

**Evaluación económica y productiva del arroz
(*Oryza sativa*) bajo diferentes distancias y
densidades de siembra**

Adriana María Dimas Rodríguez

**Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Honduras**

Noviembre, 2019

ZAMORANO
CARRERA DE ADMINISTRACIÓN DE AGRONEGOCIOS

Evaluación económica y productiva del arroz (*Oryza sativa*) bajo diferentes distancias y densidades de siembra

Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial para optar
al título de Ingeniera en Administración de Agronegocios en el
Grado Académico de Licenciatura

Presentado por

Adriana Maria Dimas Rodriguez

Zamorano, Honduras

Noviembre, 2019

Evaluación económica y productiva del arroz (*Oryza sativa*) bajo diferentes distancias y densidades de siembra

Adriana Maria Dimas Rodriguez

Resumen. El distanciamiento entre hileras y la cantidad de semilla por hectárea son factores importantes para la producción de arroz. La necesidad de tener información actualizada y adaptada a la zona para optimizar la producción es de suma importancia. El objetivo del estudio fue evaluar los rendimientos en cada combinación de distanciamiento entre hileras y cantidad de semillas por hectárea. El estudio determinó la combinación económicamente óptima de distanciamiento y cantidad de semilla. En el presente estudio contó con dos experimentos de campo en donde se evaluaron cuatro niveles de distanciamientos entre hileras y cuatro niveles de cantidades de semilla con la variedad DICTA Comayagua FL4-20. Para ambos experimentos se utilizó un diseño de bloques completamente al azar con cuatro repeticiones. La superficie de respuesta obtiene un mayor rendimiento con el distanciamiento de 20 centímetros entre hileras, y 144 kilogramos de semilla por hectárea, resultando en la máxima producción de 4,130 kilogramos por hectárea. La combinación óptima se obtiene con 21 centímetros de distanciamiento entre hileras y 137 kilogramos de semilla por hectárea con una rentabilidad de 25%.

Palabras clave: Función de producción, línea de pseudoescala, optimización, senda de expansión, superficie de respuesta.

Abstract. Row spacing and the amount of seed per hectare are important factors for rice production. The need to have updated and adapted information to the area to optimize rice production is of the utmost importance. The objective of the study was to evaluate the yields in each combination of spacing between rows and quantity of seed. The study determined the combination of spacing and quantity of seed that is economically optimal. The present study had two field experiments where four levels of spacing between rows and four levels of seed quantities with the DICTA Comayagua FL4-20 variety were evaluated. For both experiments, a completely randomized block design with four repetitions was used. The response surface obtained a maximum yield with the distance of 20 centimeters between rows, and 144 kilograms of seed per hectare, resulting in the maximum production of 4,130 kilograms per hectare. The optimal combination is obtained with 21 centimeters between rows and 137 kilograms of seed per hectare with a profitability of 25%.

Keywords: Expansion path, optimization, production function, pseudo-scale line, response surface.

CONTENIDO

Portadilla	i
Página de firmas.....	ii
Resumen	iii
Contenido.....	iv
Índice de Cuadros, Figuras y Anexos	v
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	3
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	10
4. CONCLUSIONES	24
5. RECOMENDACIONES.....	25
6. LITERATURA CITADA	26
7. ANEXOS	29

ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadros	Página
1. Descripción de tratamientos de combinaciones de distanciamiento de siembra (cm) y cantidad de semilla (kg/ha) en Zamorano, Honduras, 2018.....	7
2. Valor P consignado del efecto de los factores en las variables de número de macollas por planta, altura de planta, rendimiento y tamaño de panícula bajo riego por goteo en Zona II, Zamorano, Honduras, 2018.	10
3. Tamaño de panícula en efecto principal de cantidad de semilla en establecimiento de cultivo de arroz bajo riego por goteo en Zona II, Zamorano, Honduras, 2018.	11
4. Numero de macollas para la interacción entre los factores de cantidad de semilla y distanciamiento en establecimiento de cultivo de arroz bajo riego por goteo en Zona II, Zamorano, Honduras, 2018.	12
5. Valor P consignado del efecto de los factores en las variables de número de macollas por planta, altura de planta, rendimiento y área de panícula bajo riego por inundación en Zona II, Zamorano, Honduras, 2018.	13
6. Rendimiento por cada nivel de factor distanciamiento en establecimiento de cultivo de arroz bajo riego por inundación en Zona II, Zamorano, Honduras, 2018.	13
7. Atura de planta por nivel de factor de cantidad de semilla en establecimiento de cultivo de arroz bajo riego por inundación en Zona II, Zamorano, Honduras, 2018.	14
8. Efectos simples de la interacción de los factores de cantidad de semilla y distanciamiento en variable número de macollas en establecimiento de cultivo de arroz bajo riego por inundación en Zona II, Zamorano, Honduras, 2018.	15
9. Análisis de varianza de la regresión de rendimiento sobre las combinaciones de cantidad de semilla, distanciamiento y riego por hectárea del experimento de campo en Zamorano, Honduras, 2018.	16
10. Estadísticas de la regresión de la función de producción de arroz sobre sobre las combinaciones de cantidad de semilla y distanciamiento bajo riego por goteo en Zamorano, Honduras, 2018.	17
11. Coeficientes de la regresión para la estimación de la función de producción de arroz sobre las combinaciones de cantidad de semilla, distanciamiento bajo riego por goteo en Zamorano, Honduras, 2018.	17
12. Presupuesto completo para un ciclo de producción de arroz para una hectárea sembrada en Zamorano, Honduras, 2018.	23

Figuras	Página
1. Establecimiento de experimento de campo en Zona II de Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras, 2018.....	5
2. Superficie de respuesta de rendimientos según la función de producción obtenida con la regresión de distanciamiento, cantidad de semilla bajo riego por goteo graficada mediante Excel, Honduras, 2019.....	19
3. Senda de expansión, líneas de risco, líneas de pseudoescala, isocuantas y óptimo económico para la producción de arroz variedad Dicta Comayagua FL-20 en Zamorano, Honduras 2019.....	21

Anexos	Página
1. Análisis de suelo del lote del experimento en Zona II realizado en la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano.....	29
2. Mapa de siembra de experimento en Zona II de Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras 2018.....	30

1. INTRODUCCIÓN

El cultivo de arroz en Honduras ocupa el tercer lugar después de los cultivos del maíz y el frijol en cuanto al consumo. La población hondureña consume casi a diario este cereal tan versátil en la preparación de comidas lo que alcanza un consumo por persona de 25-30 libras anuales de arroz oro. Más de seis millones de habitantes consumen un estimado nacional de más de 1.8 millones de quintales de arroz oro.

Un factor que limita la producción arrocera en Honduras es la dependencia del agua lluvia en la mayoría de la producción. Esto resulta en una producción estacional, con siembras en los meses de mayo-julio y cosechas en los meses de octubre-diciembre. Según el Manual Técnico para el Cultivo de Arroz publicado por la SAG (Secretaría de Agricultura y Ganadería) y la DICTA (Dirección de Ciencia y Tecnología Agropecuaria), en términos generales, los países de Centro América son deficitarios en la producción de arroz.

El arroz es el segundo cereal más producido en el mundo, tras el maíz. Es considerado un alimento básico para más de la mitad de la población mundial. Esto lo posiciona como uno de los cultivos más importantes, si se toma en cuenta la extensión que utiliza el cultivo y la proporción en el consumo humano. Cerca del 40% de la población mundial depende del arroz y es una gran parte de la porción calórica en la dieta humana. Varios países lo consideran el cultivo más importante si se toma en cuenta la extensión cultivada y la cantidad de gente que depende de este cultivo (Echeverría, 2015).

El arroz tiene una base productiva dependiente de trabajo, tierra y agua. Se estima que el 90% del arroz cosechado en el mundo, se produce en las zonas templadas y el 10 % restante se produce en las zonas tropicales. Con nuevas variedades y la utilización de prácticas mejoradas, se ha demostrado que en las zonas tropicales que cuentan con disponibilidad de agua, es posible obtener elevados rendimientos. En estas áreas se puede ser competitivos, eficientes y manejar una agricultura rentable y sostenible con dicho cultivo (Echeverría, 2015).

La producción promedio en Honduras es de 4500 kg/ha. Para obtener un mayor rendimiento se requiere de temperaturas relativamente altas y suficiente radiación solar, así como suficiente agua, en la temporada de desarrollo del cultivo. La temperatura, la radiación solar y la lluvia afectan directamente los procesos fisiológicos de la planta, que de una u otra manera inciden en el rendimiento. Una de las mayores desventajas es que la cantidad de agua que se usa para mantener el requerimiento de agua del cultivo no solo presenta un problema ambiental, sino que también es un problema económico. Es importante aumentar los rendimientos por medio de modalidades adecuadas de cantidad de semilla, distanciamiento y el uso de riego por goteo.

Se ha demostrado que el cultivo de arroz bajo riego por inundación contribuye entre 10 y 25% de las emisiones globales de metano. Otro de los gases importantes que emite el cultivo de arroz es el óxido nitroso a partir de las fertilizaciones nitrogenadas (Echeverría 2015).

La inundación es el método más común para el riego del arroz debido a que bajo este sistema se han obtenido altos rendimientos. Este se mantiene inundado un promedio de 90 días durante su ciclo de producción. Con estos sistemas se pueden alcanzar rendimientos de 10 ton/ha. Para poder mantener la lámina de agua visible de una pulgada de inundación se necesitan al menos 500 l por cada 8 metros cuadrados (Benavides y Jara, 2014). El arroz puede mantenerse inundado con una lámina de agua de cuatro pulgadas sin presentar ningún daño gracias a su habilidad de transportar el oxígeno desde las hojas hasta las raíces (Kraemer *et al.* 2013).

Este estudio se puede extrapolar a productores de arroz que siembren en lugares con una precipitación promedio de 1,200 mm anuales, una evapotranspiración de 1,400 mm anual con una temperatura promedio de 26°C. Mediante este estudio se espera obtener mejores rendimientos y un beneficio económico utilizando el distanciamiento de siembra, la densidad y el riego que más convenga.

La Secretaría de Agricultura y Ganadería (SAG), en Honduras liberó el año 2010 la variedad de arroz llamada Dicta Comayagua FL4-20. La variedad Dicta Comayagua tiene un rendimiento promedio de 8,500 kg/ha.

Este estudio tiene como objetivos:

- Evaluar las combinaciones de distanciamiento de siembra (cm) y cantidad de semilla (kg/ha) en arroz para identificar la combinación óptima.
- Evaluar el efecto de distanciamiento entre hileras (cm) y cantidad de semilla (kg/ha) en las variables: rendimiento, altura de planta, tamaño de panícula y macollamiento.
- Evaluar la superficie de respuesta de rendimiento a diferentes niveles de distanciamiento entre hileras (cm) y cantidad de semilla (kg/ha).
- Evaluar las combinaciones de distanciamiento entre hileras (cm) y cantidad de semilla (kg/ha) en arroz para identificar la combinación óptima con limitante presupuestaria y sin limitante presupuestaria.
- Evaluar la rentabilidad del establecimiento del cultivo de arroz con la combinación óptima.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La evaluación de las combinaciones de cantidad de semilla y distanciamiento de siembra bajo riego por goteo en el cultivo de arroz consistió de dos partes, un análisis productivo y uno económico. El análisis que se utilizó para la evaluación productiva fue la de la superficie de respuesta, para la cual se estimó una función de producción. La evaluación económica se realizó a través de un análisis marginal para encontrar la combinación que maximiza el retorno a los demás costos. Las ganancias fueron evaluadas mediante la variable de margen bruto.

Metodología de superficie de respuesta (MSR).

La superficie de respuesta estimada para identificar la combinación óptima productiva requirió de dos experimentos de campo. Los rendimientos obtenidos en la cosecha fueron estandarizados a un nivel de humedad de 13% mediante método de secado y sirvieron para obtener los coeficientes de regresión. Los coeficientes de regresión se utilizaron para determinar la función de producción y así establecer la superficie de respuesta de rendimientos para evaluar productivamente las combinaciones de cantidad de semilla y distanciamiento.

La superficie de respuesta asemeja un relieve geográfico en donde el punto con mayor elevación es el punto en donde se maximiza, en este caso, el rendimiento del cultivo del arroz. Montgomery (2003), lo define como “una colección de técnicas matemáticas y estadísticas útiles en el modelado y el análisis de problemas en los que una respuesta de interés recibe la influencia de diversas variables, y lo que se busca es optimizar esa respuesta”.

La superficie de respuesta de rendimientos experimentales se determinó con una función de producción de un modelo cuadrático. Esta sección trata de encontrar la combinación que genere el valor máximo de producción de arroz posible combinando cantidad de semilla y distanciamiento bajo la modalidad de riego por goteo e inundación. Esta función de producción utiliza los coeficientes de regresión asociados al modelo cuadrático, los cuales se obtienen del rendimiento de arroz de cada combinación de cantidad de semilla, distanciamiento y riego de ambos experimentos de campo. La superficie de respuesta de rendimientos se graficó con la herramienta de Excel.

Función de producción.

La función de producción es la base para determinar la superficie de respuesta para la evaluación productiva (Ecuación 1). La variable dependiente es el rendimiento expresado en kilogramos por hectárea. Las variables independientes son cantidad de semilla y distanciamiento de siembra y tipo de riego.

$$Y = B_0 + B_1 (Dist) + B_2 (Dist)^2 + B_3 (CantSem) + B_4 (CantSem)^2 + B_5 (Riego) + B_6 (Riego)^2 + B_7 (Dist)(CantSem) + B_8 (Dist)(Riego) + B_9 (Riego)(CantSem) + B_{10}(Dist)(CantSem)(Riego) \quad [1]$$

En donde:

Y = Rendimiento

$Dist$ = Distanciamiento entre hileras

$CantSem$ = Cantidad de Semilla

$Riego$ = Tipo de riego utilizado (Goteo o Inundación)

La función de producción utilizó los coeficientes de regresión que fueron estimados con los rendimientos obtenidos de la cosecha de cada unidad correspondiente a una combinación de los factores de distanciamiento y cantidad de semilla en el experimento de campo.

La herramienta de Regresión de Análisis de Datos de Excel fue utilizada para analizar los rendimientos obtenidos de las combinaciones de los distintos niveles de cada factor. Esta herramienta determinó los coeficientes de regresión, el poder predictivo del modelo utilizado a través del coeficiente de determinación, y la significancia de cada variable mediante la prueba de valor P consignado.

La función de producción fue evaluada para comprobar que sea una función que maximiza producción. Para esto, se determinó la concavidad de la función con la condición necesaria y suficiente que la segunda derivada para cantidad de semilla y distanciamiento sean negativas, y que el valor de la determinante hessiana de las segundas derivadas parciales de la función sea mayor a cero. Posteriormente a determinar la concavidad de la función, se calculó el punto máximo de producción, donde para el caso de esta investigación, cualquier otra combinación resulte en un rendimiento menor.

Establecimiento de los experimentos de campo.

El estudio consistió de dos experimentos de campo. Ambos experimentos se llevaron a cabo en Zona II de la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano ubicada en Valle del Yeguaré, departamento Francisco Morazán, a 30 km al este de Tegucigalpa, Honduras. La localidad de ambos estudios cuenta con una precipitación promedio de 1,200 mm anuales, una evapotranspiración de 1,400 mm anual y una temperatura promedio de 26 °C (Figura 1).



Figura 1. Experimento de campo en Zona II de Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras, 2018.

Los experimentos de campo se iniciaron en el mes de abril y se terminaron en el mes de agosto del año 2018, a los 120 días después de siembra cuando la planta alcanzó madurez fisiológica. La variedad seleccionada para este estudio fue DICTA Comayagua FL4-20. Durante el desarrollo de los experimentos de campo se registró la aplicación de fertilizante, riego, mano de obra utilizada y tiempo empleado para la siembra y las actividades realizadas. Los datos de mano de obra obtenidos se basaron en los tiempos de siembra y la cosecha de cada unidad experimental por separado. Ambos experimentos cuentan con un diseño de bloques completamente al azar con cuatro repeticiones. Los diferentes niveles para cada factor de cantidad de semilla y distanciamiento son los siguientes:

Niveles de cantidad de semilla:

- 91 kg/ha (2 qq/ha)
- 118 kg/ha (2.6 qq/ha)
- 150 kg/ha (3.3 qq/ha)
- 181 kg/ha (4 qq/ha)

Niveles de distanciamiento de siembra entre hileras:

- 12 cm entre hileras
- 16 cm entre hileras
- 20 cm entre hileras
- 24 cm entre hileras

VARIABLES MEDIDAS. Las variables medidas en cada una de las parcelas experimentales fueron las siguientes:

- **Macollamiento:** Se usó un cuadro de dos metros cuadrados para contar la cantidad de plantas en esa área y sus respectivas macollas por hilera para calcular un promedio por hilera del número de macollas de cada parcela experimental al día 70.
- **Altura de planta:** Se eligieron de manera aleatoria 10 plantas de cada subparcela y se midió desde la base del tallo hasta la panícula al iniciar la floración, al día 100.
- **Tamaño de panícula:** De las 10 plantas elegidas al azar, se midió la altura y ancho de cada panícula para calcular un tamaño promedio de las 10 plantas seleccionadas para cada parcela experimental.
- **Peso de cosecha:** Se recolectó todo el grano de cada parcela experimental. Debido a que hubo variación en la humedad del grano, se pesó con esta humedad, se realizó el proceso de secado a una humedad alrededor del 13%, y se estandarizó a ese porcentaje para realizar el análisis.

Para cada variable agronómica medida se realizó un análisis de varianza para comparar las medias de los rendimientos, de la altura de planta, número de macollas y tamaño de la panícula en los diferentes niveles de distanciamientos y cantidad de semilla. Para este análisis se pretende saber si las medias de las variables en cuestión son diferentes entre los niveles de ambos factores. El concepto de interacción entre factores admite varias formulaciones, todas ellas equivalentes. Desde un punto de vista no formal, se dice que existe interacción entre dos factores cuando el efecto de uno de ellos sobre la variable dependiente no es el mismo en todos los niveles del otro factor. Esto equivale a afirmar que existe interacción cuando el resultado de la combinación de dos factores difiere de la suma de los efectos principales de esos factores. La interpretación de la interacción requiere comparar diferencias (Garrido, 2008).

Frecuentemente el interés del diseño radica fundamentalmente en evaluar la contribución individual de cada nivel del factor sobre la respuesta observada. A los efectos marginales de cada factor se les denomina efectos principales. Sin embargo, cuando el efecto interacción entre ambos factores es importante, puede ser imposible examinar por separado cada uno de los efectos principales.

Combinaciones de distanciamiento y cantidad de semilla.

Las combinaciones de distanciamiento y cantidad de semilla fueron establecidas para cada unidad experimental utilizando la función ALEAT de Excel (Cuadro 1). Estas consistieron en establecer cambios sobre una base de distanciamiento entre hileras y kilogramos de semilla por hectárea. Las bases fueron la usual densidad de siembra en Honduras. Para el distanciamiento se tomó como mínimo 12 cm y máximo 24 cm para tener un rango tomando en cuenta los extremos. Así mismo, para la cantidad de semilla se utilizó como mínimo 91 kg/ha y como máximo 1818 kg/ha.

Cuadro 1. Distanciamiento de siembra (cm) y cantidad de semilla (kg/ha) para cada tratamiento de experimentos de campo de arroz en Zona II, Zamorano, Honduras, 2018.

Codificación de tratamiento	de Distanciamiento (cm)	Cantidad de semilla (kg/ha)
1 A	12	90
1 B	16	90
1 C	20	90
1 D	24	90
2 A	12	118
2 B	16	118
2 C	20	118
2 D	24	118
3 A	12	150
3 B	16	150
3 C	20	150
3 D	24	150
4 A	12	181
4 B	16	181
4 C	20	181
4 D	24	181

Cosecha y rendimientos. La cosecha se realizó a los 120 días después de la siembra. Al momento de realizar esta actividad solamente se cosecharon las dos hileras centrales de cada parcela experimental para eliminar el efecto borde en el rendimiento. Para determinar la variable rendimiento, al momento de la cosecha se contó el número de plantas cosechadas por parcela experimental.

Análisis marginal. El análisis marginal determinó la combinación que maximiza el retorno a los factores de producción a excepción de distanciamiento entre hileras y cantidad de semilla. Este análisis utilizó la superficie de respuesta de rendimientos, el precio de campo del arroz, traído a nivel de Zamorano, y el costo marginal de los factores distanciamiento y cantidad de semilla mediante una función de margen bruto. Esta función identifica la combinación que genera el mayor retorno posible a los demás costos después de siembra, riego y cosecha. El precio que se utilizó en esta evaluación fue el precio de campo que tiene el kilogramo de arroz y el costo de producción fue determinado como el Costo Marginal del Factor, es decir, el costo que tiene el utilizar un kilogramo extra de arroz o un centímetro más de distanciamiento. Adicionalmente se trabajó con restricciones de presupuesto para determinar la senda de expansión y las líneas de pseudoescala.

El análisis marginal según Krugman *et al.* (2006) implica comparar el beneficio de hacer un poco más de alguna actividad con el costo de hacer un poco más de esa actividad. En este caso, la aplicación de diferentes distanciamientos, cantidad de semilla y riego se ve relacionada directamente con un cambio en el retorno a los demás costos. El análisis marginal se basó en una función de margen bruto que incluyó la ecuación de la función de

producción determinada en la superficie de respuesta de la evaluación productiva, el precio de campo y el costo de distanciamiento y cantidad de semilla. Con esta información se utilizó la herramienta “Solver” de Excel para encontrar la combinación de cantidad de semilla y distanciamiento que sujeta a la función de margen bruto generará los mayores retornos posibles a los demás costos, independientemente que esta combinación óptima económica no se encuentre en las evaluadas en el experimento de campo.

Costo de producción. El costo de producción utilizado en este estudio fue el costo para cantidad de semilla y distanciamiento. El costo de cantidad de semilla se obtuvo calculando el costo de un kilogramo adicional. El costo de distanciamiento entre hileras fue calculando igualmente el costo de un centímetro adicional entre hileras. El costo de mano de obra se basó en el tiempo que se incurrió en cada actividad cumplida en el experimento de campo.

Función de margen bruto. La función de margen bruto busca la combinación de distanciamiento y cantidad de semilla de plantas por hectárea que maximice el retorno sin incluir los demás costos de producción. El retorno se obtuvo de una simple resta de los ingresos totales menos los costos atribuibles a cantidad de semilla y distanciamiento. El modelo de la función de margen bruto se aprecia a en la Ecuación 2:

$$MB = [P * (Y)] - [V(Dist) + W(CantSem)] \quad [2]$$

Donde:

MB: margen bruto *Y*: función de producción, indicando el rendimiento del arroz en kilogramos por hectárea.

Dist: Distanciamiento entre hileras expresado en centímetros

V: Costo marginal del factor distanciamiento entre hileras expresado en lempiras por centímetro

CantSem: Cantidad de Semilla en kilogramos por hectárea

W: Costo marginal del factor cantidad de semilla expresado en lempiras por kilogramo

Senda de expansión. La senda de expansión fue estimada para determinar las combinaciones que en la superficie de respuesta de rendimiento minimicen el costo de obtener determinado nivel de producción. Junto a la senda de expansión, se determinaron las líneas de pseudoescala. Dichas líneas son llamadas fronteras económicas de producción. Estas líneas unen la cantidad de un insumo que maximiza el retorno a los demás costos sujeto a la cantidad de otro insumo y delimitan una región factible de producción.

Un nivel de producción puede ser obtenido por diferentes combinaciones de distanciamiento y cantidad de semilla. Este conjunto de combinaciones que generan, para este caso el mismo rendimiento de arroz, son llamadas isocuantas. Las isocuantas fueron utilizadas junto con las limitantes presupuestarias para determinar la combinación que va a minimizar el costo de obtener el mismo nivel de producción. Esta combinación se determinó a través de la tasa marginal de sustitución, es decir, el cambio en recursos que mantienen un mismo nivel de producción. Cuanto debo ceder de un insumo para adquirir una unidad

adicional de otro y mantener el mismo rendimiento. El punto óptimo para cada nivel de producción será la combinación donde la pendiente de la limitante presupuestaria sea igual a la pendiente de la isocuanta. La unión de estos puntos a través de los diferentes niveles de producción resulta en una “senda de expansión” (Debertin, 2012).

La senda de expansión de la producción, es el lugar geométrico donde se combinarán los factores productivos que proporcionan distintos rendimientos de arroz, cumpliendo que todos los puntos de la senda minimizan el costo de obtener determinado nivel de producción. La senda de expansión considera el costo de los factores dados como el costo de distanciamiento y cantidad de semilla, por medio de las limitantes presupuestarias (Debertin, 2012).

Las isocuantas fueron determinadas mediante la herramienta Solver de Excel. Los puntos óptimos económicos locales para cada nivel de producción utilizan la razón de precios y la tasa marginal de sustitución. La razón de precios se determinó mediante la división del costo marginal del factor de cantidad de semilla entre el costo marginal del factor de distanciamiento. Este resultado se igualó a la tasa marginal de sustitución para encontrar la combinación que minimiza el costo en dicho nivel de producción.

Líneas de pseudoescala. Las líneas de pseudoescala delimitan el espacio geométrico donde se puede producir para generar un retorno a los demás costos de producción (Debertin, 2012). Estas líneas unen la cantidad de un insumo que maximiza el retorno a los demás costos sujeto a la cantidad de otro insumo. Estas líneas fueron determinadas a través de la herramienta Solver de Excel utilizando la condición de las líneas de pseudoescala.

Margen neto. El margen neto se obtuvo para establecer la rentabilidad. El margen neto se logró restando del beneficio bruto los costos fijos, que no varían con el nivel de producción y los costos variables como cantidad de semilla y distanciamiento, siembra, mano de obra, fertilización, aplicación de químicos y cosecha, que varían con el nivel de producción. El costo de riego se debe de incluir en el presupuesto para comparar los beneficios netos de cada tipo de riego. Sin embargo, para el riego no se realizó por unidad de milímetro adicional de agua, sino para determinar qué sistema de riego es más rentable.

Presupuesto empresarial. El presupuesto empresarial es una herramienta que se utilizó con el objetivo de evaluar la rentabilidad del establecimiento del cultivo de arroz. para un productor de arroz. En el análisis marginal se evaluó la combinación que maximiza el retorno después de sembrar y cosechar, mientras que en el presupuesto completo se incluyeron todos los costos asociados al nivel de producción.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de la investigación se dividen en dos partes: los resultados del análisis productivo y los del análisis económico. El análisis productivo se utilizó para evaluar las variables de cantidad de semilla y distanciamiento, y luego determinar la función de producción y así poder identificar las isocuantas, generando distintas combinaciones de cantidad de semilla y distanciamiento que caractericen la producción. El análisis económico se utilizó para determinar la combinación que genera el máximo retorno a los demás costos. Esta combinación se evaluó sujeta a limitantes presupuestarias.

Resultados productivos.

Variables medidas. Para las variables medidas, se tomaron todas las combinaciones de los diferentes niveles de cantidad de semilla y distanciamiento en ambos experimentos de campo, incluyendo ambos sistemas de riego: inundación y goteo. En el Cuadro 2, se muestran los resultados de los valores P consignados del efecto principal y el efecto de la interacción de los factores distanciamiento y cantidad de semilla en el sistema de riego por goteo. Para este análisis, en el caso que exista una interacción, se deben discutir los efectos simples de distanciamiento y cantidad de semilla. En el caso de no existir, se deben analizar los efectos principales.

Cuadro 2. Valor P consignado del efecto de los factores distanciamiento (Dist.) y cantidad de semilla (Cant.) en las variables de número de macollas por planta, altura de planta, rendimiento y tamaño de panícula bajo riego por goteo en Zona II, Zamorano, Honduras, 2018.

Factor	Rendimiento		Altura		Panícula		Macollas	
Bloque	0.3270	ns	0.0307	*	0.8044	ns	0.2257	ns
Dist.	0.1101	ns	0.2483	ns	0.6707	ns	<.0001	*
Cant.	0.3365	ns	0.1111	ns	0.0168	*	<.0001	*
Dist. x Cant.	0.9412	ns	0.3859	ns	0.1925	ns	0.0007	*

*: Significativo al ($P < 0.05$), ns: no significativo.

Para las variables de rendimiento y altura de planta en el sistema de riego por goteo no hay efecto de los factores de distanciamiento y cantidad de semilla.

En cuanto a la variable de tamaño de panícula no hay efecto de interacción. Sin embargo, si hay efecto principal en el factor cantidad de semilla. La separación de medias se muestra en el Cuadro 3:

Cuadro 3. Tamaño de panícula por cantidad de semilla en el cultivo de arroz bajo riego por goteo en Zona II, Zamorano, Honduras, 2018.

Cantidad de Semilla	Tamaño de Panícula (cm ²)
90 kg/ha	20 ^b
118 kg/ha	21 ^b
150 kg/ha	23 ^a
181 kg/ha	21 ^b

Medias con distinta letra en la misma columna indican diferencia significativa ($P \leq 0.05$)

El tamaño de la panícula de planta muestra que a medida se aumenta la cantidad de semilla el tamaño de panícula aumenta hasta llegar al punto de 150 kilogramos por hectárea y luego disminuye.

La panícula o panoja es la inflorescencia racimosa compuesta de racimos que van decreciendo de tamaño hacia el ápice. Como en cualquier cultivo, en el arroz se tiene como objetivo el generar determinado volumen de producción. Mediante el área de la panícula se podría definir el volumen de producción, pues a mayor área, hay mayor cantidad de semilla, lo que lleva a tener mayores rendimientos. El área de la panícula es una variable que tienen una gran influencia en el aumento del peso de los granos en la planta de arroz.

La cantidad de plantas establecidas dependerá de la técnica de siembra, profundidad de siembra, calidad y variedad de semillas. Un kilogramo por hectárea de semilla equivale a 40,000 semillas. Cuando los agricultores dirigen las semillas a sus parcelas, solo el 10-20% de las semillas sembrado se establecerá realmente. Para cumplir con el objetivo de plantación deseado en diferentes ecosistemas y localidades, cantidades de semilla varían entre 30 kilogramos y 250 kilogramos por hectárea (IRRI, 1997).

De acuerdo con el Manual de producción de arroz - Producido por el Instituto Internacional de Investigación del Arroz (IRRI) bajo *Creative Commons* (IRRI, 1997), el número de panículas producidas será el principal determinante del rendimiento del cultivo. Por lo tanto, el número de plantas establecido debe ser suficiente para producir el número deseado de macollas y panículas. Para cultivos de estación húmeda, se desean 300 a 400 panículas por metro cuadrado; en la estación seca esto aumentará a 500 a 600 panículas por metro cuadrado.

La separación de medias de la variable número de macollas de la interacción de los factores de cantidad de semilla y distanciamiento se muestra en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Numero de macollas para la interacción entre los factores de cantidad de semilla y distanciamiento en establecimiento de cultivo de arroz bajo riego por goteo en Zona II, Zamorano, Honduras, 2018.

Distanciamiento	Cantidad de Semilla	Número de Macollas
12 cm	90 kg/ha	9 ^b
12 cm	118 kg/ha	9 ^b
12 cm	150 kg/ha	11 ^a
12 cm	181 kg/ha	8 ^c
16 cm	90 kg/ha	8 ^c
16 cm	118 kg/ha	8 ^c
16 cm	150 kg/ha	12 ^a
16 cm	181 kg/ha	9 ^b
20 cm	90 kg/ha	12 ^a
20 cm	118 kg/ha	12 ^a
20 cm	150 kg/ha	11 ^a
20 cm	181 kg/ha	12 ^a
24 cm	90 kg/ha	9 ^b
24 cm	118 kg/ha	10 ^b
24 cm	150 kg/ha	9 ^b
24 cm	181 kg/ha	9 ^b

Medias con distinta letra en la misma columna indican diferencia significativa ($P \leq 0.05$)

En el Cuadro 4 se puede apreciar que al nivel de 12 centímetros de distanciamiento el número de macollas es estadísticamente igual en la cantidad de semilla hasta llegar a 150 kilogramos por hectárea y luego hay una disminución. Al nivel de 16 centímetros de distanciamiento el número de macollas aumenta hasta llegar a 150 kilogramos por hectárea y luego hay una disminución en 181 kilogramos por hectárea, pero es estadísticamente mayor al número de macollas obtenidos en los primeros dos niveles de cantidad de semilla. Para el nivel de 20 centímetros de distanciamiento es donde se obtiene el mayor número de macollas, e independientemente del nivel de cantidad de semilla, las cantidades son estadísticamente iguales. Por último, al nivel de 24 centímetros de distanciamiento, independientemente del nivel de cantidad de semillas, el número de macollas es estadísticamente igual, pero menor que el número de macollas obtenido al nivel de 20 centímetros de distanciamiento. Esto muestra un patrón general de que a medida se aumenta el distanciamiento, el número de macolla aumenta hasta llegar a los 150 kilogramos de semilla por hectárea, y luego el número de macollas disminuye en mayor cantidad en los niveles de 16 y 24 centímetros de distanciamiento.

De acuerdo con el Manual de producción de arroz - Producido por el Instituto Internacional de Investigación del Arroz (IRRI) bajo *Creative Commons* (1997), cada planta desarrollará de tres a diez macollas dependiendo del estado de los nutrientes, la variedad, el porcentaje de siembra y el distanciamiento. La cantidad de semilla utilizada para la siembra más altas normalmente dan menos macollas por planta. Los cultivos trasplantados generalmente producen más macollas que los cultivos de siembra directa, y los cultivos de la estación

seca a menudo producen más macollas que los cultivos de la estación húmeda. Para este estudio se utilizó el método de siembra directa y se realizó en la estación húmeda.

En el Cuadro 5 se muestran los resultados de los valores P consignados del efecto principal y el efecto de la interacción de los factores distanciamiento y cantidad de semilla en el sistema de riego por inundación para las variables de rendimiento, altura de planta, tamaño de panícula y número de macollas.

Cuadro 5. Valor P consignado del efecto de los factores en las variables de número de macollas por planta, altura de planta, rendimiento y área de panícula bajo riego por inundación en Zona II, Zamorano, Honduras, 2018

Factor	Rendimiento		Altura		Panícula		Macollas	
Bloque	0.0150	*	0.3551	ns	0.6976	ns	1.0000	ns
Dist.	0.0001	*	0.5249	ns	0.7027	ns	0.8419	ns
Cant.	0.7022	ns	0.0021	*	0.2109	ns	0.0300	*
Dist. x Cant.	0.2705	ns	0.6473	ns	0.3592	ns	0.0101	*

*: Significativo al ($P < 0.05$), ns: no significativo.

Con respecto al rendimiento, no hay efecto en la interacción. Sin embargo, si hay efecto principal en el factor distanciamiento. La separación de medias se muestra en el Cuadro 6:

Cuadro 6. Rendimiento por cada nivel de factor distanciamiento en establecimiento de cultivo de arroz bajo riego por inundación en Zona II, Zamorano, Honduras, 2018.

Distanciamiento (cm)	Rendimiento (kg/ha)
12 cm	3023c
16 cm	3787b
20 cm	3692b
24 cm	4623a

Medias con distinta letra en la misma columna indican diferencia significativa ($P \leq 0.05$)

En el Cuadro 6 se puede apreciar que al nivel de 24 centímetros de distanciamiento se obtiene el mayor rendimiento. Es decir, a medida aumenta el distanciamiento entre hileras, aumenta el rendimiento.

Según los métodos para la siembra de arroz en estudios realizados por el IRRI (*International Rice Research Institute*, por sus siglas en inglés), el distanciamiento óptimo depende de la variedad, la estación y fertilidad del suelo. Ningún tipo de distanciamiento es el mejor para todas las variedades. El distanciamiento de las plantas es un factor importante en el trasplante de arroz. Según estudios el distanciamiento adecuado puede aumentar el rendimiento en un veinticinco a treinta y nueve por ciento sobre el distanciamiento inadecuado. El espacio adecuado puede ahorrar costos en insumos, mano de obra, y materiales.

Para la variable de altura de planta bajo riego por inundación, hay efecto principal del factor de cantidad de semilla. La separación de medias se muestra en el Cuadro 7:

Cuadro 7. Atura de planta por nivel de factor de cantidad de semilla en establecimiento de cultivo de arroz bajo riego por inundación en Zona II, Zamorano, Honduras, 2018.

Cantidad de Semilla	Altura de Planta
90 kg/ha	85 ^a
118 kg/ha	83 ^a
150 kg/ha	78 ^b
181 kg/ha	78 ^b

Medias con distinta letra en la misma columna indican diferencia significativa ($P \leq 0.05$)

En el Cuadro 7 se muestra que, en los primeros niveles de cantidad de semilla, 90 kilogramos por hectárea y 118 kilogramos por hectárea, se obtiene la mayor altura de planta siendo estadísticamente igual. Al pasar a los siguientes niveles, 150 y 181 kilogramos de semilla por hectárea, la altura de planta disminuye. Es decir, a medida que se aumenta la cantidad de semilla, disminuye la altura de la planta. Esto coincide con el estudio realizado por Mendieta y Pazmiño (2018), quienes afirman que obtuvieron una altura de planta de 79 cm bajo la modalidad de riego por inundación.

Para el tamaño de panícula bajo el sistema de riego por inundación no hay efectos de los factores de distanciamiento y cantidad de semilla. El número de macollas bajo riego por inundación muestra efecto en la interacción de los factores cantidad de semilla y distanciamiento. La separación de medias se muestra en el Cuadro 8:

Cuadro 8. Efectos simples de la interacción de los factores de cantidad de semilla y distanciamiento en variable número de macollas en establecimiento de cultivo de arroz bajo riego por inundación en Zona II, Zamorano, Honduras, 2018.

Distanciamiento	Cantidad de Semilla	Número de Macollas
12 cm	90 kg/ha	9 ^b
12 cm	118 kg/ha	11 ^b
12 cm	150 kg/ha	11 ^b
12 cm	181 kg/ha	7 ^c
16 cm	90 kg/ha	13 ^a
16 cm	118 kg/ha	13 ^a
16 cm	150 kg/ha	12 ^a
16 cm	181 kg/ha	9 ^b
20 cm	90 kg/ha	12 ^a
20 cm	118 kg/ha	13 ^a
20 cm	150 kg/ha	13 ^a
20 cm	181 kg/ha	12 ^a
24 cm	90 kg/ha	9 ^b
24 cm	118 kg/ha	19 ^b
24 cm	150 kg/ha	9 ^b
24 cm	181 kg/ha	9 ^b

Medias con distinta letra en la misma columna indican diferencia significativa ($P \leq 0.05$)

En el Cuadro 8 se aprecia que al nivel de 12 centímetros de distanciamiento el número de macollas es estadísticamente igual en la cantidad de semilla hasta llegar a 150 kilogramos por hectárea y luego hay una disminución. Al nivel de 16 centímetros de distanciamiento el número de macollas se mantiene hasta llegar a 150 kilogramos por hectárea donde luego disminuye. Para el nivel de 20 centímetros de distanciamiento es donde se obtiene el mayor número de macollas. Al nivel de 24 centímetros de distanciamiento, independientemente del nivel de cantidad de semillas, el número de macollas es estadísticamente igual, pero menor que el número de macollas obtenido al nivel de 20 centímetros de distanciamiento. En los primeros niveles de distanciamiento, 12 y 16 centímetros respectivamente el número de macollas se mantiene hasta llegar a 150 kilogramos por hectárea y luego disminuye. Para los últimos niveles de distanciamiento, 20 y 24 centímetros respectivamente, el número de macollas se mantiene igual a medida que se aumenta la cantidad de semilla.

Las variables agronómicas medidas en este estudio son todas determinantes del rendimiento. El estudio realizado por Caicedo (2008), asegura que en la medida que se incrementa la cantidad de semilla, aumenta el macollamiento. Sin embargo, según la FAO (2008), el número de plantas de un cultivo depende del distanciamiento de siembra, de la viabilidad de las semillas, del porcentaje de emergencia de plántulas y de la sobrevivencia de las plantas. Esto se debe a que la planta de arroz produce macollas los cuales a su vez producen granos. Por ello, la cantidad de semilla tiene en general menos influencia sobre el rendimiento final que otros factores discutidos anteriormente.

Para el análisis de varianza, se comparan las medias de cada nivel. Por lo tanto, la significancia en este análisis solamente muestra la diferencia de los diferentes niveles sin importar la estructura o comportamiento de los datos. Debido a la alta variación y una exigencia mayor en la estructura de los datos no es adecuado estimar el modelo de la función de producción en caso del experimento bajo riego por inundación. En el caso de riego por goteo, este mostró un patrón adecuado y corroborado por la significancia de los coeficientes. Lo anterior es debido a que el análisis de regresión estima el cambio en las medias condicionales por unidad adicional de cantidad de semilla y distanciamiento en el rendimiento y no las medias en sí.

Función de producción. Para la función de producción se utilizó un modelo distinto al del análisis de varianza. Para la función de producción se tomaron las combinaciones de los factores de distanciamiento y cantidad de semilla, tomando en cuenta solamente el sistema de riego por goteo debido a la alta variación de los datos del sistema de riego por inundación, como mencionado anteriormente. Los parámetros de la función de producción determinan el rendimiento del arroz esperado por la combinación de cierta cantidad de semilla con diferente distanciamiento entre hileras bajo riego por goteo.

Al descartar seis datos atípicos de las 64 observaciones, dejando 58 observaciones en total, los coeficientes de las interacciones que no mostraron significancia no fueron utilizados en el modelo. El modelo utilizado se muestra en la Ecuación 3:

$$Y = B_0 + B_1 (Dist) + B_2 (Dist)^2 + B_3 (CantSem) + B_4 (CantSem)^2 \quad [3]$$

En donde:

Y = Rendimiento en kilogramos por hectáreas

$Dist$ = Distanciamiento en centímetros entre hileras

$CantSem$ = Cantidad de Semilla en kilogramos por hectárea

El Cuadro 9 muestra el análisis de varianza de la regresión, demostrando significancia estadística con un P valor de 0.04.

Cuadro 9. Análisis de varianza de la regresión de rendimiento sobre las combinaciones de cantidad de semilla, distanciamiento y riego por hectárea del experimento de campo en Zamorano, Honduras, 2018.

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Pr>F
Regresión	4	4231541.959	1057885.49	2.68587	0.041064096
Residual	53	20875150.52	393870.765		
Total	57	25106692.48			

Los análisis de varianza de la regresión junto con el coeficiente de determinación indican que las variables utilizadas explican el rendimiento que se obtiene de determinada cantidad de semilla y distanciamiento.

El R^2 del experimento es 0.168, mostrado en el Cuadro 10. Este coeficiente es un valor bajo, sin embargo, se puede decir que el modelo si es explicado por los coeficientes, que conjuntamente difieren de cero, y tienen un valor P consignado menor de 0.05, siendo 0.041 (Cuadro 9). Esto puede ser atribuible a la variación dentro de cada tratamiento. La alta variabilidad es parcialmente atribuible a factores biológicos observados en las unidades experimentales al momento de la cosecha.

Cuadro 10. Estadísticas de la regresión de la función de producción de arroz sobre las cantidad de semilla y distanciamiento bajo riego por goteo en Zamorano, Honduras, 2018.

Estadísticas de la Regresión	
Coefficiente de Correlacion Multiple	0.4105
Coefficiente de determinacion R^2	0.1685
R^2 Ajustado	0.1057
Error Estándar	627.59
Observaciones	58.00

Según Novales (2010), el objeto básico de la econometría consiste en especificar y estimar un modelo de relación entre variables económicas relativas a una determinada cuestión conceptual. Para conocer en profundidad el comportamiento del rendimiento del arroz, es preciso medir y estimar un modelo de relación entre el distanciamiento entre hileras y la cantidad de semilla utilizada. Los coeficientes de la regresión se muestran en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Coeficientes de la regresión para la estimación de la función de producción de arroz sobre las combinaciones de cantidad de semilla, distanciamiento bajo riego por goteo en Zamorano, Honduras, 2018.

Variabes	Coefficientes	Error Estándar	P-value
Intercepto	-2843.373	2303.867	0.222
Distanciamiento	373.712	188.309	0.052
Distanciamiento ²	-9.308	5.165	0.077
Cantidad de Semilla	44.839	24.889	0.077
Cantdad de Semilla ²	-0.156	0.090	0.091

Los parámetros fueron estimados mediante la regresión de rendimiento (Ecuación 4):

$$Rend = -2843.373 + 373.712(Dist) - 9.308(Dist)^2 + 44.839(CantSem) - 0.156(CantSem)^2$$

[4]

En donde:

Y = Rendimiento en kilogramos por hectáreas

Dist = Distanciamiento en centímetros entre hileras

CantSem = Cantidad de Semilla en kilogramos por hectárea.

En este caso se trata de un máximo debido a que la segunda derivada de la función de producción con respecto a cada factor es negativa. Adicionalmente el producto de la segunda derivada de distanciamiento con la segunda derivada de cantidad de semilla es mayor a la derivada cruzada al cuadrado.

Para comprobar que el modelo no presentara problemas de heterocedasticidad, se realizó una prueba White. En la cual se obtuvo un Chi^2 calculado menor que el Chi^2 tabular, para lo cual se acepta la hipótesis nula, no hay heterocedasticidad.

H_0 = Homocedasticidad

H_a = Heterocedasticidad

Chi2 calculado ($N \cdot R^2$) = 6.46

Chi2 tabular (con alpha 0.05 y 3 grados de libertad) = 7.81

Esta prueba ayudó a comprobar que la forma funcional de esta regresión es correcta y a apoyar que no se está omitiendo variables relevantes en este modelo.

Superficie de respuesta. La Figura 2 muestra la superficie de respuesta, en este caso cóncava, que se obtuvo de la función de producción de rendimiento del arroz según combinaciones de distanciamiento entre hileras y cantidad de semilla.; cualquier otra combinación generará un rendimiento menor. El modelo de la superficie de respuesta es un modelo denominado predictivo debido a que el coeficiente de determinación es menor a 0.7 y el valor F es de 2.68587.

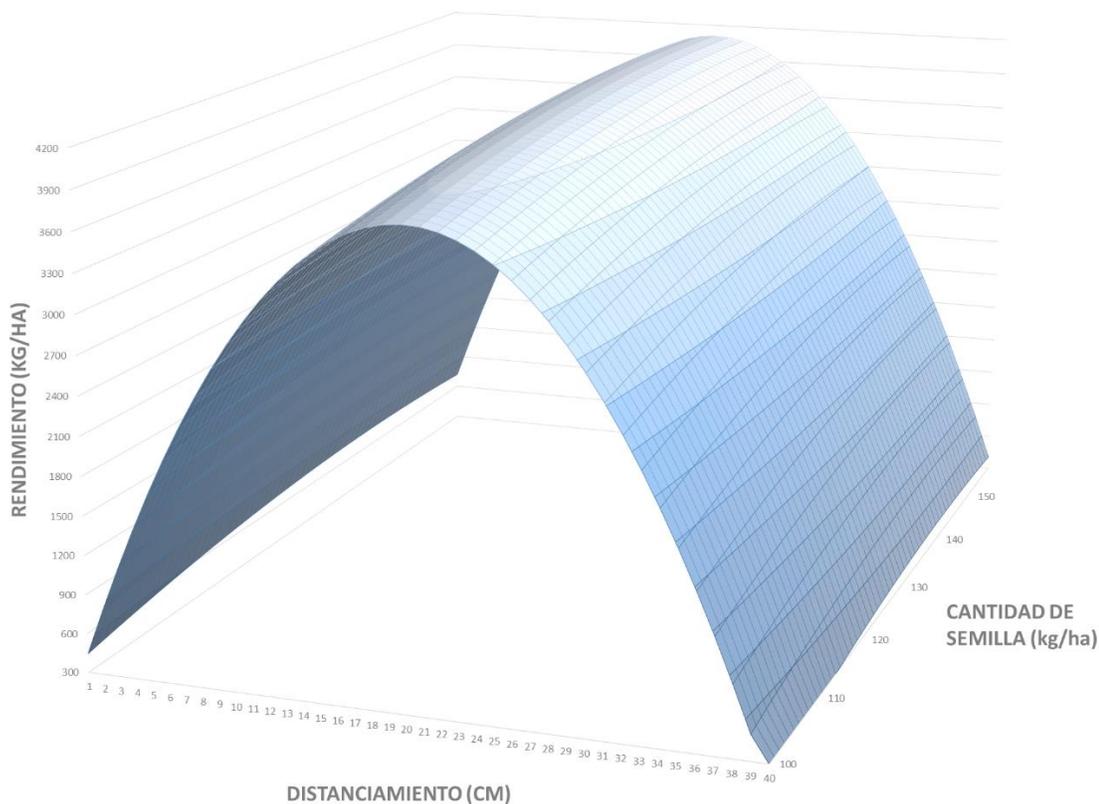


Figura 2. Superficie de respuesta de rendimientos según distanciamiento y cantidad de semilla bajo riego por goteo graficada mediante Excel, Honduras, 2019.

En la superficie de respuesta se aprecia que a medida que aumenta el distanciamiento entre hileras y la cantidad de semilla, aumentan los rendimientos hasta cierto punto donde después comienza a decrecer. Este punto exacto más adelante es detallado como el punto de máxima producción de la superficie. Aún no se han reportado investigaciones que evalúen el cambio en la cantidad de semilla por hectárea en Zamorano, Honduras para contrastar los datos de esta investigación, no obstante, si responden a un comportamiento normal de rendimientos decrecientes. Dentro de Zamorano, anteriormente se han realizado diversas investigaciones en cuanto al cultivo del arroz, se han caracterizado variables agronómicas, análisis económicos de su comercio laboral, estudios de factibilidad, evaluaciones de fertilización, efectos de sistemas de riego, retención de arsénico, entre otros. Pero en cuando a la evaluación de una superficie de respuesta para encontrar óptimos entre distanciamiento de siembra y cantidad de semilla, este estudio es el primero. Sin embargo, estudios hechos en Pakistán (Baloch *et al.*,2002) y Bangladesh (Bughio *et al.*, 2002) han sustentado la optimización del espaciamiento para variedades modernas de arroz, y densidades óptimas para altos rendimiento respectivamente.

Al aumentar la cantidad de plantas bajo sistema de riego por goteo, aumentan los rendimientos obtenidos hasta cierto punto. En el caso de aumentar el distanciamiento o la cantidad de semilla separadamente, tienen un efecto marginal positivo decreciente. Esto coincide con un estudio realizado en la UNNE, Argentina (2006), donde la densidad de siembra fue de 130 kilogramos de semilla por hectárea y se comprobó que con esta cantidad se logra el número de plantas mínimo para el arroz que es de 250 plantas por metro cuadrado. No obstante, hay que tener en cuenta el rescate, relación entre número de plantas logradas y número de semillas sembradas. Así mismo, coincide con Deambrosi, *et al.* (2007), quien afirma que es posible disminuir la densidad de siembra generalmente utilizada, sin perder productividad.

El uso un distanciamiento inadecuado reduce el rendimiento hasta un 20-30% (IRRI, 1997). La separación óptima asegura que la planta crezca en sus partes aéreas y subterráneas a través de la utilización eficiente de la radiación solar y los nutrientes (Khan *et al.*, 2005; Mohaddesi *et al.*, 2011). El espaciamiento de las plantas afecta directamente las actividades fisiológicas normales a través de la competencia intraespecífica (Oad *et al.*, 2001). Cuando la densidad de siembra excede el nivel óptimo, la competencia entre las plantas por la luz sobre el suelo o por nutrientes debajo del suelo se vuelve severa y, en consecuencia, el crecimiento de la planta se ralentiza y el rendimiento del grano disminuye. Si se utiliza el distanciamiento adecuado, no existe tal competencia y el rendimiento aumenta. Al utilizar un distanciamiento por debajo del óptimo tampoco existe competencia entre las plantas por la luz sobre el suelo o por nutrientes, sin embargo el rendimiento disminuye al no contar con el número de plantas adecuado, causando pérdidas económicas (Oad *et al.*, 2001).

Las cantidades de semilla y los distanciamientos que en combinación generan el máximo rendimiento son mostrados en la superficie de respuesta. La combinación de 20 cm y 144 kg de semilla por hectárea es el máximo productivo de 4,130 kilogramos por hectárea. En el caso del distanciamiento, se puede contrastar con el distanciamiento comúnmente utilizado en este cultivo que es de una separación de 17 a 20 centímetros, (SAG-DICTA, 2010).

Resultados económicos.

Análisis marginal. El análisis marginal se utilizó para determinar la combinación óptima económica de densidad y cantidad de semilla con la que se logre obtener el mayor margen bruto cuando no exista ninguna restricción presupuestaria y cuando si exista. La combinación óptima económica obtenida puede encontrarse o no dentro de las combinaciones evaluadas en el experimento. Los costos adicionales por agregar un kilogramo más de semilla y aumentar un centímetro más de distanciamiento son HNL.19.56 y HNL. -113.33, que provienen del registro del tiempo de mano de obra, los cuales representan el costo de una unidad más de cada factor y están al nivel de Zamorano. La combinación óptima de distanciamiento y cantidad de semilla se obtiene maximizando la función de margen bruto, que incluye el costo de una unidad adicional de cada insumo, la función de producción y el precio del arroz que es de HNL.9.24 traído a nivel de Zamorano,

después de corroborar con distintos productores de la zona. La función de margen neto (Ecuación 5) ayuda a determinar el máximo retorno después de tomar en cuenta los costos de distanciamiento y cantidad de semilla. Los costos incluidos en la siembra fueron los de semilla y mano de obra. La función de margen bruto se muestra a continuación:

$$MB = [9.24 * (-2843.373 + 373.712 (Dist) - 9.308 (Dist)^2 + 44.839 (CantSem) - 0.156 (CantSem)^2)] - [113.33(Dist)] - [19.56(CantSem)] \quad [5]$$

La combinación que maximiza el retorno a los costos de distanciamiento y cantidad de semilla es de 21 cm entre hileras, 137 kg de semillas por hectárea, bajo riego por goteo. La máxima utilidad es de HNL. 37,703.

Senda de expansión. La senda de expansión de producción bajo el modelo se aprecia en la Figura 3:

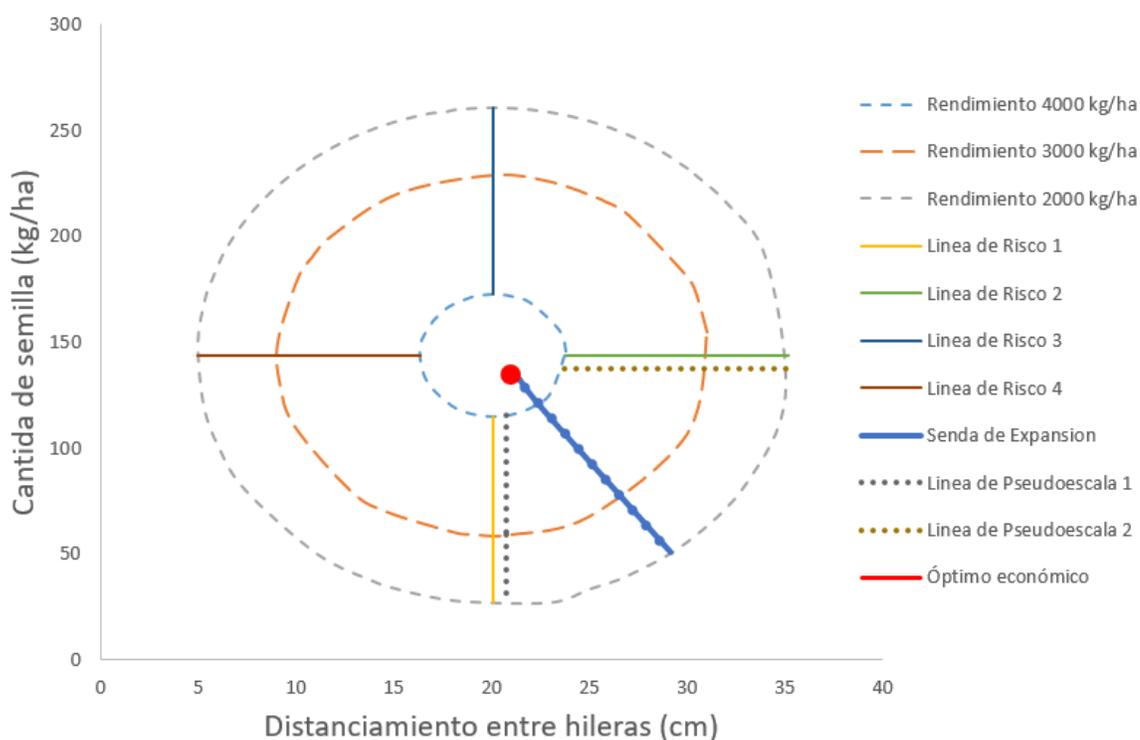


Figura 3. Senda de expansión, líneas de riesgo, líneas de pseudoescala, isocuantas y óptimo económico para la producción de arroz variedad Dicta Comayagua FL-20 en Zamorano, Honduras 2019.

La Figura 3 muestra la senda de expansión para la producción de arroz determinada por la función $CantSem = -10.305(Dist.) + 350.59$. Adicionalmente en la Figura 3 se muestran las líneas de pseudoescala que unen la cantidad de un insumo que maximiza el retorno posible a los demás costos excepto a distanciamiento y cantidad de semilla. Las líneas de pseudoescala son conocidas también como “frontera económica de producción”. Las líneas de pseudoescala indican la cantidad de un insumo que maximiza el ingreso por unidad de

costo de ese insumo y generalmente no optimizando con respecto al otro insumo. Las mismas líneas de pseudoescala son representadas por un modelo lineal (Ecuación 6 y 7).

$$Dist = 0CantSem + 20.734 \text{ [6]}$$

$$CantSem = 0Dist + 137 \text{ [7]}$$

En este estudio se tiene un mercado de productos y factores perfectamente competitivos; la producción de arroz en Honduras supera los 920 mil quintales, de acuerdo con cifras de la Asociación Nacional de Productores de Arroz. El incremento en los costos de la mano de obra ha obligado a buscar alternativas hacia el arroz. Según la SAG (2006), los precios del arroz pactados entre la industria y los productores oscilan entre HNL. 420 por quintal. La cosecha del presente año representa el 25 % del consumo nacional de cuatro millones de quintales. También se tiene un precio de producto positivo, y en este estudio existe el precio de un factor negativo, y se asume que no hay limitante presupuestaria.

Un factor de precio negativo puede parecer ilógico, pero puede existir en ciertas situaciones. En este estudio, el factor que tiene un precio negativo es el distanciamiento. Debido a que se utilizaron 12 jornales en el nivel más alto de distanciamiento y 2 jornales en el nivel más bajo, la diferencia es de -10 jornales. Por lo tanto, el factor distanciamiento tiene un Costo Marginal del Factor negativo. Incluso con el CMF negativo, la condición necesaria para un máximo es que el producto físico marginal sea igual a la razón de precios, lo que implica que se debe operar en donde Valor del Producto Marginal (VPM) sea menor a cero. Solamente la etapa tres de la función de producción se cumplen dichos supuestos, por lo tanto, en este estudio, se opera en la Etapa 3.

La función de producción se divide tradicionalmente en tres etapas. La etapa 1 se define como una región sobre la cual el PFP (Producto Físico Promedio) está aumentando (la elasticidad es mayor a uno). La etapa dos es la región donde el PFP está disminuyendo y el PFM (Producto Físico Marginal) es positivo. La etapa 3 es la región donde el PFM es negativo (Beatti *et al.*, 2009).

Presupuesto empresarial. Un presupuesto empresarial es una lista de todos los ingresos y gastos estimados asociados con una empresa específica para proporcionar una estimación de su rentabilidad. Se puede desarrollar un presupuesto para cada empresa existente o potencial en un plan de siembra. El Cuadro 8 muestra el presupuesto para la producción de arroz. Adicionalmente se detalla el margen neto estimado por hectárea de la combinación optima estimada en el análisis marginal. El margen neto fue calculado por ciclo de cultivo. Se tomó en cuenta las combinaciones optimas económicas, y se obtiene un porcentaje de rentabilidad del 25%.

Cuadro 12. Presupuesto completo para un ciclo de producción de arroz para una hectárea sembrada en Zamorano, Honduras, 2018.

Rendimiento (kg/ha)				4,110
Precio de campo (L)				9.24
Total Ingresos				37,972
Costos Variables (CV)	Unidad	Cantida d	Costo unitari o (HNL)	Costo por ha L/ha
1.Preparacion del suelo				
Mano de obra	Horas- hombre	9.00	201.00	3,720
2. Siembra				
Semilla DICTA COMAYAGUA FL- 20	kg	9.09	5.45	50
Mano de obra	Horas- hombre	8.00	42.50	340
3. Fertilización				
Fertilizante proporcional	kg	151.20	10.73	1,622
Mano de obra	Horas- hombre	12.00	42.50	510
4. Control de malezas				
Mano de obra	Horas- hombre	12.00	42.50	510
5. Insecticida y Fungicida				
Nativo	gr	200.00	2.88	576
4.Riego			180.0	
Riego	riego	50.00	0	9,000
Cintas de riego	m	104.00	42.50	4,420
Mano de obra	Horas- hombre			
6. Cosecha				
Mano de obra	Horas- hombre	13.00	42.50	553
7. Trabajador permanente				6,144
Total costos variables				27,444
Costos fijos (CV)				
1. Gastos por imprevistos	%CV	1.00	400.00	400
2. Mantenimiento general	%CV	1.00	525.00	525
3. Salario de Gerente				1,899
Total costos fijos				2,824
Costos totales				30,268
Margen neto				7,705
% Rentabilidad				25%

4. CONCLUSIONES

- Para el sistema bajo riego por goteo, se encontraron diferencias significativas en la variable tamaño de panícula con el factor cantidad de semilla y en la variable macollamiento con la interacción de los factores.
- Para el sistema bajo riego por inundación, se encontraron diferencias significativas en la variable rendimiento con la distancia, en la variable altura con el factor cantidad de semilla y en la variable macollamiento con la interacción de los factores.
- La superficie de respuesta de rendimiento del arroz alcanza un máximo global productivo en la combinación de 204 cm de distanciamiento entre hileras y 144 kilogramos de semillas por hectárea, determinada por la función: $Rendimiento = -2843.373 + 373.712(Dist) - 9.308(Dist)^2 + 44.839(CantSem) - 0.156(Fert)^2$.
- La combinación óptima se obtiene con 21 centímetros de distanciamiento entre hileras y 137 kilogramos de semilla por hectárea, y está determinada por la función de margen bruto: $MB = 9.24 * (-2843.373 + 373.712(Dist) - 9.308(Dist)^2 + 44.839(CantSem) - 0.156(Fert)^2 - 113.33(Dist) - 19.56(CantSem)$. Cuando se tienen limitantes presupuestarias se debe de seguir la senda de expansión caracterizada por la función: $Dist = -10.305(CantSem) + 350.59$, para maximizar el margen bruto.
- El cultivo de arroz tiene un porcentaje de rentabilidad de 25% utilizando la combinación óptima de cantidad de semilla y distanciamiento.

5. RECOMENDACIONES

- Repetir el experimento en distintas regiones de Honduras, y en distintas temporadas del año para apreciar cambios en del rendimiento y ganancias percibidas.
- Repetir el experimento utilizando nuevos materiales de siembra en distintas temporadas del año para lograr apreciar cambios en el comportamiento del rendimiento y ganancias percibidas.

6. LITERATURA CITADA

- Alfonso Novales. (2010). Análisis de Regresión. Madrid, España.
- A. W. Baloch, A. M. Soomro. (Pakistan, 2002). Optimum plant density for high yield in Rice. Nuclear Institute of Agriculture
- Beattie, B. R., Taylor, C. R., & Watts, M. J. (2009). The economics of production (2nd ed.). Malabar Fla.: Krieger Pub
- Benavides, Ángel; Jara, Edgar; Pineda, Renán. (2014). Comparación de tres sistemas de riego para la producción de arroz con tres densidades de siembra en Zamorano (Tesis de Pregrado)
- Benavides, A. C. 2014. Cultivo de arroz y su impacto con gases de efecto invernadero (en línea). Universidad Nacional de San Martín. Consultado 14 de junio de 2015. Disponible en <http://www.unsm.edu.pe/articulos.php?idarticulo=40>
- Box, G. E., Hunter, W. G., & Hunter, S. (1993). Statistics for experiments. An introduction to design, data analysis, and model building. Barcelona, Spain: John Wiley and Sons. CEPAL. (18 de Julio de 2016). CEPALSTAT. Obtenido de http://estadisticas.cepal.org/cepalstat/Perfil_Nacional_Social.html?pais=HND&id idioma=spanish
- Debertin, D. L. (2012). Agricultural Production Economics. Kentucky USA: Macmillan Publishing Company. Recuperado el Mar de 2017, de <http://www.uky.edu/~deberti/prod/agprod5.pdf>
- Dirección de ciencia y Tecnología Agropecuaria(DICTA). (2003). En Manual Técnico para el cultivo del Arroz. Comayagua, Honduras, C.A.: Secretaria de Agricultura y Ganadería (SAG).
- Echeverría, Otto; Pineda, Renán. (2015). Efecto de tres sistemas de riego y dos variedades en el rendimiento de arroz (*Oryza sativa*) bajo dos métodos de siembra. (Tesis de Pregrado)

- El arroz y el agua: una larga historia matizada (en línea). Consultado 8 de febrero de 2018. Disponible en <http://www.fao.org/rice2004/es/f-sheet/hoja1.pdf>
- Enrique Deambrosi, Ramón Méndez. (2007). Respuesta de cultivares de arroz de tipo Indica a densidades de siembra y aplicaciones de nitrógeno en la zona este de Uruguay. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, Serie Técnica N° 167
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2004.
- IRRI. (1997). Módulo de entrenamiento en producción de arroz. Laguna, Filipinas: International Rice Research Institute.
- IRRI. (2007). Rice Production Manual. Estados Unidos.: International Rice Research Institute.
- Jairon Severino. (20 de noviembre 2013). La producción de arroz se auxilia de la tecnología para ser competitiva. El Dinero, IV, p. 37.
- Khan, M.B., T.A. Yasir and M. Aman, 2005. Growth and yield comparison of different linseed genotypes planted at different row spacing. *Int. J. Agric. Biol.*, 7: 515–517
- Kraemer, A., J.F. Moulin, A. Marín, D. Kruger y L. Herber (s.f.). 2013. Principios básicos para el manejo del riego en el cultivo de arroz. Buenos Aires, Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Krugman, P. R., & Wells, R. (1953). *Macroeconomía: introducción a la Economía*. Obtenido de https://books.google.hn/books?id=9kuFd0Hb8T0C&pg=PR10&lpg=PR10&dq=an+alisis+marginal+krugman&source=bl&ots=CLeWwk3nur&sig=koaRBS5t0qv7jzAl_jRPMuDEc_4&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwiPn5zOxY_VAhXHcT4KHYQUdVAQ6AEIRzAE#v=onepage&q&f=false
- M. Monjurul. (2013). Optimizing Plant Spacing for Modern Rice Varieties. *International Journal of Agriculture & Biology*
- Mohaddesi, A., A. Abbasian, S. Bakhshipour and H. Aminpanah, 2011. Effect of different levels of nitrogen and plant spacing on yield, yield components and physiological indices in high yield rice. *Amer-Eur.*

- Montgomery, D. (2003). Diseño y análisis de experimentos. México: Limusa.
- Policonomics. (2006). Marginal rate of technical substitution. Economics made simple. Recuperado el 2016, de <http://www.policonomics.com/lp-production1-marginal-rate-oftechnical-substitution/>
- Napoleón Discua. (Valle de Comayagua, 2006). Cuestionario sobre la producción de arroz en Honduras. SAG, V, 2.
- Oad, F. C., B.K. Solangi, M.A. Samo, A.A. Lakho, Z.U. Hassan and N.L. Oad, 2001. Growth, yield and relationship of rapeseed under different row spacing. *Int. J. Agric. Biol.*, 3: 475–476
- Pitty, A., Reyna, J., Trabanino, R., Avedillo, M., Rueda, A. (1994). Caracterización agroeconómica del cultivo de arroz en Honduras con énfasis en fitoprotección
- Secretaria de Agricultura y Ganadería (SAG). (2015). “PLAN ESTRATÉGICO Y PROGRAMA DE INVERSIÓN PARA EL DESARROLLO COMPETITIVO Y SOSTENIBLE DE LA CADENA DE VALOR DEL ARROZ EN HONDURAS – PEP - ARROZ”
- Shi, Q., X. Zeng, M. Li, X. Tan y F. Xu. 2002. Effects of different water management practice on rice growth. In: Bouman B.A.M., H. Hengsdijk, B. Hardy, P.S. Bindraban, T.P. Tuong, y Ladha J.K. (ed) *Water-wise Rice Production :Intermittent irrigation*. International Rice Research Institute, Los Baños, Filipinas. p 3-13.
- Sofía Olmos. (2006). PRÁCTICAS PARA EL MANEJO DE ARROZ. UNNE, Argentina: Facultad de Ciencias Agrarias, UNNE.
- Universidad Autónoma de Chapingo. (1997). Los rendimientos y la productividad. Chapingo, 2, p.160.
- Yener Caicedo Ordoñez. (2008). Evaluación de características agronómicas de cuatro líneas interespecíficas de arroz. Universidad del Pacífico, Colombia: Tesis de Pregrado.

Anexo 2. Mapa de siembra de experimento en Zona II de Escuela Agricola Panamericana Zamorano, Honduras 2018.

