

Respuesta al fertirriego por goteo en arroz (*orriza sativa*, variedad conarroz 3) en el trópico húmedo costarricense

Response to the drip fertigation in paddy (*orriza sativa*, conarroz 3 variety) in the costarican humid tropic

Gregory Guevara¹, Alexander Mendoza²

Fecha de recepción: 2 de enero, 2023

Fecha de aprobación: 29 de abril, 2023

Guevara, G; Mendoza, A Respuesta al fertirriego por goteo en arroz (*orriza sativa*, variedad conarroz 3) en el trópico húmedo costarricense. *Tecnología en Marcha*. Vol. 37, N° 1. Enero-Marzo, 2024. Pág. 102-113.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i1.6570>

1 Universidad EARTH, Guácimo, Costa Rica.
Correo electrónico: gguevara@earth.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0001-9056-9847>

2 Universidad EARTH, Guácimo, Costa Rica.
Correo electrónico: armendoza@earth.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0001-7701-103X>

Palabras clave

Riego por goteo; fertirriego; arroz.

Resumen

El arroz es uno de los cultivos más extensamente producidos a nivel mundial, el desarrollo de paquetes tecnológicos que ayuden a aumentar su sostenibilidad conduce a impactos positivos en las economías y ambientes a nivel global. El Objetivo de este experimento es demostrar la eficacia en la productividad de la fertirrigación con goteo en la variedad Conarroz 3. Los Materiales y métodos usados fueron dos parcelas de 1000 m² cada una, donde se aplicaron diferentes niveles nutricionales, las mangueras de riego contaban con goteros de 40 cm, con flujo de 1 l·h⁻¹, espaciadas cada 1 m entre ellas. El experimento fue corrido en dos ciclos de producción para analizar el impacto de la variación climática en ambas ventanas de producción. Los Resultados demuestran que con dosis nutricionales al 100 % de su requerimiento, con fertirriego fue posible producir de 6.1 a 6.5 Ton·ha⁻¹ con un rendimiento hídrico de 8-7 kg·ha⁻¹·mm⁻¹ regado, la productividad superó en más del 15%, respecto lo obtenido en su testigo fertilizado de forma convencional al suelo. Se observó una respuesta de la variedad a la variación climática, donde la ventana de producción de mayo a setiembre mostró mejores resultados producto a mayores radiaciones y temperaturas durante el ensayo. Conclusión: es posible aumentar la producción vía fertirriego en la variedad Conarroz 3 y de esta forma introducir el riego por goteo en arroz como un instrumento para aumentar los rendimientos desde una perspectiva meramente nutricional.

Keywords

Drip irrigation; fertigation; rice.

Abstract

Rice is one of the most widely produced crops worldwide, the development of technological service packs that help to increase its sustainability leads to positive impacts on economies and environments at a global level. The objective of this experiment was to demonstrate the efficiency in the productivity of drip fertigation system in the Conarroz 3 variety. The materials and methods used were two plots of 1000 m² each, where different nutritional levels were applied, the irrigation hoses had drippers (40 cm spacing) with flow of 1 l·h⁻¹, spaced every 1 m between them. The experiment was run in two production cycles to analyze the climate impact on production. The Results has shown with nutritional doses applied to 100% of its requirement, with fertigation it was possible to produce 6.1 to 6.5 Ton·ha⁻¹ with a water yield of 8-7 kg·ha⁻¹·mm⁻¹ irrigated, the productivity exceeded in more than 15%, comparing to what could be obtained in a Control with conventionally fertilization applied to the soil. A response of the variety to climatic variation was observed, where the production window from May to September showed better yields results, it was produced by higher radiations and temperatures during the test. Conclusion: it is possible to increase production via fertigation in the Conarroz 3 variety and thus introduce drip irrigation in rice as an instrument to increase yields.

Introducción

El arroz (*Oryza sativa*L.), alimento básico de más de la mitad del planeta es fundamental para la seguridad alimentaria mundial [1], el incremento de su producción es un elemento esencial en la lucha contra el hambre y la desnutrición. El 90 % de la producción de arroz en el mundo se

concentra en los países asiáticos, América es el segundo continente en importancia en relación con la producción mundial de arroz del cual cualquier esfuerzo en su desarrollo impacta positivamente en la humanidad. [2]. En Costa Rica la superficie arrocera cubre más de 33 mil hectáreas en todo el país, donde cerca del 46% se riega, principalmente mediante métodos de inundación principalmente con la variedad Lazarroz FL que cubre cerca del 45% del territorio. [3].

El clima, el agua, la nutrición y la semilla son factores importantes en la productividad en este cultivo; estudiar sobre indicadores de producción como número de panículas, el número de granos por panícula, el peso del grano y la tasa de cuajado de semillas son cruciales para entender los motores del rendimiento del arroz [4] [5], además es crucial conocer de tecnologías que puedan generar su máximo aprovechamiento, como es el caso del fertirriego, el cual consiste en la aplicación controlada del agua y nutrientes en tiempo y forma utilizando riego por goteo, dotando de un flujo bajo de agua por punto de emisión y de forma directa al suelo y sin presión, lo que mejora la disponibilidad hídrica producto a la baja velocidad de aplicación en el suelo [6].

Los avances recientes en el cultivo de arroz de secano hacen que el manejo del cultivo aeróbico mediante fertirriego ahorre agua y aumente la productividad, pero para su éxito es necesario desarrollar nuevas variedades, prácticas de manejo, así como la programación óptima de los nutrientes para obtener un rendimiento rentable. Se ha demostrado que los métodos de riego por goteo y fertirrigación son los métodos más eficientes en cuanto a agua y nutrientes aplicados [7].

El propósito de este experimento es conocer el comportamiento productivo de la variedad de *Conarroz3*, la cual es una variedad promisoría, a diferentes dosis nutricionales aplicadas vía fertirriego en el caribe costarricense, donde por las condiciones de humedad constantes durante la producción, la variable más importante fue el método y cantidad de fertilizantes aplicados en fertirriego, siendo esta prueba especial para medir el impacto de la fertilización fracciona por el goteo.

Materiales y métodos

Descripción del área experimental

En el Laboratorio de Fertirriego de la Universidad EARTH, ubicado en Guácimo de Limón, zona atlántica de Costa Rica, el experimento fue conducido en dos ciclos de producción entre los meses de mayo a setiembre del año 2020 el primero y de diciembre 2020 a abril 2021 en segundo. Durante el periodo experimental las condiciones climáticas fueron monitoreadas y evaluadas y con los parámetros promedio de la zona, típicos de un clima tropical húmedo [8].

Para la implementación del proyecto se realizaron labores culturales para la correcta preparación del área. El suelo fue labrado usando tractores de 80 Hp, se dio un pase de labranza primaria con rastra de disco a una profundidad de 20 cm y suelo se realizó el afinado del terreno y construcción de surcos a 20 cm de espaciamiento usando arado vibrador a 20 cm de espaciamiento. Previo a la colocación de la semilla se realizó una aplicación de herbicida pre-emergente. La siembra y tapado fue manual y posterior a ella se colocaron las mangueras de riego por goteo, se conectó el sistema de riego y se llevó el suelo a capacidad de campo; los diferentes tratamientos fueron monitoreados en su desarrollo a los 30, 60, 95 y 120 días después de siembra, se muestra en la figura 1.



Figura 1. fotos del proceso de experimento en campo.

El área experimental asignada fue de 2000 m², el diseño experimental seguido fue de parcelas subdividas [9] [10] y siguiendo el modelo citado por [11]. El campo estuvo formado por dos bloques principales de fertirriego de 1000 m² cada uno controlados por válvulas de riego automáticas, a lo interno de los bloques los laterales de riego por goteo fueron de 16 mm con goteros a 40 cm y extendidos a un espaciamiento de 1.0 m, su conexión a la tubería secundaria se dio a través de válvulas laterales de polietileno para realizar el control de los tratamientos nutricionales (figura 2). Las válvulas de riego estaban conectadas un cabezal de inyección de fertilizante automático con 3 tanques de fertilización para el control de la disolución e inyección de fertilizantes, se controló una proporción de inyección de 10 a 12 litros de fertilizante por metro cúbico de agua inyectada, garantizando inyecciones de fertilizante de más de 3 horas por fertirriego buscando que el fertilizante se distribuya de mejor forma en el perfil de suelo y no quede solo en la zona próxima a las mangueras.

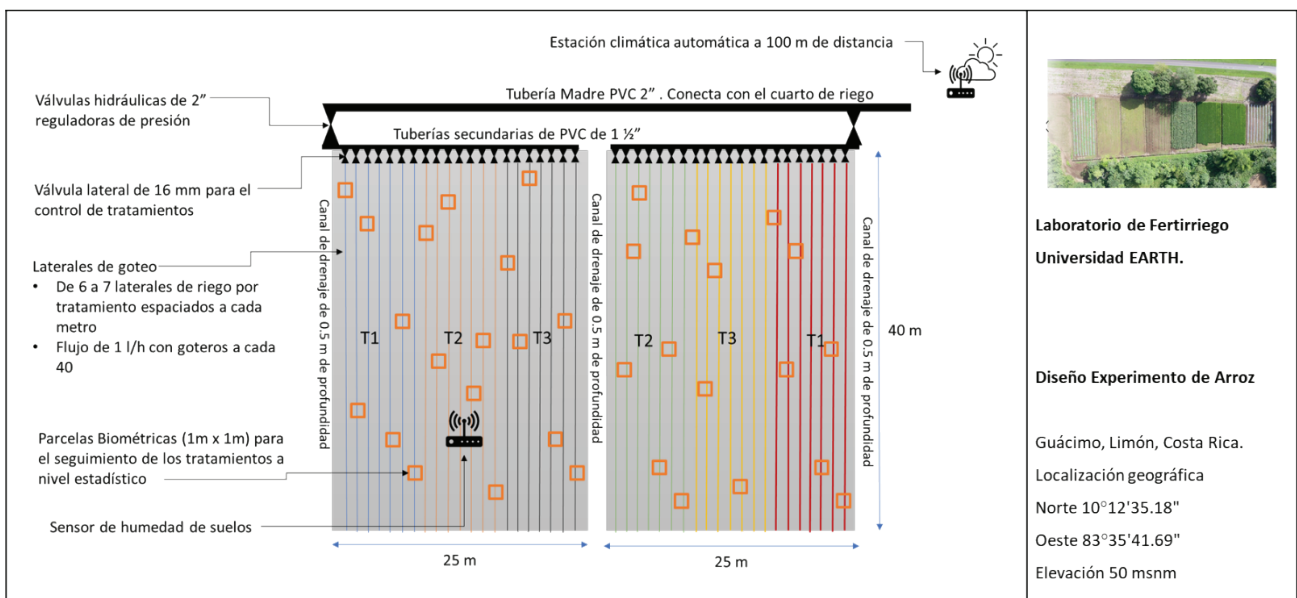


Figura 2. Detalle de distribución del área y componentes del experimento.

Cada bloque contempla un número de 6 a 8 parcelas de 1 m², distribuido de forma aleatoria a lo interno de cada uno de los bloques, estas parcelas son útiles para el seguimiento de biometrías de crecimiento y los estudios de varianza para la productividad de cada uno de los tratamientos.

Los suelos del proyecto son de origen aluvial de textura franco-arcillosa, con bajo contenido de material orgánica y de fertilidad limitada. Se levantaron muestras de suelo y fueron evaluadas en laboratorio antes de cada ciclo de producción y los resultados químicos mostraron que elementos mayores como el fósforo (2.5 cmol₍₊₎·l⁻¹) y el potasio (0.31 cmol₍₊₎·l⁻¹) su disponibilidad es baja, de igual forma suceden con elementos menores como magnesio y calcio con valores de 1.11 y 3.07 cmol₍₊₎·l⁻¹ respectivamente .

El carácter experimental del proyecto demanda presión en la cantidad y distribución de los nutrientes, el sistema de riego constaba de mangueras con emisores auto compensados de 1 l·h⁻¹, espaciados a 40 cm entre ellos aplicando el agua con una intensidad de riego de 2.5 mm·h⁻¹. La precisión del riego fue monitoreada mediante pruebas de uniformidad [12] [6], durante los inicios de ciclos de producción y el coeficiente de uniformidad (CU) y distribución (DU) fueron superiores a 95% (figura 3)

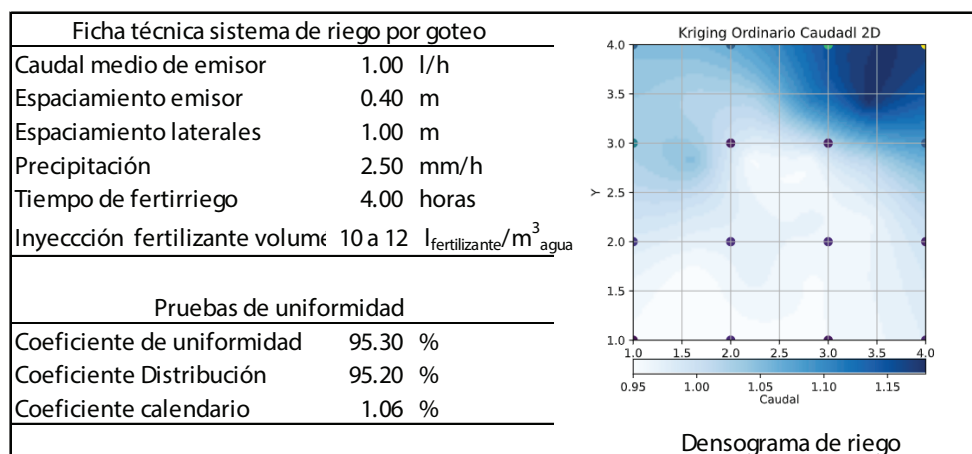


Figura 3. Desempeño del sistema de riego y su uniformidad.

Descripción de los tratamientos

Partiendo de la base de una fertilidad deficiente del suelo se procedió a establecer el plan de nutrición, además debido a la falta de información de extracción nutricional de la variedad *Conarroz3*, se revisaron diferentes fuentes bibliográficas que hablan sobre el tema de curvas de absorción [13] [14] y fertilidad del arroz [5][15], así como otras experiencias de aplicación nutricional por fertirriego [16] , [17]; de esta revisión se estableció el plan de manejo nutrición que se muestra en el cuadro 1, el *plan 100%* basado en su aporte nutricional está diseñado para una producción de 6 Ton·ha⁻¹, *los planes 75% y 130%* son tratamientos de rango, para observar la respuesta en productividad del cultivo a este rango de nutrición vía fertirriego.

Cuadro 1. Planes de fertilización para los tratamientos

Elemento	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	S
Kg·ha ⁻¹						
Plan 75 %	100	23	100	23	9	42
Plan 100 %	133	31	133	31	12	57
Plan 130 %	174	40	174	40	16	75

Los experimentos fueron conducidos en dos ventanas de producción, la primera con siembra el 15 de mayo y cosecha 23 de setiembre 2020, mientras tanto el segundo ciclo con siembra el 15 de diciembre y cosecha el 27 de abril del año 2021.

Los tratamientos de los diferentes planes nutricionales vía sistema de riego por goteo se muestra en cuadro 2: en el primer ciclo de producción se trabajó dos planes de fertirriego, F100 y F75 que aplica el plan de nutrición al 100% y 75% respectivamente de lo estimado, además se propuso un tratamiento testigo T100 donde la aplicación del fertilizante será de forma sólida al suelo en tres momentos de producción, de forma similar como lo aplica un productor en la zona; el segundo ciclo los tratamientos de fertirriego fueron el F100 y F130 (plan de nutrición al 100 y 130 % respectivamente y de forma idéntica se repitió el tratamiento del testigo, el cual nos permitirá identificar la variabilidad de la producción en respuesta de los cambios de parámetros climáticos. Siempre en los tratamientos testigo, a pesar de que no hubo fertirriego, se instala manguera de goteo para el control del agua aplicada y que todos los tratamientos reciban la misma cantidad de milímetros de agua en el ciclo, además en todos los tratamientos la fertilización de fósforo fue 100% aplicada al suelo, partiendo del principio de que la movilidad de fosforo es lenta [18]

Cuadro 2. Tratamientos nutricionales.

Ciclo	Tratamiento	Fertilización al suelo (% según el plan)	Fertirriego (% según el plan)
Primero. Siembra 15 de mayo, cosecha 23 de setiembre 2020	F100	100% P ₂ O ₅ a la siembra	100% del resto de elemento aplicado en 10 riegos fertirriegos
	F75	100% P ₂ O ₅ a la siembra	75% del resto de elemento aplicado en 10 riegos fertirriegos
	T100	100% P ₂ O ₅ a la siembra El resto de elemento distribuidos a los 25, 45, 60 días	
Segundo. Siembra 15 de diciembre, cosecha 27 de abril 2021	F100	100% P ₂ O ₅ a la siembra	100% del resto de elemento aplicado en 8 riegos fertirriegos
	F130	100% P ₂ O ₅ a la siembra	130% del resto de elemento aplicado en 8 riegos fertirriegos
	T100	100% P ₂ O ₅ a la siembra El resto de elemento distribuidos a los 25, 45, 60 días	

Control del clima y riego

El experimento por estar a campo abierto y correrse en dos momentos temporales diferentes, hizo necesario un monitoreo preciso de las variables climáticas, se colectaron datos en una estación meteorológica marca Davis modelo Vantage Pro 2; el resumen de las principales variables atmosféricas durante el experimento se muestran en el cuadro 3, se observa un marcado descenso en la radiación para el segundo ciclo, producto a días más cortos, además de un descenso de las temperaturas producidas por el aumento de los vientos alisios del primer semestre del año, el resultado de esta variación resulto un descenso del evapotranspiración lo que indica que la demanda hídrica se reduce [19]. Los datos climáticos fueron de utilidad para comparar los resultados entre ciclos y así observar el potencial productivo de la variedad en los diferentes rangos climáticos que caracterizan la región caribe.

Cuadro 3. Datos climáticos durante el ensayo.

Parámetro		unidad	Primer ciclo May-Set	Segundo ciclo Dic-Abr	Δ entre el primero y segundo ciclo
Temperatura	media	°C	25.82	24.72	-4%
	máximo	°C	20.06	17.61	-12%
	mínimo	°C	33.65	33.11	-2%
Radiación	media diario	W·m ⁻²	386.56	326.64	-16%
	acumulada	W·m ⁻²	50.566	43.684	-14%
Evapotranspiración potencial (Penman Monteith)	media diaria	mm·día ⁻¹	3.50	2.62	-25%
	máximo	mm·día ⁻¹	5.52	4.49	-18%
	mínimo	mm·día ⁻¹	1.05	0.70	-33%
	acumulada	mm	458.5	351.08	-23%

Durante el experimento el campo siempre mantuvo condiciones de humedad favorable, todos los tratamientos, inclusive los testigo tuvieron mangueras de goteo, para garantizar la humedad uniforme entre los tratamientos, durante los ciclos de producción se realizaron riegos y fertirriegos que son resumidos en el figura 4 (a) y (b), en ambas gráficas la curva de acumulación de agua en el experimento, que suma el acumulado de los riegos más la suma acumulada de las precipitaciones efectivas, siempre estuvo por encima de la curva de la evapotranspiración acumulada garantizando que el área estuvo por encima del requerimiento.

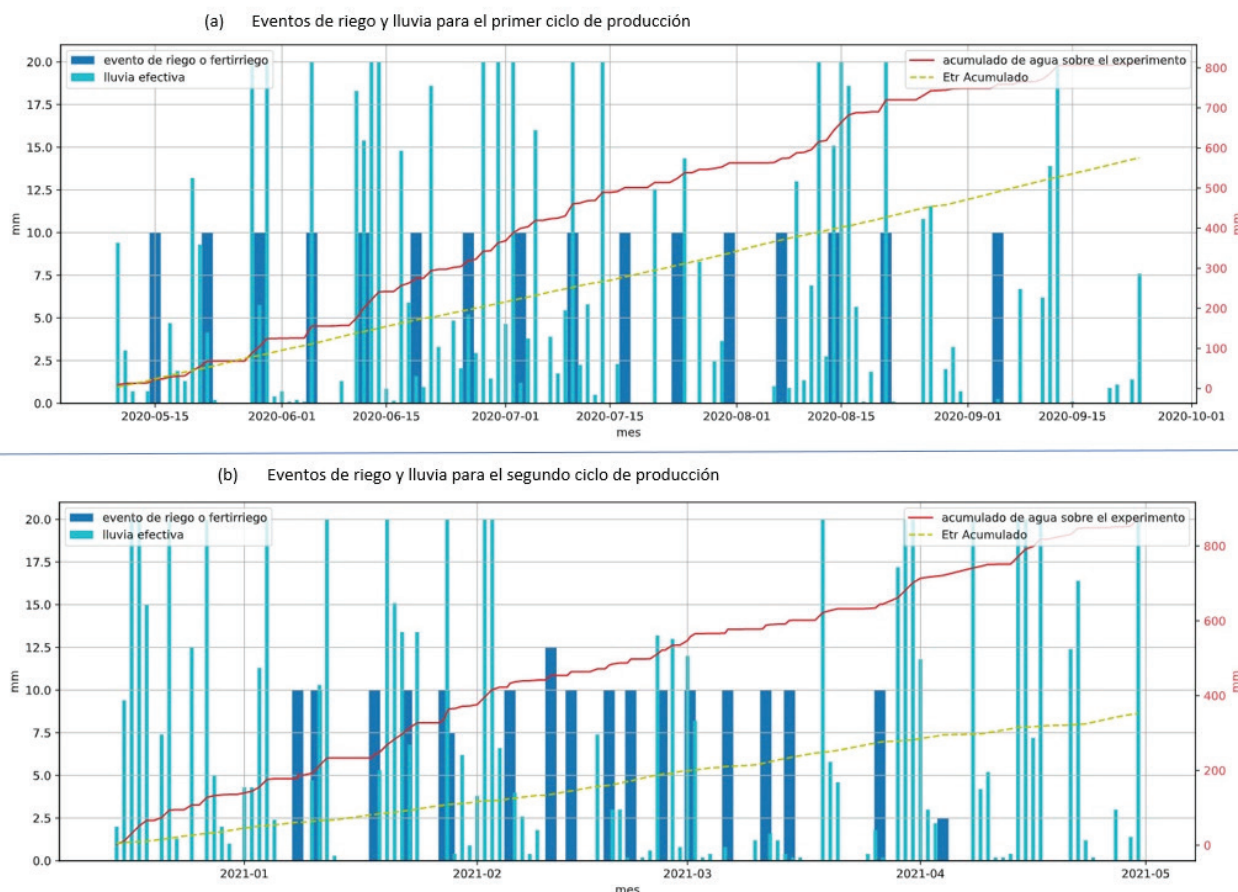


Figura 4. relaciones hidrológicas durante los experimentos.

Resultados

Los rendimientos productivos de los tratamientos, en términos de peso de gramo por unidad de área, expusieron diferencias significativas, el cuadro 4 muestra que tanto en primer como segundo ciclo de producción los resultados productivos fueron de forma lineal a la nutrición, los tratamientos F100 y F130 basados en una nutrición completa al 100 y 130 % del requerimiento reflejaron mejores resultados que F75 el cual solo recibió el 75% de la nutrición; de forma similar podemos analizar el comportamiento de los tratamientos F100 en ambos ciclos de producción versus los testigos T100, obtienen mejores resultados productivos por su manejo vía fertirrigación. Otros datos de la cosecha, mostrados en el cuadro 4, como la cantidad de panículas por grano, peso de los 1000 granos y peso de raíces no mostraron diferencias en sus resultados, pero los mismo son valiosos para el análisis comparativo del experimento.

Cuadro 4. Resultados de la cosecha de por tratamiento.

Ciclo de producción	Tratamiento	Peso de granos en campo		Cantidad de granos por panícula		peso de 1000 granos		Peso raíces	
		g·m ⁻²		und		g		g	
May. 2020 a Set. 2020	F100	652.14 ± 33.03	A	209.28 ± 20.85	A	20.83 ± 0.91	A	10.56 ± 0.93	A
	F75	507.38 ± 32.38	B	148.48 ± 17.24	B	21.35 ± 0.68	A	10.57 ± 0.99	A
	T100	582.67 ± 30.45	A-B	139.80 ± 2.44	B	22.62 ± 0.53	A	12.44 ± 0.83	A
	p-value	0.012		0.0186		ns		ns	
Dic. 2020 a Abr. 2021	F130	646.50 ± 14.75	a	122.75 ± 16.32	a	22.13 ± 0.31	a	11.42 ± 0.33	a
	F100	612.25 ± 32.67	a	110.88 ± 7.15	a	23.13 ± 0.61	a	15.75 ± 0.77	b
	T100	508.00 ± 21.57	b	104.38 ± 9.85	a	22.63 ± 0.46	a	14.73 ± 1.14	b
	p-value	0.016		ns		ns		0.0051	

Nota: Todos los datos presentados son la media de mediciones ± el error estándar. En las columnas valores con letras similares son estadísticamente iguales, según prueba varianza por el método de Tukey ($p \leq 0.05$). Los análisis de varianza fueron corridos de forma independientes según el ciclo de producción, por eso los resultados del primer ciclo se identifica con letras mayúsculas y los resultados del segundo ciclo se identifican con letras minúsculas.

Los tratamientos que fueron replicados en el primer y segundo ciclo de producción T100 y F100, mostraron mejores resultados de productividad en el primer ciclo de producción (cuadro 4), lo cual es algo esperado por el mayor nivel de radiación y temperatura (cuadro 3) favoreciendo el crecimiento del arroz, afirmando la idea que la producción del cultivo se debe expresar en un rango, que como se observa puede ser de un 6 a 12% de variación entre temporadas.

En el cuadro 5 los tratamientos T100 y F100 que fueron idénticos nutricional entre sí, se muestran la relación de productividad de granos por de unidad de agua que fue requerida y precipitada en el experimento, este ratio nos permite a partir de las experiencias de dos ciclos de producción, con regímenes de riegos, precipitaciones y evapotranspiración diferente (figura 4) analizar la cantidad de agua consumida y de esta forma compararlo con otras experiencias. La cantidad precipitada en los ensayos fue similar entre los ciclos, por lo tanto la relación de productividad en unidades de $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ (agua aplicada) dan mejores relaciones hídricas en el primer ciclo de producción (mayo a setiembre), resultado de una rendimiento mayor de

campo durante esta ventana de crecimiento y optimizando el milímetro de agua aplicado, debe recordarse que el experimento se desarrolló bajo condiciones tropicales con un aporte hídrico que superó el requerimiento (figura 4). Además, el segundo ratio en unidades de $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}_{(\text{Etr})}$, el cual considera lo que realmente la plantación requirió como evapotranspiración real, en este segundo caso los ratios o índice de productividad por unidad volumétrica de agua requerida da más favorable en para la segunda ventana de producción (diciembre a abril) producto a un menor valor de evapotranspiración, haciendo esta ventana más resiliente a stress hídrico.

Cuadro 5. Relación producción versus agua precipitada en el experimento en el experimentos.

Ciclo de producción	Trat.	Peso de granos en campo	Total de agua aplicado*	ETR acumulada	Ratio (Kg de arroz producido por unidad de agua)	
		gr/m^2	mm^*	mm	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}_{(\text{agua aplicada})}$	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}_{(\text{Etr})}$
May. 2020 a Set. 2020	F100	652.14	802	580	8.2	11.1
	T100	582.67			7.3	10.0
Dic. 2020 a Abr. 2021	F100	612.25	849	380	7.2	16.1
	T100	508.00			0.6	13.4

*Es la suma del riego más la precipitación

Discusión

Los resultados encontrados en términos de productividad muestran rendimientos que van desde los $5.5 \text{ Ton}\cdot\text{ha}^{-1}$ en los tratamientos testigo, hasta valores cercanos a los $6.5 \text{ Ton}\cdot\text{ha}^{-1}$ para los tratamiento T100 y T130 en los cuales nutrientes aplicados vía fertirriego lograron levantar la productividad hasta en 15%, la aplicación controlada de nutrientes en el suelo permitió una mejor absorción [7][20], reduciendo las pérdidas nutricionales producto a la escorrentía, percolación y volatilización [21] [22]. En la cosecha de los tratamientos se observó un comportamiento directamente proporcional a la productividad en función de la cantidad de nutrientes invertidos, tal como lo citan experiencias similares de manejo del fertirriego en arroz en India ([23] [11], en China [16] e Italia ([24]. Hay que destacar que los tratamientos nutricionales fueron hechos en niveles, el experimento demuestra una mayor eficacia del goteo, pero no concluye con su dosis nutricional donde es recomendado trabajar curvas de absorción para la variedad en específico.

El peso de los mil granos presentado en la cuadro 4, a pesar de que no hubo diferencias significativas fueron resultados similares a los encontrados en otras investigaciones donde ni el riego ni la nutrición infieren de una forma directa en el peso del grano, pero si de la cantidad de granos por panícula que se pueden presentar [23]. Estos son datos que caracterizan la variedad y permiten introducir algunos otros parámetros agroindustriales [25]

[26] [7] entre otros autores citan que el peso y crecimiento de las raíces puede usarse como un buen indicador de la nutrición de los cultivos, en el caso de nuestros experimentos cuadro 4 muestran para el primer ciclo de producción un comportamiento predecible donde F100 da el volumen de raíces mayores sin que sus diferencias sean significativas, en el segundo ciclo de producción el resultado es contrario a lo esperado, pero podría deberse a variables específicas de las áreas muestrales.

Los indicadores sobre la cantidad de agua aplicada en el experimento cuadro 5, muestran que se logró producir de 8 a 6 kg de arroz por milímetro de agua aplicado en una hectárea, el resultado es consistente con las experiencias en China donde se reportan de 7 a 6 kg·m⁻¹·mm⁻¹ (agua aplicada) [16], también en India los experimentos [23] reportan indicadores similares, otros investigaciones en riego por goteo y arroz demuestran rendimientos muy eficaces, alcance rendimiento de arroz de 8.9 kg·m⁻¹·mm⁻¹ (agua aplicada) comparado con 2.5 kg·m⁻¹·mm⁻¹ (agua aplicada) en condiciones de riego por inundación [27]. Finalmente, esta eficacia de agua también tiene un impacto en la reducción de la huella de carbono de la producción del arroz, en este trabajo no se aborda este tema, pero las experiencias de [28] y [29] indica que sistemas de riego por goteo en arroz pueden alcanzar una reducción de hasta el 50% en las emisiones de dióxido de carbono equivalente.

Conclusiones

Se observo que los tratamientos nutricionales vía fertirriego en los cuales las dosis eran iguales al testigo de aplicación granular al suelo, los resultados de productividad fueron significativamente diferentes, demostrando una mayor eficacia en la absorción de los nutrientes en el suelos cuando se aplica el fertilizante de forma fraccionada vía fertirriego, la temporada de producción de mayo a setiembre obtuvo mejores resultados de productividad, gracias a una mayor incidencia en la radiación, pero sin importar la época del año se observó una mejor respuesta de producción en el cultivo en los tratamientos de fertirriego.

En las dosis con mayor nutrición vía fertirriego no se obtuvo diferencias significativas con respecto a la dosis 100% según recomendación a una curva de absorción, validando que es la dosis al 100% cubre los requerimientos nutricionales para la variedad en estudio.

Por la importancia en los resultados se recomienda continuar la investigación en miras de afinar los paquetes nutricionales además de replicar el ensayo en otras condicionales agroecológicas que permitan identificar espacios donde la introducción de la tecnología sea de un mayor impacto también por el riego.

Agradecimiento

Los autores agradecen de forma especial a Shewarega Kibru y David Guzman de la promoción 2020 y a Alex Mejia y Francisco Moteroso de la promoción 2021 de la Universidad EARTH por ser actores claves en el diseño y ejecución de los experimentos de campo. Al Ing. Oswaldo Ledezma de la Corporación Arrocería Nacional por su apoyo técnico a lo largo del proyecto y al Ing. Adrian Vargas Obando por su asesoría en el manejo de la automatización y monitoreo de los tratamientos durante el experimento.

Referencias

- [1] P. A. Seck, A. Diagne, S. Mohanty, and M. C. S. Wopereis, "Crops that feed the world 7: Rice," *Food Security*, vol. 4, no. 1, Mar. 2012, doi: 10.1007/s12571-012-0168-1.
- [2] FAO, "El Arroz y la Nutrición Humana," in *FAO Rice Conference*, 2004, no. Cuadro 1.
- [3] CONARROZ, "Informe Anual Estadístico 2019-2020," San José, 2020.
- [4] A. Fukushima, I. Perera, K. Hosoya, T. Akabane, and N. Hirotsu, "Genotypic differences in the effect of p fertilization on phytic acid content in rice grain," *Plants*, vol. 9, no. 2, 2020, doi: 10.3390/plants9020146.
- [5] T. Ye *et al.*, "Nitrogen, phosphorus, and potassium fertilization affects the flowering time of rice (*Oryza sativa* L.)," *Global Ecology and Conservation*, vol. 20, 2019, doi: 10.1016/j.gecco. 2019.e00753.
- [6] P. Waller and M. Yitayew, *Irrigation and Drainage Engineering*. Cham: Springer International Publishing, 2016. doi: 10.1007/978-3-319-05699-9.

- [7] M. M. Keerthi, R. Babu, N. S. Venkataraman, and P. P. Mahendran, "Influence of Irrigation Scheduling with Levels and Times of Nitrogen Application on Root Growth of Aerobic Rice," *American Journal of Plant Sciences*, vol. 09, no. 11, 2018, doi: 10.4236/ajps.2018.911166.
- [8] J. Solano and R. Villalobos, "Regiones y subregiones climáticas de Costa Rica," San José , 2000.
- [9] A. González Huerta, D. D. J. Pérez López, M. Rubí Arriaga, F. Gutiérrez Rodríguez, J. R. P. Franco Martínez, and A. Padilla Lara, "InfoStat, InfoGen y SAS para contrastes mutuamente ortogonales en experimentos en bloques completos al azar en parcelas subdivididas," *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, vol. 10, no. 6, Sep. 2019, doi: 10.29312/remexca.v10i6.1767.
- [10] F. Soto-Bravo and M. I. González-Lutz, "Análisis de métodos estadísticos para evaluar el desempeño de modelos de simulación en cultivos hortícolas," *Agronomía Mesoamericana*, May 2019, doi: 10.15517/am.v30i2.33839.
- [11] V. Ramulu, V. P. Rao, M. U. Devi, K. A. Kumar, and K. Radhika, "Evaluation of drip irrigation and fertigation levels in aerobic rice for higher water productivity," *2nd World Irrigation Forum, November 6-8, 2016, Chiang Mai, Thailand*, no. November 6-8, 2016, Chiang Mai, Thailand W.3.1.02, 2016.
- [12] L. Juana, L. Rodríguez-Sinobas, R. Sánchez, and A. Losada, "Evaluation of drip irrigation: Selection of emitters and hydraulic characterization of trapezoidal units," *Agricultural Water Management*, vol. 90, no. 1–2, May 2007, doi: 10.1016/j.agwat.2007.01.007.
- [13] L. A. Barahona-Amores, J. E. Villarreal-Núñez, W. González-Carrasco, and E. I. Quiro-McIntire, "Absorption of nutrients in rice in an inceptisol soil under irrigation in Coclé, Panamá," *Agronomy Mesoamerican*, vol. 30, no. 2, pp. 407–424, 2019, doi: 10.15517/am.v30i2.33997.
- [14] E. Molina and J. Hernán Rodríguez, "FERTILIZACIÓN CON N, P, K y S, y CURVAS DE ABSORCIÓN DE NUTRIMENTOS EN ARROZ VAR. CFX 18 EN GUANACASTE," 2012. [Online]. Available: www.mag.go.cr/revagr/index.htmlwww.cia.ucr.ac.cr
- [15] H. S. Sidhu *et al.*, "Sub-surface drip fertigation with conservation agriculture in a rice-wheat system: A breakthrough for addressing water and nitrogen use efficiency," *Agricultural Water Management*, vol. 216, 2019, doi: 10.1016/j.agwat.2019.02.019.
- [16] M. A. Adekoya *et al.*, "Agronomic and Ecological Evaluation on Growing Water-Saving and Drought-Resistant Rice (*Oryza sativa* L.) Through Drip Irrigation," *Journal of Agricultural Science*, vol. 6, no. 5, 2014, doi: 10.5539/jas.v6n5p110.
- [17] T. Parthasarathi, K. Vanitha, S. Mohandass, and E. Vered, "Evaluation of drip irrigation system for water productivity and yield of rice," *Agronomy Journal*, vol. 110, no. 6, 2018, doi: 10.2134/agronj2018.01.0002.
- [18] Y. Tapia-Torres and F. García-Oliva, "Phosphorus Availability is a Product of Soil Bacterial Activity in Oligotrophic Ecosystems: a Critical Review," *Terra Latinoamericana*, vol. 31, no. 3, pp. 231–242, 2013.
- [19] R. Villalobos and N. Rojas, "Descripción del clima del cantón de Limón ," San José , 2016.
- [20] T. Talaviya, D. Shah, N. Patel, H. Yagnik, and M. Shah, "Implementation of artificial intelligence in agriculture for optimisation of irrigation and application of pesticides and herbicides," *Artificial Intelligence in Agriculture*, vol. 4, 2020, doi: 10.1016/j.aiia.2020.04.002.
- [21] P. K. Singh, P. C. Srivastava, R. Sangavi, P. Gunjan, and V. Sharma, "Rice water management under drip irrigation: an effective option for high water productivity and efficient zinc applicability," 2019. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/336032215>
- [22] T. F. Han *et al.*, "Variation in rice yield response to fertilization in China: Meta-analysis," *Scientia Agricultura Sinica*, vol. 52, no. 11, 2019, doi: 10.3864/j.issn.0578-1752.2019.11.007.
- [23] S. K. Natarajan, V. K. Duraisamy, G. Thiyagarajan, and M. Manikandan, "Evaluation of Drip Fertigation System for Aerobic Rice in Western Zone of Tamil Nadu," *International Journal of Plant & Soil Science*, 2020, doi: 10.9734/ijpss/2020/v32i730303.
- [24] S. Monaco, P. Bottazzi, and F. Altobelli, "Performance of different rice varieties under drip irrigation," 2020. doi: 10.1109/MetroAgriFor50201.2020.9277628.
- [25] P. Cordero Flores and F. Manzaneda Delgado, "Evaluación agronómica de seis variedades de arroz (*Oryza sativa* L.) sembradas en dos épocas bajo riego, en el municipio de San Buenaventura, Bolivia," *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, vol. 8, no. 1, Apr. 2021, doi: 10.53287/xivu8492oe20n.
- [26] T. Parthasarathi, K. Vanitha, S. Mohandass, E. Vered, and V. Meenakshi, "Variation in rice root traits assessed by phenotyping under drip irrigation," *F1000Res*, vol. 6, 2017, doi: 10.12688/f1000research.9938.1.

- [27] N. Beser, H. Surek, S. Sahin, R. Kaya, B. Tuna, and R. Cakir, "An investigation of various drip irrigation treatments in rice (*Oryza sativa* L.)," *Fresenius Environmental Bulletin*, vol. 25, no. 9, 2016.
- [28] T. Parthasarathi, K. Vanitha, S. Mohandass, and E. Vered, "Mitigation of methane gas emission in rice by drip irrigation," *F1000Res*, vol. 8, 2019, doi: 10.12688/f1000research.20945.1.
- [29] R. Joshi, "Aerobic rice: Water use sustainability," *Oryza Vol. 46. No.1, 2009* , vol. 46, no. 1, 2009, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/215894471>