equitability of Water Consumption and Pollution in Latin America and the Caribbean. *Sustainability* **2015**, *7*, 2086–2112. [CrossRef]
15. MINAM. *Tercera Comunicación Nacional del Perú a la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático*; MINAM: Lima, Perú, 2016.
16. Raico Arce, V.; Stehli Torrecilla, H.; Sulca Contreras, R. *Estudio Prospectivo sobre el Estrés Hídrico y la Inseguridad Alimentaria en el Perú*; Centro Nacional de Planeamiento Estratégico: Lima, Peru, 2023.
17. Mohidem, N.A.; Hashim, N.; Shamsudin, R.; Che Man, H. Rice for Food Security: Revisiting Its Production, Diversity, Rice Milling Process and Nutrient Content. *Agriculture* **2022**, *12*, 741. [CrossRef]
18. MIDAGRI. Perfil Productivo y Competitivo de los Principales Cultivos del Sector. 2025. Available online: https://siea.midagri.gob.pe/siea_bi/ (accessed on 27 December 2024).
19. Romero, C.A. *Observatorio de Siembras y Perspectivas de la Producción—Arroz: Campaña Agrícola 2023/2024*; Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI): Lima, Peru, 2024. Available online: <https://repositorio.midagri.gob.pe/bitstream/20.500.13036/1673/1/Observatorio->

de%20siembras%20y%20perspectivas%20de%20produccion%20arroz%20enero%202024.pdf (accessed on 11 April 2025).

20. Arouna, A.; Dzomeku, I.K.; Shaibu, A.-G.; Nurudeen, A.R. Water Management for Sustainable Irrigation in Rice (*Oryza sativa* L.) Production: A Review. *Agronomy* **2023**, *13*, 1522. [CrossRef]
21. Liu, T.; Bruins, R.; Heberling, M. Factors Influencing Farmers' Adoption of Best Management Practices: A Review and Synthesis. *Sustainability* **2018**, *10*, 432. [CrossRef] [PubMed]
22. Gavilán Luna, F.C.; Barzola Ordinola, C.M.; Falconí Zambrano, C.J.; Loqui Sánchez, A.J. Efecto Del Riego Tradicional En La Producción, Eficiencia Hídrica y Emisión de Metano Del Cultivo de Arroz. *Bioagro* **2024**, *36*, 15–26. [CrossRef]
23. FAO. *Recomendaciones de Política Pública para Enfrentar el Cambio Climático y la Vulnerabilidad de la Seguridad Alimentaria*; FAO: Rome, Italy, 2017.
24. Williams, J.F.; Roberts, S.R.; Hill, J.E.; Scardaci, S.C.; Tibbits, G. IPM: Managing water for weed control in rice. *Calif. Agric.* **1990**, *44*, 7–10. [CrossRef]
25. Wickramasinghe, D.; Devasinghe, U.; Suriyagoda, L.D.B.; Egodawatta, C.; Benaragama, D.I. Weed Dynamics under Diverse Nutrient Management and Crop Rotation Practices in the Dry Zone of Sri Lanka. *Front. Agron.* **2023**, *5*, 1211755. [CrossRef]
26. Rao, A.N.; Wani, S.P.; Ahmed, S.; Haider Ali, H.; Marambe, B. An Overview of Weeds and Weed Management in Rice of South Asia. In *Weed Management in Rice in the Asian-Pacific Region*; Asian-Pacific Weed Science Society (APWSS); The Weed Science Society of Japan: Japan; Indian Society of Weed Science: India, 2017; pp. 247–281; ISBN 978-81-931978-4-4. Available online: <https://core.ac.uk/download/pdf/219475058.pdf> (accessed on 16 January 2025).
27. Laphatphakkhanut, R.; Puttrawutichai, S.; Dechkrong, P.; Preuksakarn, C.; Wichaidist, B.; Vongphet, J.; Suksaroj, C. IoT-Based Smart Crop-Field Monitoring of Rice Cultivation System for Irrigation Control and Its Effect on Water Footprint Mitigation. *Paddy Water Environ.* **2021**, *19*, 699–707. [CrossRef]
28. Aldaya, M.M.; Chapagain, A.K.; Hoekstra, A.Y.; Mekonnen, M.M. *The Water Footprint Assessment Manual*; Routledge: Abingdon, UK, 2012.
29. Riccetto, S.; Capurro, M.C.; Roel, Á. Estrategias Para Minimizar El Consumo de Agua Del Cultivo de Arroz En Uruguay Manteniendo Su Productividad. *Agrociencia Urug.* **2017**, *21*, 109–119. [CrossRef]
30. Mboyerwa, P.; Kibret, K.; Mtakwa, P.; Aschalew, A. Evaluation of Growth, Yield, and Water Productivity of Paddy Rice with Water-Saving Irrigation and Optimization of Nitrogen Fertilization. *Agronomy* **2021**, *11*, 1629. [CrossRef]
31. Bouman, B.A.M.; Humphreys, E.; Tuong, T.P.; Barker, R. Rice and Water. *Adv. Agron.* **2007**, *92*, 187–237.
32. Ghosh, A.; Warwade, P. Impact of forest cover and human intervention on crop water footprint. *J. Water Clim. Change* **2024**, *15*, 5998–6012. [CrossRef]
33. Chakrabarti, B.; Mina, U.; Chakraborty, D.; Pathak, H.; Sharma, D.K.; Jain, N.; Jatav, R.S.; Dixit, P.; Katiyar, R.; Harit, R.C. Water, Carbon and Nitrogen Footprints of Major Crops in Indo-Gangetic Plains. In *Geospatial Infrastructure, Applications and Technologies: India Case Studies*; Sarma, N.L., Acharya, P.S., Sen, S., Eds.; Springer: Singapore, 2018; pp. 401–411.
34. Gil, R.; Bojacá, C.R.; Schrevens, E. Uncertainty of the Agricultural Grey Water Footprint Based on High Resolution Primary 585 Data. *Water Resour. Manag.* **2017**, *31*, 3389–3400. [CrossRef]
35. Torres-Chávez, E.E. ARROZ INIA 516—LM1 LA UNIÓN 23 Nueva Variedad de Arroz de Riego Para La Selva Alta Del Perú; 587 Programa Nacional de Arroz; Instituto Nacional de Innovación Agraria: San Martín, Peru, 2023.
36. Rosero, M. Sistema de Evaluación Estandar Para Arroz. 1983. Available online: <https://hdl.handle.net/10568/69571> (accessed on 23 January 2025).
37. Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*; FAO Irrigation and Drainage Paper 56; FAO: Rome, Italy, 1988; Volume 300, p. D05109; ISBN 92-5-104219-5.
38. Dastane, N.G. *Effective Rainfall in Irrigated Agriculture*; FAO Irrigation and Drainage Paper; FAO: Rome, Italy, 1978; ISBN 527 978-92-5-100272-8.
39. Steduto, P.; Hsiao, T.C.; Fereres, E.; Raes, D. *Crop Yield Response to Water*; FAO Irrigation and Drainage

- Paper 66; FAO: Rome, Italy, 2012; ISBN 978-92-5-107274-5.
40. Raes, D.; Steduto, P.; Hsiao, T.C.; Fereres, E. Chapter 2—Users guide. In *Reference Manual AquaCrop Version 71*; FAO: Rome, Italy, 2023.
 41. Martins, M.A.; Tomasella, J.; Bassanelli, H.R.; Paiva, A.C.E.; Vieira, R.M.S.P.; Canamary, E.A.; Alvarenga, L.A. On the Sustainability of Paddy Rice Cultivation in the Paraíba Do Sul River Basin (Brazil) under a Changing Climate. *J. Clean. Prod.* **2023**, *386*, 135760. [[CrossRef](#)]
 42. Roudbari, M.V.; Dehnavi, A.; Jamshidi, S.; Yazdani, M. A Multi-Pollutant Pilot Study to Evaluate the Grey Water Footprint of Irrigated Paddy Rice. *Agric. Water Manag.* **2023**, *282*, 108291. [[CrossRef](#)]
 43. Franke, N.A.; Boyacioglu, H.; Hoekstra, A.Y. *Grey Water Footprint Accounting. Tier 1 Supporting Guidelines*; Value of Water Research Report Series No. 65; UNESCO-IHE: Delft, The Netherlands, 2013. Available online: <https://www.waterfootprint.org/resources/Report65-GreyWaterFootprint-Guidelines.pdf> (accessed on 12 February 2025).
 44. ANA. Visor por Cuenca—Sistema Nacional de Información de Recursos Hídricos. 2025. Available online: <https://snirh.ana.gob.pe/VisorPorCuenca/> (accessed on 14 April 2025).
 45. ANA. Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM: Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y Estableceden Disposiciones Complementarias. Available online: <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/DS-004-2017-MINAM.pdf> (accessed on 14 April 2025).
 46. Wickham, H.; François, R.; Henry, L.; Müller, K.; Vaughan, D. Dplyr: A Grammar of Data Manipulation, Version 1.1.4. 2023. Available online: <https://cran.r-project.org/web/packages/dplyr/index.html> (accessed on 14 April 2025). [[CrossRef](#)]
 47. de Mendiburu, F. *Agricolae: Statistical Procedures for Agricultural Research*, Version 1.3-7. 2023. Available online: <https://cran.r-project.org/web/packages/agricolae/index.html> (accessed on 14 April 2025). [[CrossRef](#)]
 48. Sarwar, M.J.; Khanif, Y.M. Low Water Rice Production and Its Effect on Redox Potential and Soil pH. *J. Agron.* **2005**, *4*, 142–146. [[CrossRef](#)]
 49. Zhang, S.; Rasool, G.; Wang, S.; Guo, X.; Zhao, Z.; Zhang, Y.; Wei, Z.; Xia, Q. Effect of Irrigation and Cultivation Modes on Growth, Physiology, Rice Yield Parameters and Water Footprints. *Agronomy* **2024**, *14*, 1747. [[CrossRef](#)]
 50. Talpur, M.A.; Changying, J.; Junejo, S.A.; Tagar, A.A.; Ram, B.K. Effect of Different Water Depths on Growth and Yield of Rice Crop. *Afr. J. Agric. Res.* **2013**, *8*, 4654–4659. [[CrossRef](#)]
 51. Konaté, A.K.; Zongo, A.; Sangaré, J.R.; Dardou, A.; Audebert, A. Effect of Water Stress on Growth, Yield and Yield Components 545 of Rice (*Oryza sativa* L.) Genotypes. *Int. J. Sci. Res. Arch.* **2022**, *5*, 028–038. [[CrossRef](#)]
 52. Dianga, A.I.; Musila, R.N.; Joseph, K.W. Rainfed Rice Farming Production Constrains and Prospects, the Kenyan Situation. In *Integrative Advances in Rice Research*; Huang, M., Ed.; IntechOpen: London, UK, 2021. [[CrossRef](#)]
 53. Mkanthama, J.; Makombe, G.; Kihoro, J.; Ateka, E.M.; Kanjere, M. Technical Efficiency of Rainfed and Irrigated Rice Production in Tanzania. *Irrig. Drain.* **2018**, *67*, 233–241. [[CrossRef](#)]
 54. Autovino, D.; Provenzano, G.; Monserrat, J.; Cots, L.; Barragán, J. Determining Optimal Seasonal Irrigation Depth Based on Field Irrigation Uniformity and Economic Evaluations: Application for Onion Crop. *J. Irrig. Drain. Eng.* **2016**, *142*, 04016037. [[CrossRef](#)]
 55. Maclean, J.; Hardy, B.; Hettel, G. *Rice Almanac: Source Book for One of the Most Important Economic Activities on Earth*, 4th ed.; International Rices Research Institute: Los Baños, Philippines, 2013; ISBN 978-971-22-0300-8.
 56. Arévalo-Aranda, Y.; Rodríguez Toribio, E.; Rosillo Cordova, L.; Díaz-Chuquizuta, H.; Torres Chávez, E.E.; Cruz-Luis, J.; Siqueira Bahia, R.D.C.; Pérez, W.E. Green Manuring and Fertilization on Rice (*Oryza sativa* L.): A Peruvian Amazon Study. *Rev. FCA UNCUYO* **2024**, *56*, 1–13. [[CrossRef](#)]
 57. Kima, A.S.; Chung, W.G.; Wang, Y.-M. Improving Irrigated Lowland Rice Water Use Efficiency under Saturated Soil Culture for Adoption in Tropical Climate Conditions. *Water* **2014**, *6*, 2830–2846. [[CrossRef](#)]
 58. Belder, P.; Bouman, B.; Cabangon, R.; Guoan, L.; Quilang, E.; Yuanhua, L.; Spiertz, J.; Tuong, T. Effect of water-saving irrigation on rice yield and water use in typical lowland conditions in Asia. *Agric. Water Manag.* **2004**, *65*, 193–210. [[CrossRef](#)]
 59. Gao, C.; Lin, M.; He, L.; Tang, M.; Ma, J.; Sun, W. The Impact of Water-Saving Irrigation on Rice

- Growth and Comprehensive Evaluation of Irrigation Strategies. *Agronomy* **2024**, *14*, 1363. [CrossRef]
60. Goigochea-Pinchi, D.; Justino-Pinedo, M.; Vega-Herrera, S.S.; Sanchez-Ojanasta, M.; Lobato-Galvez, R.H.; Santillan-Gonzales, M.D.; Ganoza-Roncal, J.J.; Ore-Aquino, Z.L.; Agurto-Piñarreta, A.I. Yield Prediction Models for Rice Varieties Using UAV Multispectral Imagery in the Amazon Lowlands of Peru. *AgriEngineering* **2024**, *6*, 2955–2969. [CrossRef]
 61. Livsey, J.; Kätterer, T.; Vico, G.; Lyon, S.W.; Lindborg, R.; Scaini, A.; Manzoni, S. Do alternative irrigation strategies for rice cultivation decrease water footprints at the cost of long-term soil health? *Environ. Res. Lett.* **2019**, *14*, 074011. [CrossRef]
 62. Mackill, D.J.; Coffman, W.R.; Garrity, D.P. *Rainfed Lowland Rice Improvement*; International Rice Research Institute: Manila, Philippines, 1996; ISBN 971-22-0071-X.
 63. Tyagi, S.; Naresh, R.K.; Bhatt, R.; Chandra, M.S.; Alrajhi, A.A.; Dewidar, A.Z.; Mattar, M.A. Tillage, Water and Nitrogen Management Strategies Influence the Water Footprint, Nutrient Use Efficiency, Productivity and Profitability of Rice in Typic Ustochrept Soil. *Agronomy* **2022**, *12*, 1186. [CrossRef]
 64. Chapagain, A.K.; Hoekstra, A.Y. The Green, Blue and Grey Water Footprint of Rice from Both a Production and Consumption Perspectives. *Ecol. Econ.* **2011**, *70*, 749–758. [CrossRef]
 65. Mao, Y.; Liu, Y.; Zhuo, L.; Wang, W.; Li, M.; Feng, B.; Wu, P. Quantitative Evaluation of Spatial Scale Effects on Regional Water Footprint in Crop Production. *Resour. Conserv. Recycl.* **2021**, *173*, 105709. [CrossRef]
 66. Demir, M.S.; Muratoglu, A. Water Footprint Concept, Approaches, and Applications: A Comprehensive Review for the Agricultural Sector. *Water Environ. J.* **2025**. early view. [CrossRef]
 67. Elango, L. *Hydraulic Conductivity: Issues, Determination and Applications*; InTech: Rijeka, Croatia, 2011. [CrossRef]
 68. Irmak, S. Evapotranspiration. In *Encyclopedia of Ecology*; Jørgensen, S.E., Fath, B.D., Eds.; Academic Press: Oxford, UK, 2008; pp. 1432–1438.
 69. Pereira, L.S.; Allen, R.G.; Smith, M.; Raes, D. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. *Agric. Water Manag.* **2015**, *147*, 4–20. [CrossRef]
 70. Neira Huamán, E.; Ramos Fernández, L.; Razuri Ramírez, L.R. Coeficiente del cultivo (Kc) del arroz a partir de lisímetro de drenaje en La Molina, Lima-Perú. *Idesia* **2020**, *38*, 49–55. [CrossRef]
 71. INIA. Resolución Jefatural N° 097-2024-INIA: Aprueba la Liberación de la Variedad de Arroz “INIA 516—LM1 La Unión 23”. 2024. Available online: <https://busquedas.elperuano.pe/dispositivo/NL/2301059-1> (accessed on 27 February 2025).
 72. Timm, A.U.; Roberti, D.R.; Streck, N.A.; Gustavo, G.; de Gonçalves, L.; Acevedo, O.C.; Moraes, O.L.L.; Moreira, V.S.; Degrazia, G.A.; Ferlan, M.; et al. Energy Partitioning and Evapotranspiration over a Rice Paddy in Southern Brazil. *J. Hydrometeorol.* **2014**, *15*, 1975–1988. [CrossRef]
 73. Petry, M.T.; Tonetto, F.; Martins, J.D.; Slim, J.E.; Werle, R.; Gonçalves, A.F.; Paredes, P.; Pereira, L.S. Evapotranspiration and crop coefficients of sprinkler-irrigated aerobic rice in southern Brazil using the SIMDualKc water balance model. *Irrig. Sci.* **2024**, *42*, 1–22.
 74. Mekonnen, M.M.; Hoekstra, A.Y. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **2011**, *15*, 1577–1600. [CrossRef]
 75. Lampayan, R.M.; Rejesus, R.M.; Singleton, G.R.; Bouman, B.A.M. Adoption and economics of alternate wetting and drying water management for irrigated lowland rice. *Field Crops Res.* **2015**, *170*, 95–108. [CrossRef]
 76. Silalertruksa, T.; Gheewala, S.H.; Mungkung, R.; Nilsalab, P.; Lecksiwilai, N.; Sawaengsak, W. Implications of Water Use and Water Scarcity Footprint for Sustainable Rice Cultivation. *Sustainability* **2017**, *9*, 2283. [CrossRef]
 77. Iriarte, J.; Elliott, S.; Maezumi, S.Y.; Alves, D.; Gonda, R.; Robinson, M.; de Souza, J.G.; Watling, J.; Handley, J. The origins of Amazonian landscapes: Plant cultivation, domestication and the spread of food production in tropical South America. *Quat. Sci. Rev.* **2020**, *248*, 106582. [CrossRef]
 78. Recktenwalt, F.; Moraes, F.; Pereira, M. Water footprint of irrigated rice in the state of Rio Grande do Sul, 2019/2020 crop. *Environ. Monit. Assess.* **2023**, *195*, 1532. [CrossRef]
 79. Hidalgo Burga, X.A.; Mauricio Gutierrez, L.E.; Campos Vasquez, N. Determination of the Impact of Water Footprint on Rice Crops in Northern Peru. In Proceedings of the 22nd LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: Sustainable Engineering for a

- Diverse, Equitable, and Inclusive Future at the Service of Education, Research, and Industry for a Society 5.0, San Jose, Costa Rica, 17–19 July 2024. [CrossRef]
80. Johnson, J.-M.; Becker, M.; Kaboré, J.E.P.; Dossou-Yovo, E.R.; Saito, K. Alternate wetting and drying: A water-saving technology for sustainable rice production in Burkina Faso? *Nutr. Cycl. Agroecosystems* **2024**, *129*, 93–111. [CrossRef]
 81. Chenoweth, J.; Hadjikakou, M.; Zoumides, C. Quantifying the human impact on water resources: A critical review of the water footprint concept. *Hydrol Earth Syst. Sci.* **2014**, *18*, 2325–2342. [CrossRef]
 82. Qi, D.; Wu, Q.; Zhu, J. Nitrogen and phosphorus losses from paddy fields and the yield of rice with different water and nitrogen management practices. *Sci. Rep.* **2020**, *10*, 9734. [CrossRef] [PubMed]
 83. Zheng, S.; Ni, K.; Chai, H.; Ning, Q.; Cheng, C.; Kang, H.; Ruan, J. Comparative research on monitoring methods for nitrate nitrogen leaching in tea plantation soils. *Sci. Rep.* **2024**, *14*, 20747. [CrossRef] [PubMed]
 84. Rajbonshi, M.P.; Mitra, S.; Bhattacharyya, P. Agro-technologies for greenhouse gases mitigation in flooded rice fields for promoting climate smart agriculture. *Environ. Pollut.* **2024**, *350*, 123973. [CrossRef] [PubMed]
 85. Farstad, M.; Melås, A.M.; Klerkx, L. Climate considerations aside: What really matters for farmers in their implementation of climate mitigation measures. *J. Rural. Stud.* **2022**, *96*, 259–269. [CrossRef]
 86. Amarasinghe, U.A.; Smakhtin, V. Water productivity and water footprint: Misguided concepts or useful tools in water management and policy? *Water Int.* **2014**, *39*, 1000–1017. [CrossRef]
 87. Liu, Z.; Xu, D.; Wang, R.; Guo, X.; Song, Y.; Wang, M.; Cai, Y. Effects of Temperature Fluctuations on the Growth Cycle of Rice. *Agriculture* **2025**, *15*, 99. [CrossRef]
 88. CGIAR. CGIAR Research Program RICE contributions to the United Nations Sustainable Development Goals. Available online: <https://ricecrp.org/wp-content/uploads/2017/03/RICE-and-SDGs.pdf> (accessed on 27 February 2025).

Descargo de responsabilidad/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son únicamente los del autor(es) y colaborador(es) individual y no los del MDPI y/o editor(es). MDPI y/o el/los editor(es) declinan su responsabilidad por cualquier daño a personas o propiedad que resulte de cualquier idea, método, instrucción o producto mencionado en el contenido en el contenido.

7. Anexos

7.1. Evidencia de sumisión del artículo

The screenshot displays the MDPI website interface for article submission. At the top, there is a search bar with the text 'Buscar para artículos:' and a search button. Below this, the article title 'Arroz de secano intermitente var. INIA 516 LM1: Una alternativa sostenible para la cuenca del río Huallaga' is prominently displayed. The authors listed are Ricardo Flores-Márquez, Rita de Cássia Bahia, Yuri Arévalo-Aranda, Edson Esmith Torres-Chávez, Jonathan Guevara, Abner Antezana, Antoni Carranza, Cella Lao, and Richard Solórzano-Acosta. The article is dated 17/9/2025. The submission process is detailed as follows: 'Presentación recibida: 16 de marzo de 2025 / Revisado: 17 de abril de 2025 / Aceptado: 20 de abril de 2025 / Publicado: 23 de abril de 2025'. The article is part of the 'Número Especial Métodos y herramientas para la gestión sostenible del agua agrícola'. The interface includes a sidebar with 'Menú del artículo', 'Editores académicos' (listing Hui Yang, Manoj K. Shukla, and Yuan Yusen), and 'Artículos recomendados'. The main content area has buttons for 'Descargar', 'Explorar figuras', and 'Versiones Notas'.

7.2. Copia de la resolución



“AÑO DE LA RECUPERACIÓN Y CONSOLIDACIÓN DE LA ECONOMÍA PERUANA”

RESOLUCIÓN N° 0520-2025/UPeU-FIA-CF

Lima, Naña, 02 de setiembre de 2025

VISTO:

El expediente de los (las) bachilleres **Abner Giezi Antezana Moscaiza** identificado(a) con código universitario N° 202012017, **Antoni Gabriel Carranza Perez** identificado(a) con código universitario N° 202010145 y **Jonatham Gabriel Guevara Zumaeta** identificado(a) con código universitario N° 202014342, de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión;

CONSIDERANDO:

Que la Universidad Peruana Unión tiene autonomía académica, administrativa y normativa, dentro del ámbito establecido por la Ley Universitaria N° 30220 y el Estatuto de la Universidad;

Que la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, mediante sus reglamentos académicos y administrativos, ha establecido las formas y procedimientos para la sustentación de la tesis en formato artículo;

Que el Comité Dictaminador ha emitido su dictamen aprobando el informe de tesis titulado "Arroz de secano intermitente var. INLA 516 LM1: Una alternativa sostenible para la cuenca del río Huallaga", presentado por los (las) bachilleres **Abner Giezi Antezana Moscaiza**, **Antoni Gabriel Carranza Perez** y **Jonatham Gabriel Guevara Zumaeta** reuniendo de esta manera las condiciones previas para la declaratoria de expedito para la programación de la sustentación;

Estando a lo acordado en la sesión del Consejo de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, celebrada el 02 de setiembre de 2025, y en aplicación del Estatuto y el Reglamento General de investigación de la Universidad;

SE RESUELVE:

1. Declarar expedito a los (las) bachilleres **Abner Giezi Antezana Moscaiza**, **Antoni Gabriel Carranza Perez** y **Jonatham Gabriel Guevara Zumaeta**, para que sustenten la tesis en formato artículo "Arroz de secano intermitente var. INLA 516 LM1: Una alternativa sostenible para la cuenca del río Huallaga", conducente a la obtención del título profesional de Ingeniero Ambiental, el 18 de setiembre a las 11:00 horas, la modalidad presencial, en el Salón de Grados y Títulos.
2. Designar el Jurado de Sustentación, encargado de gestionar la sustentación respectiva, el mismo que queda constituido por los siguientes miembros:
Presidente: Mtra. Betsabeth Teresa Padilla Macedo
Secretario: Ing. Seyei Rengifo Arévalo
Asesor: Mtra. Ceila Paquita Lao Olivares
Co-asesor: Mg. Yuri Gandhi Arevalo Aranda
Vocal 1: Mg. Carmelino Almaraz Villegas
Vocal 2: Mg. Andres Erick Gonzales Lopez

Regístrese, comuníquese y archívese.



Dra. Erika Inés Acuña Salinas
DECANA

-Intermedio
-Jurado (05)
-Secretaría General
-Archivo



Lic. Gina Marita Tito Tolentino
SECRETARIA ACADÉMICA