

**Evaluación económica de densidades y dosis
de fertilización N-P-K en frijol (*Phaseolus
vulgaris* var. *Amadeus 77*) con inoculación de
Rhizobium en Zamorano, Honduras**

Christian Eduardo Gil Marroquin

**Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Honduras**

Noviembre, 2018

ZAMORANO
CARRERA DE ADMINISTRACIÓN DE AGRONEGOCIOS

**Evaluación económica de densidades y dosis
de fertilización N-P-K en frijol (*Phaseolus
vulgaris var. Amadeus 77*) con inoculación de
Rhizobium en Zamorano, Honduras**

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

Presentado por

Christian Eduardo Gil Marroquin

Zamorano, Honduras

Noviembre, 2018

**Evaluación económica de densidades y dosis de fertilización N-P-K en frijol
(*Phaseolus vulgaris* var. *Amadeus* 77) con inoculación de *Rhizobium* en Zamorano,
Honduras**

Christian Eduardo Gil Marroquin

Resumen. El frijol es uno de los granos más importantes en la dieta de las familias hondureñas reportando un incremento de consumo anual de 1.8%. Dado al aumento de consumo, se han realizado estudios para optimizar los rendimientos. Varios estudios consisten en optimizar la combinación entre el número de plantas por hectárea y niveles de fertilización, para lograr alcanzar mayores producciones y a la vez óptimos retornos. El objetivo del estudio fue evaluar el efecto de tres densidades y cuatro dosis proporcionales de fertilización (proporciones de nitrógeno-fosforo-potasio de 9.7:1:7) en el rendimiento de frijol con inoculación de *Rhizobium*. Las 3 densidades fueron 144,000, 180,000 y 216,000 pl/ha y los 4 niveles proporcionales de fertilización 0, 68, 136, 272 kg/ha de nitrógeno evaluados con y sin aplicación de *Rhizobium*. Los rendimientos productivos fueron maximizados con una combinación de densidad y dosis proporcional de fertilización experimental de 183,470 pl/ha y 203 kg/ha de nitrógeno, respectivamente. La combinación de densidad y dosis proporcional de fertilización que optimiza el beneficio bruto experimental es de 177,111 pl/ha y 172 kg/ de nitrógeno, 18 kg/ha de fosforo y 124 kg/ha de potasio, respectivamente.

Palabras clave: Análisis marginal, combinación óptima, líneas de pseudoescala, senda de expansión.

Abstract. Dry beans is one of the most important grains in Honduran families reporting a 1.8% increase in annual consumption. Due to the consumption increase, studies has been conducted for optimal production. Several studies consist on optimization of the combination between the amount of plants per hectare and fertilization levels to get a higher production and optimal benefits. The objective of this study was to evaluate the effect of three densities and four proportional dosages of fertilization (nitrogen-phosphorus-potassium proportions of 9.7:1:7) on bean performance with *Rhizobium* inoculation. The three densities were 144,000, 180,000 y 216,000 plants/ha and the four proportional fertilization levels of 0, 68, 136, 272 kg/ha of nitrogen evaluated with and without *Rhizobium* application. The productive efficiency was maximized with an experimental combination of density and proportional fertilization dosage of 183,470 plants/ha y 203 kg/ha of nitrogen respectively. The experimental combination of density and proportional fertilization dosage that optimize gross benefits is 177,111 plants/ha y 172 kg/ha of nitrogen, 18 kg/ha of phosphorus and 124 kg/ha of potassium, respectively.

Key words: Expansion path, marginal analysis, optimal combination, pseudo scale lines.

CONTENIDO

Portadilla	i
Página de firmas	ii
Resumen	iii
Contenido	iv
Índice de Cuadros y Anexos.....	v
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. METODOLOGÍA	3
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	10
4. CONCLUSIONES.....	24
5. RECOMENDACIONES	25
6. LITERATURA CITADA.....	26
7. ANEXOS	28

ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadros	Página
1. Descripción de tratamientos (TRT) de combinaciones de densidad de plantas y dosis proporcional de fertilización de elemento puro de N-P-K, adicional al presente en el suelo, con inoculante y sin inoculante <i>Rhizobium</i> en Zamorano, Honduras, 2018.	5
2. Observaciones atípicas del rendimiento en función de densidad y dosis proporcional de fertilización sin aplicar inoculante en Zamorano, Honduras, 2018.	12
3. Análisis de varianza de la regresión de rendimiento en función de densidad de plantas por hectárea y dosis proporcional de fertilización sin inoculación de <i>Rhizobium</i> por hectárea en Zamorano, Honduras. 2018.	14
4. Coeficientes de la regresión de rendimiento en función de densidad de plantas por hectáreas y dosis proporcional de fertilización sin inoculación de <i>Rhizobium</i> en Zamorano, Honduras. 2018.	15
5. Supuestos de la prueba general de heteroscedasticidad White usada en la regresión de rendimiento en kilogramos por hectárea de frijol en Zamorano, Honduras, 2018.	15
6. Chi cuadrado calculado y Chi cuadrado tabular de la prueba de White para heteroscedasticidad de rendimiento de frijol en kilogramos por hectárea en Zamorano, Honduras, 2018.	15
7. Rendimientos con las combinaciones de densidad y dosis proporcional de fertilización N-P-K sujeto a diferentes limitantes presupuestarias, Zamorano, Honduras, 2018.	19
8. Presupuesto completo para la producción de una hectárea de frijol variedad <i>Amadeus 77</i> en Zamorano, Honduras, 2018.	22
9. Continuación del presupuesto completo para la producción de una hectárea de frijol variedad <i>Amadeus 77</i> en Zamorano, Honduras, 2018.	23

Figuras	Página
1. Rendimientos a diferentes densidades de plantas por hectárea sujeto a incrementos en la dosis proporcional de fertilización con inoculante en Zamorano, Honduras, 2018.	11
2. Rendimientos a diferentes dosis proporcionales de fertilización sujeto a incrementos en la densidad de plantas por hectárea con inoculante en Zamorano, Honduras, 2018.	11
3. Rendimientos a diferentes densidades de plantas por hectárea sujeto a incrementos en la dosis proporcional de fertilización sin inoculante en Zamorano, Honduras, 2018.	13
4. Rendimientos a diferentes dosis proporcionales de fertilización sujeto a incrementos en la densidad de plantas por hectárea sin inoculante en Zamorano, Honduras, 2018.	13
5. Superficie de respuesta de rendimientos según la función de producción de densidad de plantas por hectárea y dosis proporcional de fertilización (N-P-K) de kilogramos por hectárea de nitrógeno en Zamorano, Honduras, 2018.	17
6. Isocuantas, senda de expansión, líneas de risco y líneas de pseudoescala para la producción de frijol variedad <i>Amadeus 77</i> en Zamorano, Honduras, 2018.	20

Anexos	Página
1. Distribución de los 24 tratamientos de densidad de número de plantas por hectárea y dosis proporcional de fertilización aplicando y no aplicando inoculante en el experimento de campo en Zamorano, Honduras, 2018.	28
2. Resultado de análisis de suelos de las unidades experimentales evaluadas en Zamorano, Honduras, 2018.	29
3. Regresión de los tratamientos de densidad de plantas por hectárea y dosis proporcional de fertilización aplicando inoculante en el experimento de campo en Zamorano, Honduras, 2018.	30
4. Regresión de los tratamientos de densidad de plantas por hectárea y dosis proporcional de fertilización sin aplicar inoculante en el experimento de campo en Zamorano, Honduras, 2018.	31

1. INTRODUCCIÓN

La producción agrícola mantiene una influencia en las investigaciones a nivel mundial; informes publicados por Naciones Unidas (2016) mencionan que: "El mundo necesita producir un 50% más de comida para poder alimentar a 9,000 millones de personas en el 2050". Durante las décadas de 1980 y 1990 existieron cosechas record, cambios en las dietas y aumentos en los salarios para lograr adquirir los alimentos a esos precios. Sin embargo, en el inicio del siglo XXI, la producción no logró solventar la demanda de alimentos (Naciones Unidas, 2016).

El frijol (*Phaseolus vulgaris L.*) es uno de los granos más importantes en el consumo de las familias centroamericanas por su alto contenido en carbohidratos (61.29 g), proteína (22.53 g), minerales como el hierro (6.69×10^{-3} g) y vitaminas pertenecientes al complejo B. (Instituto de Nutrición de Centro América y Panamá, 2012). Por esta razón, ha conseguido posicionarse entre los principales alimentos de las familias hondureñas. Según datos reportados por la Unidad de Planeamiento y Evaluación de Gestión (2015), existió un incremento en la tasa de consumo humano de 1.6% en el 2008. Igualmente, las investigaciones enfocadas a mejorar las capacidades productivas del cultivo de frijol son constantes día con día.

En Honduras, la superficie producida de frijol ha mostrado incrementos durante el periodo de producción 2010–2011 al periodo 2014–2015, registrando un crecimiento porcentual de 1.6 que corresponde a 6,410 hectáreas (UPEG, 2015) comprendidas en 10 departamentos del país. Según la UPEG (2015), la producción en el ciclo postrera supera en 40.4% al ciclo de primera. La adecuada menor precipitación para el frijol que se presenta en el ciclo de postrera logra un buen desarrollo y reduce el ataque de enfermedades (Dirección General de Investigación y Extensión Agrícola, 1991).

Pérez y Pimentel, (2014) afirman que el distanciamiento entre hilera afecta el crecimiento de la planta porque esta muestra mayor competencia al aumentar la densidad de 180,000 a 200,000 pl/ha, originando un estímulo en el crecimiento para así lograr mayor absorción de luz solar y nutrientes. Por otro lado, la fertilización nitrogenada es clave en el ciclo vegetativo y reproductivo del cultivo de frijol (García, 2009); existe un incremento en rendimiento al aumentar los niveles de fertilización de 120 a 160 kg/ha de nitrógeno (Sandoval, 2002).

En el mismo estudio de Sandoval (2002), se demostró que la interacción de densidad de plantas y cantidad de fertilizante es negativa por lo que al momento de incrementar las cantidades de las variables no se observa un incremento en el rendimiento. Por otro lado, los rendimientos se pueden incrementar de 15 a 30 por ciento al utilizar la bacteria *Rhizobium* como inoculante de la semilla de frijol (Hernández, 2012). Paladines (2017),

demonstró que existe un incremento en la disponibilidad del nitrógeno de 60 a 80 kg/ha al utilizar *Rhizobium* debido a la habilidad que posee la bacteria de fijar el nitrógeno presente en el aire, y transformarlo en compuestos como el amoníaco que sí puede ser absorbido por la planta (Calvo, 2011).

El rango recomendado de número de plantas por hectárea de frijol por Sandoval (2012) es de 150,000–200,000 pl/ha. Para obtener rendimientos de 1 ton/ha, se recomienda aplicar 68 kg/ha de nitrógeno (Bertsch, 2009). Por otra parte, Hernández (2012) recomienda una aplicación de 1 kg/ha de *Rhizobium*.

Esta investigación está enfocada a todos los productores de frijol común que se encuentren con una altitud de 800 msnm, precipitación promedio anual de 1,200 mm y una temperatura promedio anual de 24° Celsius. El objetivo del estudio fue evaluar el efecto de tres densidades y cuatro dosis proporcionales de fertilización (nitrógeno-fosforo-potasio) en el rendimiento de frijol con inoculación de *Rhizobium* por lo tanto se plantearon los siguientes objetivos:

- Analizar la superficie de respuesta del rendimiento de frijol según aumentos en densidad y dosis proporcional de fertilización al inocular con *Rhizobium*.
- Evaluar las combinaciones de densidad y dosis proporcionales de fertilización (N-P-K) al inocular con *Rhizobium* para alcanzar los niveles óptimos económicos de producción.
- Evaluar las combinaciones de densidad y dosis proporcionales de fertilización (N-P-K) al inocular con *Rhizobium* sujeto a restricciones presupuestarias de productores de frijol.
- Analizar los beneficios netos proporcionadas en el óptimo económico.

2. METODOLOGÍA

La evaluación del uso de *Rhizobium*, en tres densidades y cuatro dosis proporcionales de fertilización N-P-K en frijol (*Phaseolus vulgaris* var. *Amadeus 77*) se realizó en dos partes, el análisis productivo y el económico. La evaluación productiva fue analizada por medio de la superficie de respuesta de rendimientos experimentales, y se utilizó metodología de análisis marginal para evaluar la parte económica con el objetivo de encontrar la combinación de insumos que optimiza el retorno. La superficie de respuesta se determinó con el establecimiento de una parcela experimental y una función de producción. Con el análisis marginal se determinaron las ganancias generadas por medio de la función de beneficio bruto. También se realizó un presupuesto completo para evaluar la relación entre los costos totales y los ingresos en la combinación óptima y así obtener el margen neto.

Metodología de superficie de respuesta (MSR).

La superficie de respuesta fue aplicada como varios autores (Box, Hunter y Hunter, 1993). Para identificar la combinación óptima de valores de las variables estudiadas que adecúen el experimento y optimicen las variables estudiadas. La superficie de respuesta fue descrita por la regresión de los rendimientos de una parcela experimental. La parcela experimental fue compuesta de 24 combinaciones de número de plantas por hectárea, dosis proporcional de fertilización y con o sin inoculante. Los rendimientos de las unidades experimentales se utilizaron para desarrollar la función de producción y así determinar la combinación de densidad y dosis proporcional de fertilización que optimiza los retornos.

La metodología de superficie de respuesta fue propuesta por Box et al (1993). Ellos mencionan que la MSR es: “un conjunto de métodos y procesamientos estadísticos y matemáticos, utilizados por los científicos para resolver ciertos tipos de problemas científicos.” La superficie de respuesta tiene como objetivo proporcionar valores que se adecúen con el experimento para poder obtener un modelo matemático que logren optimizar la variable evaluada (Box et al.1993).

La superficie de respuesta se graficó por medio del programa de Microsoft Excel 2016.

Establecimiento del experimento en el campo. El establecimiento del experimento se realizó en un lote de zona 2 perteneciente a la unidad de Producción de Granos y Semillas de la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, ubicado en el Valle de Yeguaré, a 32 km de Tegucigalpa carretera hacia Danlí, Honduras. El lote se encuentra a una altura de 800 msnm, una temperatura promedio anual de 24 °C y precipitación promedio anual de 1,200 mm.

Se establecieron parcelas de investigación con un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones y un arreglo trifactorial de densidad de plantas, dosis proporcional de fertilización N-P-K y uso de *Rhizobium* (Anexo 1).

El experimento de campo constó con 96 unidades experimentales distribuidas en 4 bloques. Cada unidad experimental tuvo un arreglo de siembra de dos hileras de 4 m de largo y un distanciamiento de 0.50 m entre hilera. El distanciamiento entre planta se determinó según la densidad deseada para cada tratamiento.

El experimento se realizó entre los meses de junio a septiembre del año 2018. La cosecha se realizó a los 80 días después de la siembra al momento de alcanzar la etapa de maduración. La variedad seleccionada fue *Amadeus 77* por su excelente rendimiento, resistencia al mosaico dorado amarillo, por la tolerancia a altas temperaturas debido a que posee buena adaptación a zonas bajas e intermedias de Centro América (Rosas y Escoto, 2002).

En el transcurso del experimento se realizaron las actividades agronómicas necesarias para el correcto desarrollo del cultivo. Se registraron 7 aplicaciones de agroquímicos que incluye aplicación de herbicidas (2), fungicidas (2) e insecticidas (3), riego y mano de obra que se utilizó para la siembra y dos fertilizaciones aplicadas.

Combinaciones de fertilización, densidad e inoculante. Las combinaciones de densidad de plantas y dosis proporcional de fertilización al inocular y no inocular con *Rhizobium* (Cuadro 1) consistieron en cambios porcentuales de una base de densidad y fertilización. Esta se justifica por la recomendación de Bersch (2003) que consta de una densidad de 180,000 plantas/ha y una fertilización de 68 kg de nitrógeno, 7 kg de fósforo y 49 kg de potasio para obtener 1 ton/ha de frijol. Los cambios porcentuales en densidad fueron de 20% menos y 20% más sobre la cantidad base para tener un total de 3 densidades. Por otro lado, la fertilización se incrementó 100 y 200% sobre la cantidad de fertilización recomendada, agregando un cuarto tratamiento con 0 kg/ha de fertilización para tener un total de 4 niveles de fertilización. La cantidad del inoculante *Rhizobium* aplicado a la semilla fue 0 y 600 gr/ha.

Cuadro 1. Descripción de tratamientos (TRT) de combinaciones de densidad de plantas y dosis proporcional de fertilización de elemento puro de N-P-K, adicional al presente en el suelo, con inoculante y sin inoculante *Rhizobium* en Zamorano, Honduras, 2018.

TRT	Densidad (plantas/ha)	Dosis adicional de Fertilización (kg/ha)			Inoculante (gr/ha)
		N	P	K	
1	144,000	0	0	0	0
2	180,000	0	0	0	0
3	216,000	0	0	0	0
4	144,000	68	7	49	0
5	180,000	68	7	49	0
6	216,000	68	7	49	0
7	144,000	136	14	98	0
8	180,000	136	14	98	0
9	216,000	136	14	98	0
10	144,000	272	28	196	0
11	180,000	272	28	196	0
12	216,000	272	28	196	0
13	144,000	0	0	0	600
14	180,000	0	0	0	600
15	216,000	0	0	0	600
16	144,000	68	7	49	600
17	180,000	68	7	49	600
18	216,000	68	7	49	600
19	144,000	136	14	98	600
20	180,000	136	14	98	600
21	216,000	136	14	98	600
22	144,000	272	28	196	600
23	180,000	272	28	196	600
24	216,000	272	28	196	600

Las proporciones de nitrógeno, fósforo y potasio (9.7:1:7) están expresadas en cantidades de elemento puro requerido por la planta para su correcto desarrollo, no en el estado de óxido presente en los fertilizantes.

Cosecha de la parcela experimental. La cosecha se realizó a los 80 días después la siembra, en el momento que la planta se encuentra en la fase de maduración. En esta etapa el cultivo ha finalizado el llenado y secado parcial de las vainas. Durante la cosecha se recolectaron las vainas que se encontraban dentro de los dos surcos pertenecientes a cada parcela experimental.

Recolección de datos experimentales. La recolección de datos experimentales tiene por objetivo medir la variable respuesta que consistió en rendimientos de frijol expresado en kilogramos por hectárea estandarizado al 12% de humedad. El rendimiento se obtuvo cosechando 2 metros de cada surco correspondientes a cada tratamiento, recolectando el grano de cada vaina. Asimismo, se realizaron pruebas de humedad a las muestras de semilla para lograr estandarizar el porcentaje de humedad al 12%. Se obtuvo el peso de los granos producidos por planta y este se multiplicó por la densidad final para obtener el rendimiento del experimento.

Función de producción. La superficie de respuesta se determinó con una función de producción de forma funcional cuadrática. Los rendimientos se evaluaron por separado obteniendo dos funciones de producción con y sin *Rhizobium*. La variable dependiente en las regresiones fue representada por rendimiento de frijol estandarizado al 12% de humedad expresado en kilogramos por hectárea. Las variables independientes fueron densidad y fertilización, expresadas en plantas por hectárea y kilogramos por hectárea de nitrógeno, respectivamente.

Los rendimientos de los 24 tratamientos experimentales fueron empleados para correr la regresión con la herramienta de Análisis de Datos de Excel. Los rendimientos se evaluaron por separado, corriendo dos regresiones que representan a las funciones de producción de rendimiento de frijol aplicando (Ecuación 1) y no aplicando *Rhizobium* (Ecuación 2).

$$\text{Rend} = \alpha_0 + \alpha_1 \text{Dens} + \alpha_2 \text{Dens}^2 + \alpha_3 \text{Fert} + \alpha_4 \text{Fert}^2 + \alpha_5 \text{Dens} * \text{Fert} \quad [1]$$

$$\text{Rend} = \beta_0 + \beta_1 \text{Dens} + \beta_2 \text{Dens}^2 + \beta_3 \text{Fert} + \beta_4 \text{Fert}^2 + \beta_5 \text{Dens} * \text{Fert} \quad [2]$$

Las funciones de producción se analizaron por separado haciendo una prueba de significancia entre la interacción de densidad y dosis proporcional de fertilización. Por otro lado, las funciones de producción fueron analizadas por medio del diagnóstico de regresión del programa STATA. El diagnóstico de regresión utilizó la herramienta DFFIT que determina las observaciones que tiene la mayor influencia sobre la regresión. El punto de corte para el DFFIT es presentado en la Ecuación 3. Las observaciones que sean mayores al punto de corte son consideradas datos atípicos por la influencia que ejercen a la regresión.

$$\text{Corte} = 2\sqrt{k/n} \quad [3]$$

Corte: punto de corte.

k: número de variables de la regresión de densidad y dosis proporcional de fertilización.

n: número de observaciones de la regresión de densidad y dosis proporcional de fertilización.

La regresión se analizó por medio de la prueba White probando si existía heteroscedasticidad. La prueba White trabajó bajo el supuesto de que el Chi cuadrado calculado es menor que el Chi cuadrado tabular para indicar si existe heteroscedasticidad (Gujarati y Porter, 2009).

La función de producción se evaluó para comprobar que en realidad los óptimos sean valores que maximicen el beneficio bruto. Para ello se tomaron en cuenta las condiciones de segundo orden.

Metodología de análisis marginal.

La metodología de análisis marginal determina cual es la combinación de densidad y fertilizante que optimiza la utilidad de la producción de frijol al utilizar y no utilizar *Rhizobium*. El análisis marginal se basó en la superficie de respuesta, el precio de venta del kilogramo de frijol y los costos unitarios que incurrieron en la densidad y dosis proporcional de fertilización mediante una función de margen bruto. Asimismo, se trabajó con cinco restricciones presupuestarias para elaborar la senda de expansión y las líneas de pseudoescala. Finalmente, se recolectaron los costos fijos y variables para elaborar un presupuesto completo y consecuentemente obtener el margen neto de la combinación óptima.

El análisis marginal evalúa cuanto retorno adicional genera el uso de un insumo adicional (Debertin, 2012). El análisis marginal consistió en una función de beneficio neto que relacionaba la función de producción obtenida en la evaluación productiva, el precio y los costos adicionales de una unidad de densidad y dosis proporcional de fertilización. Esta información se utilizó en la herramienta de Solver de Excel para encontrar la combinación de densidad y dosis proporcional de fertilización que genere el mayor beneficio neto no importando así que esta combinación no se encuentre dentro de los tratamientos en el experimento de campo.

Precio. El precio que se utilizó para este estudio fue el precio de campo. El precio de campo se calculó restando el costo de transporte y cosecha al precio del kilogramo de frijol puesto en Tegucigalpa.

Costo de producción. El costo de producción que se utilizó en el estudio fue el costo de una unidad adicional (planta por hectárea y kilogramo de nitrógeno) para la densidad y dosis proporcional de fertilización. El costo adicional de densidad constó de dos variables, el costo de la semilla y el costo de la mano de obra de la siembra. Para el caso de la fertilización el costo adicional reflejó el costo de los fertilizantes utilizados (12-24-12, Urea y KCl) más el costo de la mano de obra por la aplicación de los fertilizantes.

El costo adicional de una semilla fue calculado con la división del precio de un kilogramo de semilla entre el número de semillas que contiene un kilogramo. Con respecto al costo adicional de sembrar una planta extra, se dividió el costo adicional de mano de obra que existe entre la densidad mayor y menor, entre la diferencia de número de plantas de la densidad mayor y menor.

El costo adicional del uso de un kilogramo de nitrógeno fue calculado por la división del costo total de la proporción de fertilizantes utilizados entre la cantidad de nitrógeno. El costo de mano de obra adicional fue calculado dividiendo la diferencia entre la dosis mayor y menor de los costos de mano de obra y la cantidad de fertilizante aplicada.

Para el costo de *Rhizobium* se debe de tomar el tiempo que se lleva al inocular la bacteria en la semilla y el costo unitario del *Rhizobium*.

El precio de la semilla que se utilizó fue el precio que vende Zamorano en el mercado. La empresa FERTICA y DISAGRO fueron las casas comerciales que poseen los mejores precios de fertilizante puesto en Zamorano.

Función de beneficio neto. El beneficio neto se obtuvo restando de los ingresos totales los costos que varían que son atribuibles a la densidad de plantas y dosis proporcional de fertilización. Los costos que varían son los costos que cambian de un tratamiento a otro (Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo, 1988). La función de beneficio neto usando inoculante incluye en su costo que varía la suma del costo variable de densidad y fertilizante más el costo variable del *Rhizobium*. Las funciones de beneficio neto aplicando (Ecuación 4) y no aplicando *Rhizobium* (Ecuación 5) se muestran a continuación:

$$BN = [P * Rend] - [C_{Dens} * Dens + C_{Fert} * Fert + C_{Inoc} * Inoc] \quad [4]$$

$$BN = [P * Rend] - [C_{Dens} * Dens + C_{Fert} * Fert] \quad [5]$$

donde:

BN: beneficio neto.

P: precio de campo de grano de frijol.

Rend: rendimiento de frijol en kilogramos por hectárea.

Dens: densidad de plantas expresada en plantas por hectárea.

Fert: dosis proporcional de N-P-K (9.7:1:7), expresado en kilogramos por hectárea de nitrógeno.

Inoc: cantidad de inoculante, expresada en gramos por hectárea.

C_{Dens} : costo de una planta adicional de frijol.

C_{Fert} : costo de un kilogramo adicional de fertilizante N-P-K basado en un kilogramo adicional de nitrógeno.

C_{Inoc} : costo del uso de inoculante.

Senda de expansión. La senda de expansión fue estimada para determinar la combinación de densidad y dosis proporcional de fertilización N-P-K dentro de la superficie de respuesta que obtenga un determinado nivel de producción a un mínimo costo.

Para cada nivel de producción existen diferentes combinaciones de densidad de plantas por hectárea y dosis proporcional de fertilización. Esta serie de combinaciones de insumos que generan un mismo nivel de producción, en este caso el mismo nivel de rendimiento de frijol, se conocen como isocuanta (Doll y Orazem, 1984). Con la ayuda de la limitante

presupuestaria se obtuvo la combinación que minimiza el costo dentro de ese mismo nivel de producción. Este punto fue determinado por medio de la tasa marginal de sustitución, que es la cantidad de insumo que se debe disminuir al momento de aumentar una unidad de otro insumo manteniendo el nivel de producción constante (Anaya, 2017). Este punto específico es el lugar donde la pendiente de la isocuanta iguala la pendiente de la limitante presupuestaria. La senda de expansión atraviesa este punto en todos los niveles de producción existentes (Debertin, 2012).

Las isocuantas se determinaron con la herramienta Goal Seek de Excel, donde se ubicaron las diferentes combinaciones de insumos que generan el mismo nivel de producción. Para cada nivel de producción o isocuanta se estableció una limitante presupuestaria. En cada isocuanta se obtuvo un óptimo económico local, que no es más que el punto donde la tasa marginal de sustitución iguala a la división de los precios unitarios de densidad y dosis proporcional de fertilización. Este punto es donde se minimizan los costos a un nivel de producción esperado.

Líneas de pseudoescala. Las líneas de pseudoescala conecta todos los puntos donde un insumo maximiza sus ganancias, manteniendo constante el otro insumo (Debertin, 2012). Estas líneas fueron determinadas por medio de la herramienta de Solver de Excel. Estas líneas unen la cantidad de insumos que maximizan el ingreso por cada dólar invertido en el insumo manteniendo constante el otro insumo. Para obtener estos puntos se basó en la condición de que la división del valor físico marginal de un insumo entre el costo unitario del mismo insumo debe ser igual a uno. La segunda condición es que la división del valor físico marginal del otro insumo entre el costo de este segundo insumo debe ser mayor que uno.

Presupuesto completo. El presupuesto completo se empleó para generar el margen neto que evalúa la relación entre los rendimientos y ganancias del cultivo de frijol. El presupuesto completo se realizó en la combinación optima de densidad y dosis proporcional de fertilización para un productor de frijol. Con esta herramienta se pudo generar una visión global sobre los costos que se incurren en la producción de frijol. Así mismo, el presupuesto completo incluyó los beneficios y margen bruto. A diferencia del análisis marginal que no incluía los costos totales de la producción de frijol, en el presupuesto completo sí se tomó en cuenta los costos totales de producción, obteniendo así el margen neto de la producción de frijol.

Beneficio bruto. El beneficio bruto de los 24 tratamientos se determinó con el rendimiento estimado expresado en kilogramos por hectárea de frijol multiplicado por el precio del kilogramo de frijol puesto en campo. Por otro lado, la producción total esperada de frijol es expresada en kilogramos por hectárea y estimada con la regresión.

Margen neto. El margen neto se obtuvo para establecer la rentabilidad y una comparación en rentabilidad entre ambos tratamientos inoculados con *Rhizobium* y los que no fueron inoculados. El margen neto se logró restando del beneficio bruto los costos fijos y costos variables de producción detallados en el presupuesto completo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de la investigación se clasificaron en dos partes: la parte productiva y la económica. Los resultados productivos tuvieron como objetivo evaluar las variables de densidad y dosis proporcional de fertilización con el uso de inoculante. La superficie de respuesta fue elaborada para determinar la combinación de densidad y dosis proporcional de fertilización que maximice la producción. Los análisis económicos ayudaron a determinar la combinación de densidad y dosis proporcional de fertilización utilizando inoculante que proporcione la máxima utilidad.

Resultados productivos.

Rendimientos de las densidades y dosis proporcional de fertilización. Como punto de partida se presentan los resultados del análisis de suelo (Anexo 2) realizado en la parcela experimental. Este reportó que el suelo poseía 52.8 kg/ha de nitrógeno, 494.4 kg/ha de fósforo y 1,303.2 kg/ha de potasio. El nitrógeno presente en el suelo fue adicional a las dosis proporcionales de cada tratamiento.

Los rendimientos que presentan la densidad de plantas por hectárea y dosis proporcional de fertilización al usar y no usar inoculante en la siembra se evaluaron por separado. Los rendimientos se analizaron por medio de gráficas de tipo Scatter y regresiones.

Los tratamientos con inoculante no presentan diferencia significativa en la regresión mostrada en el Anexo 3. Los tratamientos sin inoculante sí presentan diferencia significativa entre los niveles de densidad y dosis proporcional de fertilización.

En las Figuras 1–4 se muestran los rendimientos obtenidos en las combinaciones de densidad de plantas por hectárea y dosis proporcional de fertilización. Las siguientes Figuras muestran tendencias de un modo empírico con respecto al rendimiento de cada tratamiento.

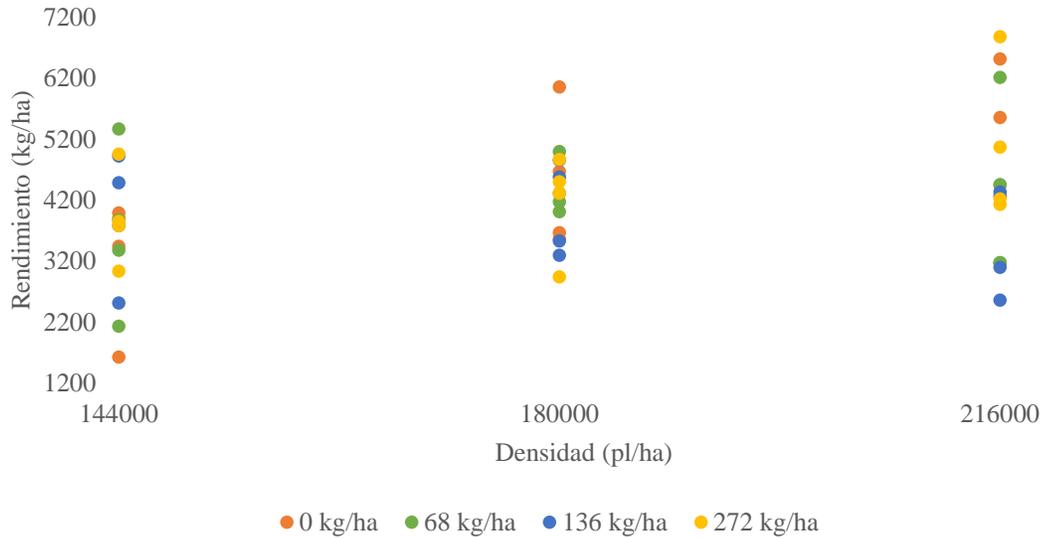


Figura 1. Rendimientos a diferentes densidades de plantas por hectárea sujeto a incrementos en la dosis proporcional de fertilización con inoculante en Zamorano, Honduras, 2018.

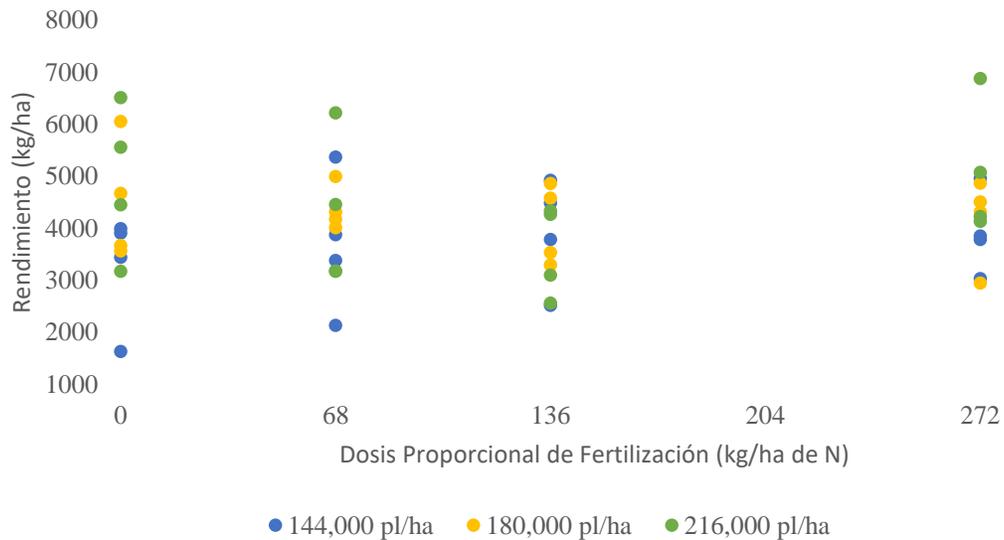


Figura 2. Rendimientos a diferentes dosis proporcionales de fertilización sujeto a incrementos en la densidad de plantas por hectárea con inoculante en Zamorano, Honduras, 2018.

Las Figuras 1 y 2 representan los tratamientos que fueron inoculados con *Rhizobium*. La Figura 1 muestra una leve tendencia de aumento decreciente en los 3 niveles de densidad. Por otro lado, en la Figura 2 no se observan tendencias claras en la dosis proporcional de fertilización. Las observaciones concuerdan con los resultados obtenidos del análisis de regresión realizado a los rendimientos de las parcelas que fueron tratadas con inoculante (Anexo 3). Estos resultados concluyen que no se observan diferencias significativas entre

las 12 combinaciones de densidad y dosis proporcional de fertilización utilizando inoculante. Finalmente, el análisis de densidad y dosis proporcional de fertilización no se continuará debido a la alta variación presente en los datos que no la hace concluyente.

Los tratamientos que no fueron inoculados presentaron puntos atípicos que ejercen una fuerte influencia sobre los coeficientes de la regresión (Cuadro 2). El diagnóstico de la regresión determinó 8 observaciones por encima del punto de corte. Las 40 observaciones restantes fueron analizadas con una regresión (Anexo 4) y se determinó que la interacción de densidad y dosis proporcional de fertilización no presenta significancia eliminándola de la función de producción.

Cuadro 2. Observaciones atípicas del rendimiento en función de densidad y dosis proporcional de fertilización sin aplicar inoculante en Zamorano, Honduras, 2018.

Rendimiento (kg/ha)	Dosis Proporcional de Fertilización (kg/ha)	Densidad (pl/ha)	 DFFIT > 0.51
5,188	0	180,000	0.66
4,724	0	216,000	0.54
2,090	68	144,000	0.53
7,626	136	216,000	1.29
2,651	136	216,000	0.69
5,696	272	144,000	0.84
2,956	272	180,000	0.72
6,336	272	216,000	0.97

La presencia de datos extremos puede llegar a alterar significativamente los resultados de los experimentos por lo mismo se debe considerar la eliminación de datos atípicos, siempre que se tengan los criterios necesarios para su eliminación (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 2017). El diagnóstico de la regresión señaló 6 observaciones que se encontraban por encima del punto de corte ($0.65 = (2 \cdot \sqrt{5/48})$). Anteriormente, se realizó una evaluación visual de las gráficas encontrando dos puntos que no estaban por encima del punto de corte, sin embargo, sí eran mayores a las otras observaciones y cercanas al punto de corte, mayor a 0.51. Finalmente, las observaciones se eliminaron por el alto “DFFIT” que presentaban.

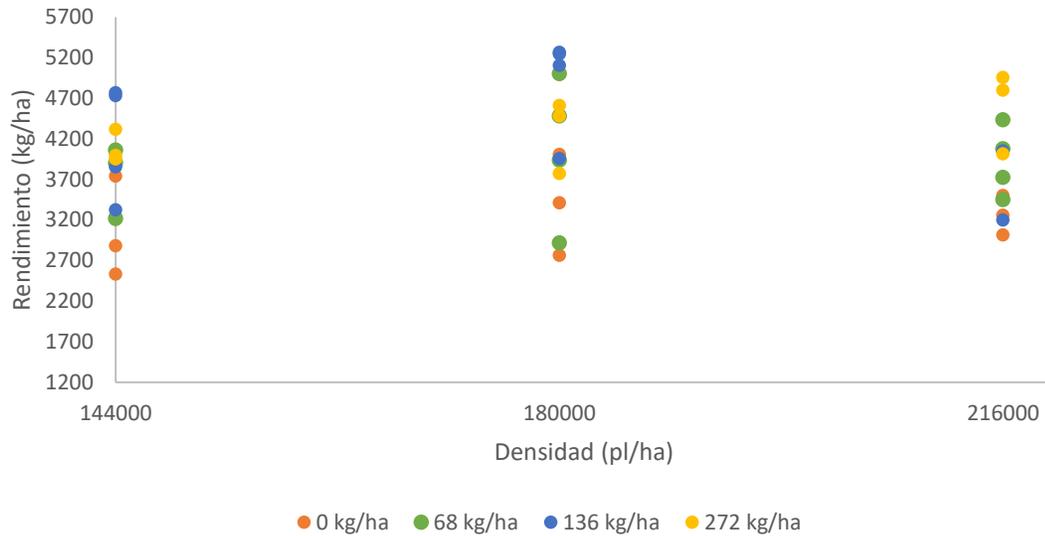


Figura 3. Rendimientos a diferentes densidades de plantas por hectárea sujeto a incrementos en la dosis proporcional de fertilización sin inoculante en Zamorano, Honduras, 2018.

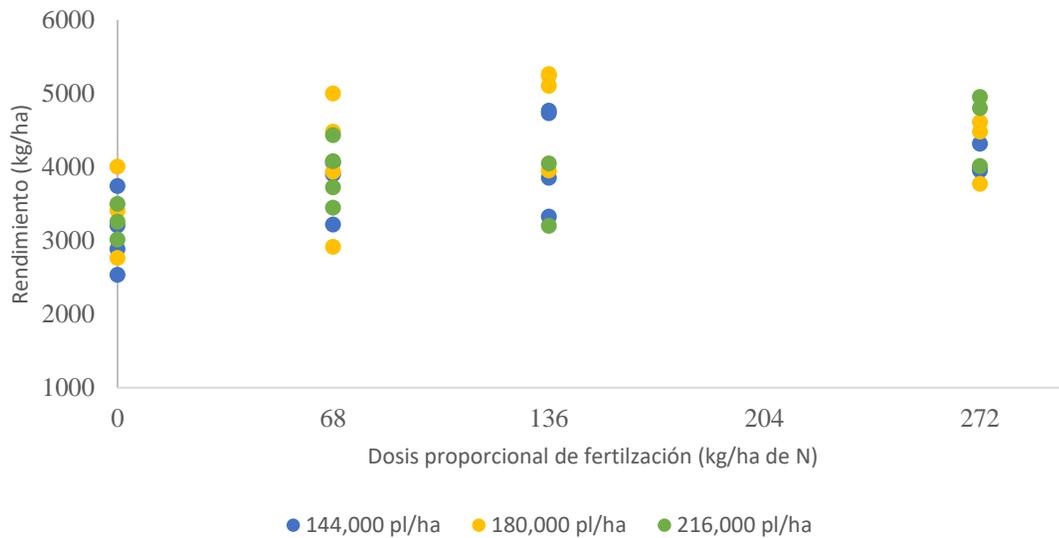


Figura 4. Rendimientos a diferentes dosis proporcionales de fertilización sujeto a incrementos en la densidad de plantas por hectárea sin inoculante en Zamorano, Honduras, 2018.

En la Figura 3 se muestran los rendimientos basados en las densidades. Estos rendimientos se puede observar un aumento y disminución a lo largo de los niveles de densidad. Este comportamiento se ve eclipsada por la gran variación presente en los rendimientos. Siendo difícil la detección de diferencias significativas.

La Figura 4 muestra rendimientos marginales decrecientes con respecto a la dosis proporcional de fertilización. Los rendimientos decrecientes se pueden observar a lo largo de todas las dosis proporcionales de fertilización.

Función de producción sin inoculante. La función de producción generó el rendimiento de frijol esperado en función de densidad de planta por hectárea y dosis proporcional de fertilización sin inoculante observada en la Ecuación 6. La función de producción excluyó la interacción de densidad y dosis proporcional de fertilización por no presentar significancia. En el Cuadro 3 se muestran los valores relacionados con el análisis de varianza de la regresión, junto con el coeficiente de determinación (R^2) del modelo. En el Cuadro 4 se observan los coeficientes de la regresión y sus estadísticos.

$$\text{Rend} = \beta_0 + \beta_1 \text{Dens} + \beta_2 \text{Dens}^2 + \beta_3 \text{Fert} + \beta_4 \text{Fert}^2 \quad [6]$$

Cuadro 3. Análisis de varianza de la regresión de rendimiento en función de densidad de plantas por hectárea y dosis proporcional de fertilización sin inoculación de *Rhizobium* por hectárea en Zamorano, Honduras. 2018.

Fuentes de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Media Cuadrática	F	Pr>F
Regresión	4	9,243,100.468	2,310,775.117	7.392	2.00E-04
Residual	35	10,941,524.500	312,614.986		
Total	39	20,184,624.968			
Observaciones	40				
R cuadrado	0.46				

Cuadro 4. Coeficientes de la regresión de rendimiento en función de densidad de plantas por hectáreas y dosis proporcional de fertilización sin inoculación de *Rhizobium* en Zamorano, Honduras. 2018.

Variables	Coeficientes	Error estándar	Estadístico T
Intercepto	-5,499.5646	4,532.438	0.2331
Fertilización	11.9939	3.170	0.0006
Fertilización ²	-0.0295	0.011	0.0102
Densidad	0.0979	0.052	0.0663
Densidad ²	-2.67E-07	1.44E-07	0.0717

La función de producción con los coeficientes de regresión se presenta en la Ecuación 7. La regresión fue analizada con una prueba White, para evaluar la existencia de heteroscedasticidad (Cuadro 5). El Chi cuadrado calculado se obtiene de la multiplicación del número de observaciones por el coeficiente de determinación de la regresión auxiliar. La regresión auxiliar contempla el cuadrado de los residuos de la regresión original, sobre las variables originales, las variables al cuadrado y la interacción de las variables (Gujarati & Porter, 2009). El cálculo del Chi cuadrado calculado y Chi cuadrado tabular se muestran en el Cuadro 7.

$$\text{Rend} = -5499.5646 + 0.0979\text{Dens} - 2.67 \times 10^{-07} \text{Dens}^2 + 11.9939\text{Fert} - 0.0295\text{Fert}^2 \quad [7]$$

Cuadro 5. Supuestos de la prueba general de heteroscedasticidad White usada en la regresión de rendimiento en kilogramos por hectárea de frijol en Zamorano, Honduras, 2018.

Prueba general de heteroscedasticidad White	
Hipótesis.	Supuestos
Ho: No hay Heteroscedasticidad.	Chi cuadrado calculado < Chi cuadrado tabular
Ha: Hay Heteroscedasticidad.	Chi cuadrado calculado > Chi cuadrado tabular

Cuadro 6. Chi cuadrado calculado y Chi cuadrado tabular de la prueba de White para heteroscedasticidad de rendimiento de frijol en kilogramos por hectárea en Zamorano, Honduras, 2018.

Fórmula	Datos	Resultado
Chi cuadrado calculado ($n \times R^2$):	(40*0.225)	9.00
Chi cuadrado tabular ($\alpha; gl$):	(.05;9)	16.91

La prueba White muestra un Chi cuadrado calculado (9.00) menor que el Chi cuadrado tabular (16.91), concluyendo que no existe heteroscedasticidad en la regresión de densidad de plantas y dosis proporcional de fertilización sin inoculante.

Superficie de respuesta. La superficie de respuesta obtenida por la función de producción de rendimiento de frijol según combinaciones de densidad de plantas por hectárea y dosis proporcional de fertilización N-P-K se muestra en la Figura 5. La función de producción junto a la superficie de respuesta logra determinar cuál es la combinación de densidad y dosis proporcional de fertilización que genera la máxima producción.

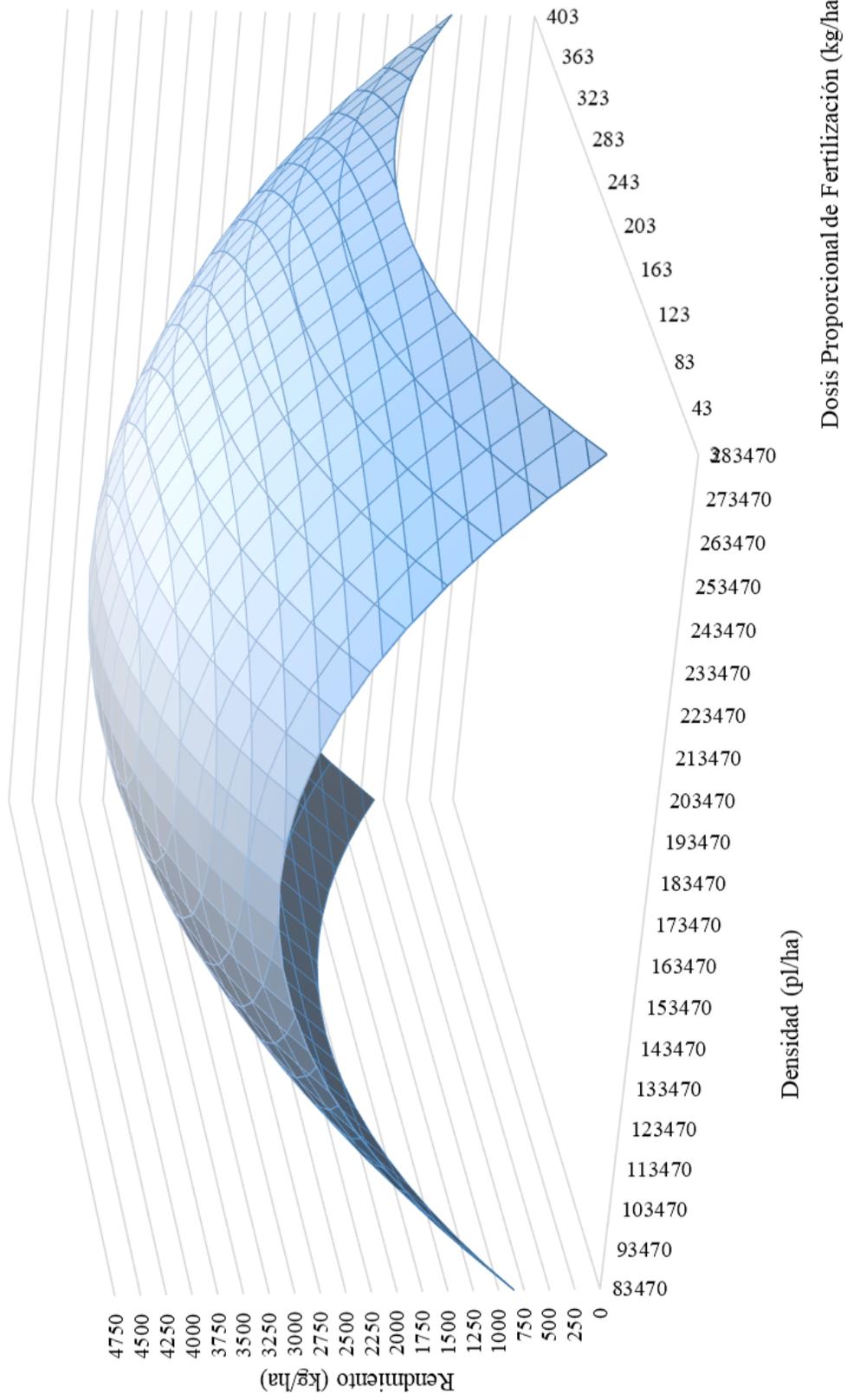


Figura 5. Superficie de respuesta de rendimientos según la función de producción de plantas por hectárea y dosis proporcional de fertilización (N-P-K) de kilogramos por hectárea de nitrógeno en Zamorano, Honduras, 2018.

La superficie de respuesta indica que existe un incremento en el rendimiento al aumentar el número de plantas por hectárea y la dosis proporcional de fertilización hasta cierto punto. Este incremento logra maximizar el rendimiento, no obstante, después de cierto punto, se empiezan a reducir los rendimientos.

Resolviendo analíticamente, y así en la Figura 5, se demuestra el punto donde se maximiza la producción siendo una densidad de 183,470 pl/ha y dosis proporcional de fertilización de 203 kg/ha de nitrógeno, 21 kg/ha de fósforo y 146 kg/ha de potasio. El comportamiento de la superficie de respuesta encontrada en este experimento es similar al estudio realizado por Portilla (2004). En este estudio se observó una tendencia a la baja en el rendimiento de frijol al aumentar la densidad por encima de 200,000 pl/ha. Esta reducción es debido a la competencia que sucede entre las plantas. Portilla (2004) observó un comportamiento similar al incrementar los niveles de fertilización nitrogenada.

La dosis proporcional de fertilización obtenida por la superficie de respuesta de 203 kg/ha de nitrógeno es proporcional con las recomendaciones de Bertsch, (2003) para obtener un rendimiento de 3 ton/ha. Por otro lado, la densidad obtenida en la superficie de respuesta de 183,470 pl/ha es el límite inferior del rango recomendado a los productores comerciales de frijol de 180,000 a 200,000 pl/ha para obtener 1.5 ton/ha aproximadamente. Estas densidades han sido estudiadas regularmente en Zamorano comprobando que se llegan a obtener los mejores rendimientos del frijol.

Las combinaciones de densidad y dosis proporcional de fertilización que maximizan la producción son atribuibles a las condiciones experimentales del estudio. Debido a esto, es necesario realizar un ensayo a nivel pre-comercial evaluando densidades y dosis proporcionales de fertilización a ese nivel.

Resultados económicos.

Análisis marginal. El análisis marginal se utilizó para determinar la combinación óptima económica de densidad y dosis proporcional de fertilización con la que se logre obtener la máxima utilidad (beneficio bruto) cuando no existe ninguna restricción presupuestaria. La combinación óptima económica obtenida puede encontrarse o no dentro de las combinaciones evaluadas en el experimento de campo.

Los costos adicionales por sembrar una planta y aplicar un kilogramo adicional de nitrógeno por hectárea son USD 0.0028 y USD 1.5119, respectivamente.

La combinación óptima de densidad y dosis proporcional de fertilización se obtiene maximizando la función de beneficio neto, que incluye el costo de una unidad adicional de cada insumo y el precio de campo del kilogramo de semilla de frijol (USD 0.8167/kg). La función de beneficio neto (Ecuación 8) ayuda a determinar el máximo retorno después de tomar en cuenta los costos de la fertilización y siembra. La función de beneficio neto se muestra a continuación.

$$BN = [0.8167 * Rend] - [0.0028Dens + 1.5119Fert] \quad [8]$$

En la función de beneficio neto se utilizó los costos adicionales de sembrar una planta y aplicar un kilogramo de fertilizante. La combinación que maximiza el retorno de la siembra y fertilización son los siguientes: para nitrógeno 172 kg/ha, fósforo 18 kg/ha y potasio 124 kg/ha y una densidad de 177,111 pl/ha. Al momento de aumentar una unidad de cualquiera de los insumos por encima de esta combinación, la utilidad se verá reducida.

Senda de expansión. La senda de expansión fue estimada para determinar la combinación de densidad y dosis proporcional de fertilización (N-P-K) dentro de la superficie de respuesta que obtenga un determinado nivel de producción a un mínimo costo. La senda de expansión es caracterizada por la Ecuación 9. Al agregar una planta adicional al tener más capital la cantidad de fertilizante deberá aumentarse en 0.0049 kg/ha para que cambie el óptimo local y alcanzará una isocuanta mayor. En el Cuadro 7 se muestra el incremento en densidad y dosis proporcional de fertilización al relajar la restricción presupuestaria y alcanzar un nivel mayor de rendimiento de frijol. La gráfica de la senda de expansión de la producción de frijol con densidades y niveles proporcionales de fertilización se representa en la Figura 6.

$$\text{Fert} = 0.0049\text{Dens} - 701.87 \quad [9]$$

Cuadro 7. Rendimientos con las combinaciones de densidad y dosis proporcional de fertilización N-P-K sujeto a diferentes limitantes presupuestarias, Zamorano, Honduras, 2018.

Limitante presupuestaria (USD)	Producción isocuanta (kg/ha)	Densidad (plantas/ha)	Nitrógeno (kg/ha)
610	4,300	163,355	104
543	4,000	156,839	72
490	3,700	151,629	46
444	3,400	147,159	24
404	3,100	143,183	5

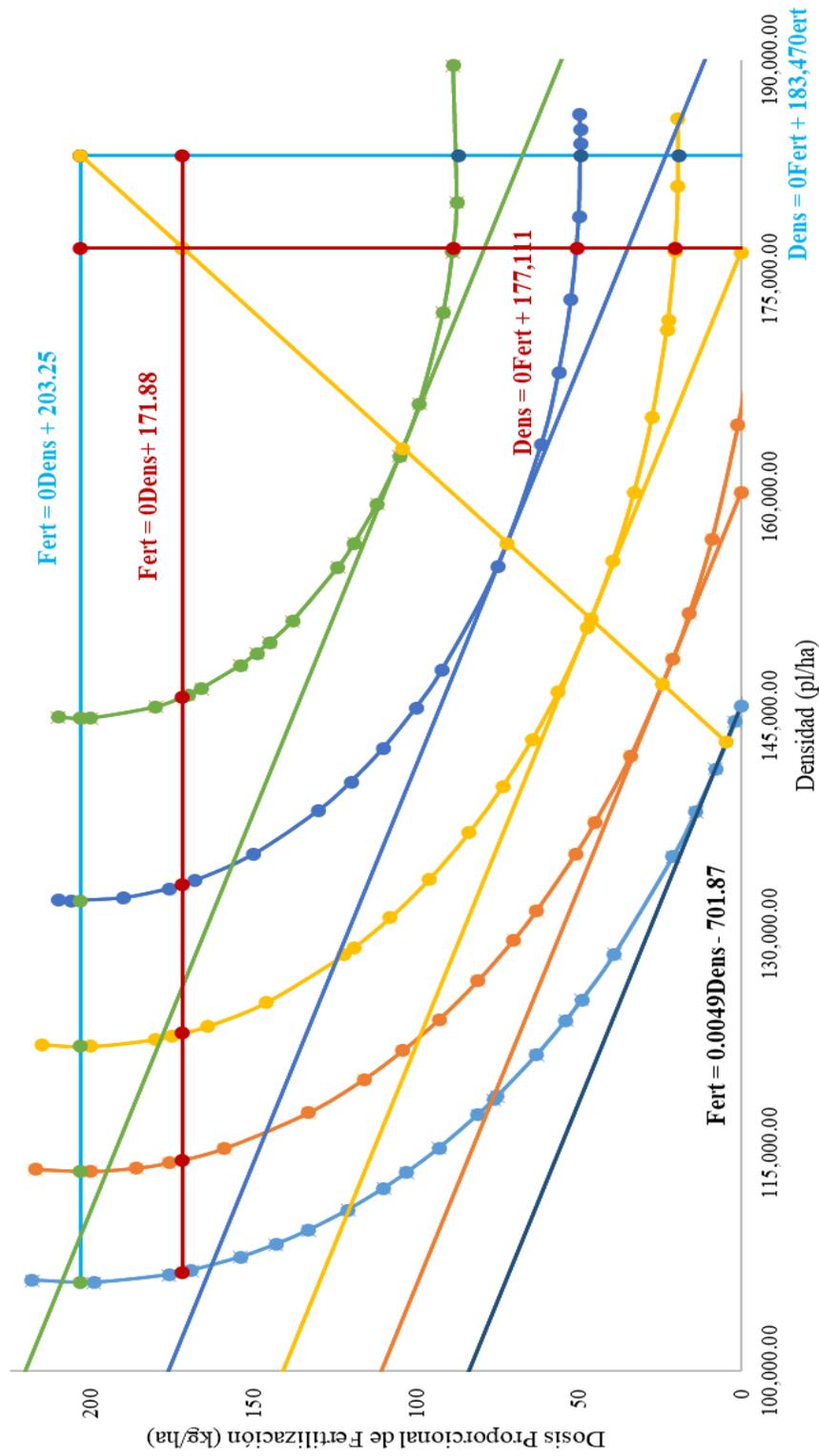


Figura 6. Isocuantas, senda de expansión, líneas de riesgo y líneas de pseudoescala para la producción de frijol variedad Amadeus 77 en Zamorano, Honduras, 2018.

Por el corte del área de visualización de la gráfica los interceptos de las líneas de pseudoescala y senda de expansión no coinciden con los puntos dados por las ecuaciones.

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 10 y 11).

$$Dens = 0Fert + 177,111 \quad [10]$$

$$Fert = 0Dens + 171.88 \quad [11]$$

Debido a que la densidad y dosis proporcional de fertilización no presenta interacción siempre se optimizará en la misma cantidad del insumo respectivo. La Ecuación 10 representa la línea de pseudoescala de la densidad de plantas por hectárea; la cantidad de 177,111 pl/ha se mantiene constante no importando la cantidad adicional de fertilización aplicado. La Ecuación 11 describe la línea de pseudoescala de la dosis proporcional de fertilización; con ella siempre se optimizará con la cantidad de 171.88 kg/ha de nitrógeno no importando que cambien la densidad de planta por hectárea.

Las combinaciones de densidad y dosis proporcional de fertilización que optimiza la producción es resultado de las condiciones experimentales en las que se realizó el experimento. En condiciones comerciales la combinación optima puede llegar a variar por el manejo y costos extras que puedan tener los productores.

Presupuesto completo. Los Cuadros 8 y 9 presentan el presupuesto completo para la producción de frijol. Se calculó el margen neto que se obtiene al producir una hectárea con la combinación óptima determinada en el análisis marginal. Se realizó el presupuesto completo para tomar en cuenta todos los costos de producción (costos variables y costos fijos) y estimar la rentabilidad. Dentro de los costos variables se incluyen: fungicidas, fertilizantes, insecticidas, herbicidas, mano de obra, riego, preparación de suelos, semilla y los gastos por imprevistos. Los costos fijos se tomaron en cuenta gastos generales de mantenimiento y gastos gerenciales.

Cuadro 8. Presupuesto completo para la producción de una hectárea de frijol variedad *Amadeus 77* en Zamorano, Honduras, 2018.

Ingresos	Unidad	Cantidad	Precio Campo (USD)	Ingresos (USD/ha)
Rendimiento	kg/ha	4,659	0.86	4,027.02
Total ingresos				4,027.02
Costos Variables (CV)	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Costo/ha
1. Preparación del suelo	Pases	2.00	100.00	200.00
2. Siembra				266.60
Semilla Amadeus 77	kg	45.00	2.75	123.56
Mano de obra	Hr-Hm	80.00	1.79	143.04
3. Fertilización				282.93
Ultra Fert	cc	1,000.00	0.004	3.95
KCl	kg	239.58	0.42	100.59
12 - 24 - 12	kg	162.50	0.44	70.90
Urea	kg	119.63	0.38	44.90
Mano de Obra	Hr-Hm	35.00	1.79	62.58
4. Herbicidas				136.66
Flex	cc	400.00	0.03	12.85
Fusilade	cc	750.00	0.03	23.99
Basagran	cc	2,000.00	0.03	64.06
Mano de obra	Hr-Hm	20.00	1.79	35.76
5. Fungicidas				93.77
Mancoceb	g	1,000.00	0.01	14.56
Nativo	g	200.00	0.16	31.97
Agri mycin	g	240.00	0.05	11.48
Mano de obra	Hr-Hm	20.00	1.79	35.76
6. Insecticidas				99.06
Lorsban	cc	400.00	0.02	6.49
Engeo	cc	250.00	0.09	21.36
Conquest	cc	250.00	0.07	18.44
Connect	cc	500.00	0.03	17.01
Mano de obra	Hr-Hm	20.00	1.79	35.76
7. Riego				409.55
Cintas de riego	m	10,000.00	0.02	159.17
Combustible	gal	99.00	1.03	101.97
Mano de obra	Hr-Hm	83.00	1.79	148.41
8. Cosecha	Hr-Hm	104.00	1.79	185.96
9. Gastos por imprevistos	%CV	0.05	1,674.54	83.73
Total Costos Variables				1,758.26

Cuadro 9. Continuación del presupuesto completo para la producción de una hectárea de frijol variedad *Amadeus 77* en Zamorano, Honduras, 2018.

Descripción	Cantidad (USD/ha)
Ingresos Totales	4,027.02
Total Costos Variables	1,758.26
Costos Fijos (CF)	
Mantenimiento general	87.91
Gastos gerenciales	100.00
Renta de terreno	156.56
Bodega almacenamiento	50.00
Total costos fijos	394.47
Costos totales	2,152.73
Margen neto	1,874.29
% Rentabilidad	87%

El presupuesto completo incluyó todos los costos variables que incurre el agricultor para producir una hectárea. El uso de riego y aplicación de los agroquímicos son los costos que representan más del 58% del total de los costos variables. Los costos variables representan el 82% del total de costos de producción de 1 ha. La producción de 1 ha genera un margen neto de USD 1,874.29. El retorno sobre la inversión se ve reflejada en el indicador financiero de rentabilidad. La rentabilidad de la producción de frijol variedad *Amadeus 77* es de 87%, esto quiere decir que, por cada dólar invertido en la producción de frijol, se recibirá USD 0.87 adicionales al dólar invertido. Esta rentabilidad es explicada por las condiciones experimentales y costos de producción del estudio.

4. CONCLUSIONES

- Las parcelas inoculadas con *Rhizobium* son muy variables y necesitan varias repeticiones para detectar los efectos de densidad y dosis proporcional de fertilización presentes en la regresión.

La superficie de respuesta del rendimiento experimental de frijol sin inoculante logra una producción máxima con la combinación de 183,470 plantas por hectárea y una dosis proporcional de fertilización de 203 kg de nitrógeno, 21 kg de fosforo y 146 kg de potasio.

- La combinación experimental óptima de densidad y dosis proporcional de fertilización sin inoculante es de 177,111 plantas por hectárea y 172 kg de nitrógeno, 18 kg de fosforo y 124 kg de potasio. Cuando se adiciona una unidad de las dos variables por encima de la combinación óptima el beneficio bruto disminuye.
- La senda de expansión experimental es representada por la fórmula:
 $Fert = 0.0049 * Dens - 701.87$. En el momento que el productor no sigue la combinación indicada en la senda de expansión, dejará de percibir la máxima producción a un costo dado.
- La combinación experimental óptima de densidad y dosis proporcional de fertilización genera un margen neto experimental alentador de USD 1,874.29 por hectárea en la producción de 4,659 kg/ha de grano frijol producido con un retorno sobre la inversión de 87%.

5. RECOMENDACIONES

- Replicar las parcelas de densidad y dosis proporcional de fertilización aplicando inoculante aumentando el número de las repeticiones.
- Realizar un nuevo estudio de dosis de proporcionales de fertilización a diferentes niveles de densidad de plantas por hectárea a nivel pre-comercial.
- Realizar un nuevo estudio con el objetivo de evaluar diferentes dosis de inoculante proporcionales a diferentes niveles de densidad de plantas por hectárea.
- Replicar el experimento con otras variedades de frijol para poder tener una amplia recomendación en densidades y dosis de fertilización con diferentes variedades.

6. LITERATURA CITADA

Anaya, A. (2017). Microeconomía intermedia. Conductas del consumidor y productor en los diferentes mercados. Colombia, Unimagdalena. 302p.

Bertsch, F. (2009). Absorción de nutrimentos por los cultivos. [multimedia] San José, Costa Rica: Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo.

Box, G., Hunter, J, y Hunter, W. (1993). Estadística para investigadores: diseño, innovación y descubrimiento. Traducido por Dr. Xavier Tomas Morer; 2da edición, Barcelona, España. Reverte. 662p.

Calvo García, S. (2011). Bacterias Simbióticas Fijadoras de Nitrógeno. España: Universidad de Salamanca.

Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. (1988). La formulación de recomendaciones a partir de datos agronómicos. México D.F.: México CIMMYT.

Debertin, D. L. (2012). Agricultural Production Economics. Second edition. Kentucky USA: Macmillan Publishing Company.

Dirección General de Investigación y Extensión Agrícola. (1991). Aspectos Técnicos sobre Cuarenta y Cinco Cultivos Agrícolas de Costa Rica. Costa Rica: Ministerio de Agricultura y Ganadería.

Doll, J., y Orazem, F. (1984). Production Economics Theory with Applications. United States of America: John Wiley & sons.

García Mendoza, E. (2009). Guía Técnica para el Cultivo de Frijol. Nicaragua: IICA-RED; SICTA-COSUDE.

Gujarati, D. y Porter, D. (2009). Econometría. Trad. Pilar Carril Villareal. México, McGraw Hill. 5ta edición. 921p.

Hernández Salido, L. (2012). Efectos del Rhizobium en el Rendimiento del Cultivo del Frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en la CCS Sabino Pupo del Municipio Manatí. Cuba: Universidad Municipal Manatí.

Instituto de Nutrición de Centro América y Panamá. (2012). Tabla de Composición de los Alimentos de Centroamérica. 3ra edición Guatemala: INCAP/OPS. 128p.

Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. (2017). Análisis Básico de Precios Agrícolas para la Toma de Decisiones. San José: IICA.

Naciones Unidas. (mayo de 2016). Alimentación. Obtenido de <http://www.un.org/es/sections/issues-depth/food/index.html>.

Paladines Cueva, D. J. (2017). Evaluación de la respuesta del frijol común a la inoculación con *Rhizobium* y Micorriza Vesículo-Arbuscular. Tesis Ing. Agr., Honduras: Escuela Agrícola Panamericana Zamorano. 26p. Disponible en biblioteca Wilson Popenoe.

Perez Canto, D. J. y Pimentel Gonzalez, J. L. (2014). Efecto de cuatro densidades poblacionales y tres espaciamientos entre hileras en el rendimiento del frijol Amadeus 77. Tesis Ing. Agr., Honduras: Escuela Agrícola Panamericana Zamorano. 22p. Disponible en biblioteca Wilson Popenoe.

Portilla Campoverde, D. (2004). Respuesta de tres variedades de frijol a tres poblaciones y dos niveles de nitrógeno. Tesis Ing. Agro., Honduras: Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. 32p. Disponible en biblioteca Wilson Popenoe.

Rosas, J. C., y Escoto, D. (2002). Amadeus 77. Tegucigalpa, Honduras: Escuela Agrícola Panamericana Zamorano y Dirección de Ciencia y Tecnología Agropecuaria/Secretaría de Agricultura y Ganadería (DICTA/SAAG). Boletín técnico ilustrado, Imprenta Litocom, Tegucigalpa, Honduras, 12p. Disponible en <http://www.dicta.hn/files/2002-Amadeus-77-g.pdf>.

Sandoval Carranco, C. A. (2002). Determinación del efecto de tres densidades y tres niveles de nitrógeno sobre dos variedades de frijoles. Tesis Ing. Agro., Honduras: Escuela Agrícola Panamericana Zamorano. 47p. Disponible en biblioteca Wilson Popenoe.

Unidad de Planeamiento y Evaluación de Gestión (UPEG). (2015). Análisis de Coyuntura del Cultivo de Frijol en Honduras. Honduras: Secretaría de Agricultura y Ganadería.

7. ANEXOS

Anexo 1. Distribución de los 24 tratamientos de densidad de número de plantas por hectárea y dosis proporcional de fertilización aplicando y no aplicando inoculante en el experimento de campo en Zamorano, Honduras, 2018.

		4 mt	4 mt	4mt	4mt	▶			
1 mt por parcela		24	17	48	13	72	10	96	5
		23	6	47	23	71	11	95	12
		22	7	46	20	70	20	94	11
		21	5	45	19	69	13	93	17
		20	12	44	24	68	6	92	21
		19	8	43	4	67	2	91	1
		18	13	42	8	66	22	90	4
		17	9	41	1	65	12	89	23
		16	24	40	11	64	14	88	8
		15	14	39	6	63	1	87	24
		14	20	38	16	62	7	86	19
		13	2	37	22	61	9	85	16
		12	11	36	3	60	23	84	20
		11	21	35	7	59	3	83	3
		10	19	34	14	58	18	82	22
		9	1	33	18	57	24	81	18
		8	16	32	9	56	4	80	7
		7	23	31	15	55	21	79	6
		6	22	30	12	54	5	78	13
		5	10	29	21	53	16	77	9
		4	15	28	10	52	8	76	15
		3	3	27	2	51	19	75	2
		2	18	26	5	50	17	74	10
		1	4	25	17	49	15	73	14

Anexo 2. Resultado de análisis de suelos de las unidades experimentales evaluadas en Zamorano, Honduras, 2018.



LABORATORIO DE SUELOS ZAMORANO
INFORME DE RESULTADOS DE ANÁLISIS DE SUELOS

Sistema de Gestión de Calidad ISO 17025

LSZ-F126-1
VERSIÓN V03

Solicitante	Fecha Ingreso Muestra	Fecha Envío Informe	Procedencia de la muestra	Página
Módulo Granos Semillas	2018-01-31	2018-02-12	EAP, Zamorano	1 de 1
Dirección del cliente	N° Lote de Análisis	Cultivo	Informe N°	Anexo Recomendación
Eap, Zamorano	2018-04	--	2018-024	
			Si:	No: x

	Bajo
	Medio
	Alto

Código Interno Lab.	Muestra	pH (H ₂ O)	g/100g		mg/kg (extractable)					
			C.O.	M.O.	N total	P	K	Ca	Mg	Na
18-5-0161	Suelo/Trévis	6.09	1.289801	2.22	0.11	206	548	1848	144	28
Rango Medio			2.00	4.00	0.20	13	0.50	30	Por: Saturación de bases	

Métodos: K, Ca, Mg, Na: Solución extractora Mehlich 3, determinados por espectrofotometría de absorción atómica. P: Solución extractora Mehlich 3, determinado por colorimetría. % Carbono Orgánico: Método de Walkley & Black para suelos minerales no salinos con incertidumbre de ±0.04 (C.O. = 58% de MO) % N total: 5% de M.O. pH: 1:1 en agua: AOAC 994.16 rango de 4.00-7.00 con incertidumbre de ±0.10.

El laboratorio no se hace responsable por el estado de la muestra al ingresar a nuestras instalaciones. Los resultados se relacionan solo con las muestras recibidas. El laboratorio se exonera de responsabilidad por reproducción parcial o total del informe, o el uso que pueda darsele. El lote de análisis remite la fecha de ejecución de análisis. Se utiliza como como separador decimal según el sistema internacional de Unidades



Responsable del análisis: E. Aguilar Vo.Bo.: AGA
Ing. Eunice Aguilera Núñez
Dra. Gloria Arriola de Gauggel
Directora Unidad de Suelos

E-mail: laboratoriosuelos@zamorano.edu, Tel: [504] 2287-2000 ext. 2316 Fax: [504] 2287-6242 Cel: 9969-6846
Laboratorio de Suelos, Departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria Apartado Postal # 93 Tegucigalpa-Honduras. Km 30 Carret. Dami

Anexo 3. Regresión de los tratamientos de densidad de plantas por hectárea y dosis proporcional de fertilización aplicando inoculante en el experimento de campo en Zamorano, Honduras, 2018.

SUMMARY OUTPUT

<i>Regression Statistics</i>	
Multiple R	0.351680932
R Square	0.123679478
Adjusted R Square	0.019355606
Standard Error	1069.295156
Observations	48

ANOVA					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	5	6777650.186	1355530.037	1.185533817	0.332534194
Residual	42	48022469.5	1143392.131		
Total	47	54800119.68			

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95.0%</i>	<i>Upper 95.0%</i>
Intercept	-2875.497696	8105.647455	-0.354752376	0.72455029	-19233.35651	13482.36112	-19233.35651	13482.36112
Fert	-1.729023317	10.89952327	-0.158632931	0.874718406	-23.72515179	20.26710516	-23.72515179	20.26710516
Fert2	0.020529334	0.018827681	1.090380362	0.28176199	-0.017466465	0.058525133	-0.017466465	0.058525133
Densi	0.06780949	0.091308457	0.742641943	0.461832094	-0.116458436	0.252077416	-0.116458436	0.252077416
Densi2	-1.52524E-07	2.52626E-07	-0.603754799	0.549253919	-6.62344E-07	3.57296E-07	-6.62344E-07	3.57296E-07
Fert*Densi	-1.92046E-05	5.2208E-05	-0.367847113	0.714834602	-0.000124565	8.61555E-05	-0.000124565	8.61555E-05

Anexo 4. Regresión de los tratamientos de densidad de plantas por hectárea y dosis proporcional de fertilización sin aplicar inoculante en el experimento de campo en Zamorano, Honduras, 2018.

SUMMARY OUTPUT

<i>Regression Statistics</i>	
Multiple R	0.678909527
R Square	0.460918146
Adjusted R Square	0.381641403
Standard Error	565.7157115
Observations	40

ANOVA					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	5	9303459.918	1860691.984	5.81403987	0.000553689
Residual	34	10881165.05	320034.2662		
Total	39	20184624.97			

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95.0%</i>	<i>Upper 95.0%</i>
Intercept	-5230.135977	4627.681351	-1.130184985	0.26630841	-14634.71599	4174.444039	-14634.71599	4174.444039
Fert	9.67442942	6.229774563	1.552934111	0.129698825	-2.98599573	22.33485457	-2.98599573	22.33485457
Fert2	-0.029823837	0.011013325	-2.707977617	0.010517904	-0.052205606	-0.007442068	-0.052205606	-0.007442068
Densi	0.096345202	0.052371584	1.839646508	0.074565107	-0.010086663	0.202777067	-0.010086663	0.202777067
Densi2	-2.66686E-07	1.45297E-07	-1.835449345	0.075199111	-5.61965E-07	2.85938E-08	-5.61965E-07	2.85938E-08
Fert*Densi	1.34649E-05	3.10049E-05	0.434284567	0.666825503	-4.95445E-05	7.64744E-05	-4.95445E-05	7.64744E-05