

**Evaluación productiva y económica de cuatro
densidades de maíz híbrido (P4082WHR[®])
bajo cuatro dosis proporcionales de
fertilización N-P-K en Zamorano, Honduras**

Engel Joao Benavidez Vargas

**Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Honduras**

Noviembre, 2017

ZAMORANO
CARRERA DE ADMINISTRACIÓN DE AGRONEGOCIOS

**Evaluación productiva y económica de cuatro
densidades de maíz híbrido (P4082WHR®)
bajo cuatro dosis proporcionales de
fertilización N-P-K 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

Engel Joao Benavidez Vargas

Zamorano, Honduras

Evaluación productiva y económica de cuatro densidades de maíz híbrido (P4082WHR[®]) bajo cuatro dosis proporcionales de fertilización N-P-K en Zamorano, Honduras

Engel Joao Benavidez Vargas

Resumen. El maíz es el cultivo con mayor superficie sembrada en Honduras. Para el año 2014, representó el 19.1% del producto interno bruto agrícola de Honduras; alrededor del 5.7% del producto interno bruto del país. Esta investigación se generó a partir de la necesidad de determinar la respuesta de diferentes combinaciones de fertilización (N-P-K) y densidad de plantas en el rendimiento de maíz, para finalmente brindar a los agricultores recomendaciones que maximicen ganancias. El objetivo del estudio fue evaluar las combinaciones de densidad y dosis proporcional de fertilización (nitrógeno-fósforo-potasio) en condiciones experimentales para determinar los niveles de densidad y fertilización a evaluar en un ensayo pre-comercial posterior para identificar la combinación óptima comercial. Los tratamientos consistieron en combinar cuatro dosis proporcionales de fertilización N-P-K, con base a la dosis que recomienda la literatura para obtener 5 toneladas de maíz por hectárea (125 kg N, 25 kg P y 95 kg K), y cuatro densidades de plantas por hectárea (50 k, 76 k, 101 k y 126 k). Los tratamientos fueron evaluados productivamente mediante una superficie de respuesta y económicamente mediante la metodología de análisis marginal. La investigación determinó que los niveles para un posterior ensayo pre-comercial para densidad son de 62, 72, 82, 92 y 102 mil plantas por hectárea y para el caso de dosis proporcional de fertilización son 100, 155, 210 y 265 kilogramos por hectárea.

Palabras clave: Análisis marginal, senda de expansión, superficie de respuesta.

Abstract. Maize is the crop with the largest sown area in Honduras. By 2014, maize represented 19.1% of Honduras' agricultural gross domestic product; around 5.7% of the total gross domestic product of the country. This research was generated by the need to determine the yield response of different plant densities and N-P-K proportional fertilizer dose combinations in order to finally provide sound economic recommendations to maximize profits for maize producers. The main objective of this research was to evaluate the plant densities and N-P-K proportional fertilizer dose combinations under experimental conditions to determine the plant density and fertilizer dose levels to evaluate a subsequent pre-commercial experiment design and identify the commercial optimal combination. The treatments consisted of the combination of four N-P-K proportional fertilizer doses according to what Floria Bersh recommends for a yield of five tons of corn per hectare (125 kg N, 25 kg P y 95 kg K) and four plant densities per hectare (50 k, 76 k, 101 k y 126 k). The treatments evaluated productivity using the surface response methodology and evaluates economic optimums using marginal analyses. The research determined the density and fertilizer levels for a subsequent pre-commercial experiment to be 62, 72, 82, 92 y 102 thousand plants per hectare, and 100, 155, 210 y 265 kilograms of nitrogen per hectare, respectively.

Key words: Marginal analysis, expansion path, response surface methodology.

CONTENIDO

Portadilla.....	i
Página de firmas	ii
Resumen	iii
Contenido	iv
Índice de Cuadros, Figuras y Anexos.....	v
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. METODOLOGÍA.....	3
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	11
4. CONCLUSIONES	26
5. RECOMENDACIONES	27
6. LITERATURA CITADA.....	28
7. ANEXOS	30

ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadros	Página
1. Descripción de tratamientos (TRT) de combinaciones de proporción de dosis de fertilización y densidad de plantas en Zamorano, Honduras, 2017.....	5
2. Análisis de varianza de la regresión de rendimiento sobre las combinaciones de proporción de dosis de fertilización y densidad por hectárea del experimento de campo en Zamorano, Honduras, 2017.	13
3. Coeficientes de la regresión para la estimación de la función de producción de maíz con densidad y dosis proporcional de fertilización N-P-K en Zamorano, Honduras, 2017.	13
4. Estimación de costos de producción para un mediano productor (MP) y un gran productor (GP) de maíz híbrido en Zamorano, Honduras 2017.....	18
5. Producciones máximas posibles y combinaciones de insumos para medianos productores (MP) sujeto a diferentes limitantes presupuestarias, Honduras, 2017.....	19
6. Producciones máximas posibles y combinaciones de insumos para grandes productores (GP) sujeto a diferentes limitantes presupuestarias, Honduras, 2017.....	19
7. Presupuesto completo para un ciclo de producción de maíz híbrido para un mediano productor (MP) para una hectárea sembrada en Zamorano, Honduras 2017.....	23
8. Presupuesto completo para un ciclo de producción de maíz híbrido para un gran productor (GP) para una hectárea sembrada en Zamorano, Honduras 2017.....	24
Figuras	
1. Plano de interacción para densidad sujeto a incrementos en la dosis proporcional de fertilización N-P-K del experimento de campo en Zamorano, Honduras, 2017.	11
2. Plano de interacción para fertilización según incremento en la densidad de plantas por hectárea del experimento de campo en Zamorano, Honduras, 2017.....	12
3. Superficie de respuesta de rendimientos experimentales según la función de producción obtenida con el análisis de los datos del experimento de campo, Honduras, 2017.	15

4. Punto de máximo rendimiento posible en la superficie de respuesta de rendimientos experimentales, Honduras, 2017.	16
5. Senda de expansión en condiciones experimentales para medianos productores de maíz híbrido en Zamorano, Honduras 2017.	20
6. Senda de expansión en condiciones experimentales para grandes productores de maíz híbrido en Zamorano, Honduras 2017.	21

Anexos	Página
--------	--------

1. Informe de resultados de análisis de suelos de las unidades experimentales evaluadas en Zamorano, Honduras, 2017.....	30
2. Distribución de los 16 tratamientos de proporción de dosis de fertilización y densidad de plantas/ha en el experimento de campo en Zamorano, Honduras, 2017.....	31
3. Michigan Annual Extension Bulletin of the growing season, Michigan, 2016.	32

1. INTRODUCCIÓN

La producción de maíz a nivel mundial según el Consejo Internacional de Cereales (2017) se estima en más de 1,065 millones de toneladas métricas (t) por año. Esta producción está dividida en dos grupos, el maíz blanco que es destinado a la alimentación humana, y el maíz amarillo que se destina a la alimentación animal y supera 3 veces la producción de maíz blanco. Centroamérica para el año 2014 reportó un rendimiento promedio de 1.55 t por hectárea (t/ha). La mayor productividad de maíz se registró en El Salvador con 2.93 t/ha y la menor la presentó Nicaragua y Honduras con 1.4 y 1.53 t/ha respectivamente (CIMMYT, 2015).

En Honduras, el maíz representa el cultivo de mayor superficie sembrada con 338,000 hectáreas. En los campos hondureños se produce mayor cantidad de maíz blanco y alrededor del 5% del área se destina a la producción de maíz amarillo. La producción oscila alrededor de 586,000 t de maíz que, para una demanda promedio de 959,000 t, se importan alrededor de 373,000 t. La producción de maíz en Honduras tiene una estacionalidad muy marcada debido al aprovechamiento por los agricultores del agua en la temporada de lluvias, donde el 79% de la cosecha se obtiene de octubre a diciembre. Esta estacionalidad contribuye directamente a que el precio de campo del maíz tenga grandes variaciones durante el año. Los precios inferiores se observan entre noviembre y diciembre para la época de mayor volumen de cosecha y los precios más altos se aprecian entre junio y agosto donde existe escasez de producto y se tiende a importar maíz (USD A, 2015) (CEPAL, 2016).

Yang et al. (2017) concluyeron después de varios experimentos y años de experiencia en el rubro que el aumento en la densidad de plantas y el uso de fertilizantes nitrogenados en los últimos 10 años han sido considerados como las principales estrategias prácticas para mejorar la producción de maíz. Existen investigaciones acerca del efecto en el rendimiento de maíz por el cambio en la densidad de siembra y cantidad de fertilizante individualmente manteniendo uno de los dos factores constante (Franzen, Sharma, Bu, & Denton, 2016). Por otro lado, también se ha evaluado la interacción de ambos factores, donde se ha llegado a la conclusión de que una alta densidad restringe la absorción de nutrientes y directamente disminuye la producción (Yan, Pan, Zhang, & Chen, 2017). A nivel centroamericano se han desarrollado investigaciones que evalúan el cambio de densidades de siembra y dosis de fertilización. Cuzzy (1989) valoró económicamente la respuesta de la aplicación de diferentes niveles de fertilización nitrogenada y fosforada, y determinó que a niveles bajos de fósforo se necesita aplicar menores niveles de nitrógeno para alcanzar un máximo. Soto expone que el incremento de los niveles de fertilización nitrogenada en maíz disminuye la eficiencia del nitrógeno a medida que son aumentadas las dosis aplicadas (SciELO, 2002).

Martínez (2004) adicionalmente evaluó el efecto de 3 densidades de siembra y 4 niveles de fertilización nitrogenada y concluyó que la densidad y fertilización individualmente si tienen un efecto significativo sobre el híbrido evaluado.

La producción de maíz, en resumen, conlleva uno de los temas más investigados de la agricultura. No obstante, a pesar de todas las investigaciones realizadas en Centroamérica que miden el efecto de densidad de siembra y fertilización, no se ha medido la compensación entre un cambio proporcional de la dosis de fertilización N-P-K por un cambio en la densidad de siembra. Adicionalmente, todas estas investigaciones en la región centroamericana no se han traducido a recomendaciones para que los productores maximicen ganancias.

Esta investigación aplica a investigadores y casas comerciales de semillas de maíz que desean evaluar algún material híbrido, especialmente si se siembra durante la temporada de lluvias, a una altitud de 800 msnm, con temperaturas promedio de 23°Celsius y una precipitación anual promedio de 1,100 mm. El estudio brinda una recomendación económica base, identificando la combinación óptima productiva y económica en condiciones experimentales de distintas densidades de siembra de maíz híbrido y cierta dosis proporcional de fertilización de nitrógeno, fósforo y potasio.

Este estudio tiene como objetivo general evaluar las combinaciones de densidad y dosis proporcional de fertilización (nitrógeno-fósforo-potasio) en condiciones experimentales para determinar los niveles de densidad y fertilización a evaluar en un ensayo pre-comercial posterior para identificar la combinación óptima comercial. Los objetivos específicos son:

- Evaluar la superficie de respuesta de rendimiento a diferentes dosis proporcionales de fertilización y densidad de siembra.
- Evaluar las combinaciones de densidad y dosis proporcional de fertilizante N-P-K en condiciones experimentales para encontrar los óptimos económicos bases sujetos a restricciones presupuestarias para medianos y grandes productores de maíz híbrido.
- Establecer una base para la relación de rendimiento y ganancias en maíz entre ensayos experimentales y ensayos pre-comerciales posteriores.
- Establecer un rango específico de densidad y dosis proporcional de fertilización para una posterior evaluación de la combinación óptima en un ensayo pre-comercial.

2. METODOLOGÍA

La evaluación de las combinaciones de dosis proporcional de fertilización N-P-K y densidad de plantas del híbrido de maíz P4082WHR® consistió de dos partes, un análisis productivo y uno económico. El análisis utilizado para la evaluación productiva fue una superficie de respuesta de rendimientos experimentales, y 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 beneficio bruto. Se utilizó un presupuesto completo en la combinación óptima para un mediano y gran productor de maíz híbrido con el fin de establecer una base para la relación de rendimiento y ganancias en maíz entre ensayos experimentales y pre-comerciales. Adicionalmente se determinó el rango específico de densidad y dosis proporcional de fertilización basado en los resultados obtenidos para una posterior evaluación de la combinación óptima productiva y económica en un ensayo pre-comercial.

Metodología de superficie de respuesta (MSR).

La superficie de respuesta estimada para identificar la combinación óptima productiva en condiciones experimentales requirió de un experimento de campo, donde los rendimientos obtenidos en la cosecha fueron estandarizados 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 fertilización y densidad.

La superficie de respuesta es un método que asemeja un relieve geográfico donde el punto de mayor elevación es el punto donde se maximiza, en este caso, el rendimiento de maíz en grano. 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.” El propósito inicial de esta técnica es diseñar un experimento que proporcione valores razonables de la variable respuesta y posteriormente determinar el modelo matemático que mejor se ajusta a los datos obtenidos para establecer los valores de los factores que optimizan el valor de la variable respuesta (Box, Hunter, & Hunter, 1993).

La superficie de respuesta de rendimientos experimentales se determinó con una función de producción de un modelo cuadrático porque lo que se busca en esta investigación es encontrar la combinación que genera el valor máximo, para esta parte, el máximo rendimiento experimental de maíz posible. Esta función de producción utilizó los coeficientes de regresión asociados al modelo cuadrático, los cuales se obtuvieron del rendimiento de maíz de cada combinación de dosis proporcional de fertilizante N-P-K y densidad del experimento de campo que se detalla más adelante.

La función de producción utilizó los coeficientes de regresión estimados con los rendimientos obtenidos de la cosecha de cada unidad correspondiente a un tratamiento en el experimento de campo que se detalla más adelante.

La superficie de respuesta de rendimientos experimentales se graficó con la herramienta de XLSTAT de Excel (versión 2016). Adicionalmente a través del paquete estadístico de Minitab (versión 13.0) se graficó la cumbre de la superficie, específicamente se aprecia la combinación con la cual se obtiene el máximo rendimiento.

Establecimiento del experimento de campo. El experimento se estableció en lotes de Santa Inés pertenecientes a la unidad de Producción de Granos y Semillas de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, ubicado en Valle de Yeguaré, a 32 km de Tegucigalpa carretera hacia Danlí, Honduras. La locación se encuentra a 800 msnm, presentó temperaturas promedio de 22.8°C y una precipitación promedio anual de 1,154 mm.

Con fines de la investigación, se estableció un diseño experimental bifactorial de densidades de plantas y dosis proporcional de fertilización (N-P-K), con cuatro repeticiones a través de bloques completos al azar (Anexo 2). El experimento fue un factorial completo, en el que se tomó en cuenta las combinaciones entre todos los niveles evaluados, y se utilizó el diseño de bloques completos como una medida para reducir y controlar el error experimental para tener mayor precisión en los datos obtenidos en la cosecha. El criterio de bloqueo fue la cercanía de cada tratamiento en cada bloque. Las unidades experimentales fueron parcelas de 16 m², y se contó con 64 unidades experimentales.

El experimento de campo se inició en el mes de mayo y se terminó en el mes de septiembre del año 2017 a los 120 días después de siembra cuando la planta alcanzó el estado fenológico R6 (madurez fisiológica). El híbrido seleccionado para este estudio fue el P4082WHR de la casa comercial de Pioneer. El híbrido seleccionado es un híbrido triple de alto rendimiento y tolerancia a la sequía, que se caracteriza por tener tallos y raíces fuertes, y granos grandes, profundos y de alta calidad. Por sus características es un híbrido comercial muy usado por los agricultores en Honduras.

Los suelos del experimento fueron analizados mediante una muestra representativa en el Laboratorio de Suelos de Zamorano con el fin de conocer el contenido nutricional base con el que cuenta el suelo donde se ejecutó el experimento (Anexo 1). Para cada unidad experimental se levantaron cuatro camas donde el arreglo de siembra fue a una distancia entre hilera de 0.8 m y la distancia entre planta fue controlada trasplantando plántulas para asegurar la densidad inicial deseada. El distanciamiento entre hilera fue justificado dado que es la medida que recomienda la literatura para poder ejecutar las prácticas agronómicas sin maltratar las plantas, permitiendo una penetración adecuada de luz a cada planta, especialmente en densidades altas (Madonni, Ortgui, Gonzalez, & Cirilos, 1997).

Con el objetivo de eliminar el error experimental debido a sesgo en la absorción de nutrientes se controló la presencia de malezas. Durante el desarrollo del experimento de campo se registró la aplicación de agroquímicos, riego, y mano de obra utilizada para la siembra y aplicación de fertilizante. La aplicación de agroquímicos y riego fue constante para todos los tratamientos y fueron incluidos en el presupuesto completo que se detalla

más adelante. Los datos de mano de obra obtenidos se basaron en los tiempos de siembra, las dosis de fertilización aplicadas y la cosecha de cada unidad experimental por separado.

Combinaciones de fertilización y densidad. Las combinaciones de proporción de dosis de fertilización y densidad de plantas (Cuadro 1) consistieron en establecer cambios proporcionales sobre una base de densidad y fertilización. Las bases fueron la usual densidad de siembra en Honduras de 76 k plantas/ha y una base de fertilización de 25 kg de nitrógeno, 5 kg de fósforo y 19 kg de potasio para obtener en teoría cinco toneladas en rendimiento según Floria Bersch (1994). Los cambios proporcionales en densidad fueron de 33% menos, y 33% y 66% más sobre la base. Para el caso del fertilizante los cambios mantuvieron la proporción entre los 3 elementos de la base, disminuyendo 40%, y aumentando 33% y 64%. No obstante, para determinar la regresión se utilizó el nitrógeno total, el cual no es más que la suma del nitrógeno aplicado más el disponible en el suelo.

Cuadro 1. Descripción de tratamientos (TRT) de combinaciones de dosis proporcional de fertilización adicional al contenido del suelo y densidad de plantas en Zamorano, Honduras, 2017.

TRT	Densidad (plantas/ha)	Dosis adicional de Fertilización (kg/ha)		
		N	P	K
1	50,000	75	15.0	57.0
2	50,000	125	25.0	95.0
3	50,000	166	33.2	126.3
4	50,000	207	41.5	157.7
5	76,000	75	15.0	57.0
6	76,000	125	25.0	95.0
7	76,000	166	33.2	126.3
8	76,000	207	41.5	157.7
9	101,000	75	15.0	57.0
10	101,000	125	25.0	95.0
11	101,000	166	33.2	126.3
12	101,000	207	41.5	157.7
13	126,000	75	15.0	57.0
14	126,000	125	25.0	95.0
15	126,000	166	33.2	126.3
16	126,000	207	41.5	157.7

La combinación de dosis proporcional corresponde a la cantidad de nitrógeno aplicado, donde la cantidad de fósforo y potasio corresponde al 20% y 76% de la cantidad de nitrógeno, respectivamente. La cantidad fósforo y potasio están expresadas en kilogramos de elemento puro requerido y no en óxidos del elemento.

Cosecha y rendimientos experimentales. La cosecha se realizó a los 120 días después de la siembra, cuando la planta terminó su proceso fisiológico de translocación de nutrientes

para el llenado de las mazorcas. Al momento de esta actividad se evitó cosechar las orillas de cada unidad experimental para eliminar el efecto borde en el rendimiento.

La cosecha sirvió para determinar la variable respuesta la cual fue rendimientos de maíz expresados en kilogramos por hectárea estandarizados al 13% de humedad. Para determinar la variable respuesta, al momento de la cosecha se contó el número de plantas cosechadas, se recolectó las mazorcas de 16 plantas en cada tratamiento, y fueron desgranadas y pesadas. Adicionalmente las muestras de cada tratamiento fueron analizadas para determinar el porcentaje de humedad que tuvieron y así estandarizar el peso al 13% de humedad. Se calculó el peso de los granos por planta y se multiplicó por la densidad final del experimento para determinar el rendimiento. Los datos de rendimiento fueron corregidos por el porcentaje de acame presente en cada unidad experimental.

Función de producción. La función de producción fue la base para determinar la superficie de respuesta para la evaluación productiva. La variable dependiente fue rendimiento estandarizado al 13% de humedad expresado en kilogramos por hectárea. Las variables independientes fueron densidad y dosis proporcional de fertilización basada en dosis de nitrógeno, expresadas en plantas por hectárea y kilogramos por hectárea respectivamente.

El programa “Statistical Analysis System” (SAS Versión 9.3®) y la herramienta de Regresión de Análisis de Datos de Excel fueron utilizadas para analizar los rendimientos experimentales obtenidos de los 16 tratamientos. Estas herramientas determinaron 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 ($Pr < 0.05$). Para la función de producción experimental se utilizó un modelo cuadrático (Ecuación 1) el cual se muestra a continuación:

$$Y^{\circ} = \beta_0 + \beta_1(\text{Dens}) + \beta_2(\text{Dens})^2 + \beta_3(\text{Fert}) + \beta_4(\text{Fert})^2 + \beta_5(\text{Dens} * \text{Fert}) \quad [1]$$

donde:

Y° : función de producción, indicando el rendimiento experimental de maíz en kilogramos por hectárea en función de la densidad y fertilización.

Dens: densidad en plantas por hectárea.

Fert: dosis proporcional de fertilización basada en dosis de nitrógeno en kilogramos por hectárea.

Se analizó la regresión con la prueba de White para examinar si hay heterocedasticidad. La prueba de White trabajó bajo el supuesto que si el Chi cuadrado calculado es menor que el Chi cuadrado tabular no hay heteroscedasticidad. Esta prueba ayuda a comprobar si la utilización de esta forma funcional es correcta y a apoyar que no se está omitiendo variables relevantes en este modelo.

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 densidad y fertilización 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 cuadrática, se calculó el punto máximo de producción, donde para el caso de esta investigación, cualquier otra combinación resulta en un rendimiento menor.

Experimento pre-comercial. El experimento pre-comercial es definido como un ensayo experimental de gran magnitud. En el caso de ensayos pre-comerciales de maíz las unidades experimentales se expanden hasta 50 veces el tamaño de una unidad en un ensayo experimental, donde se busca ajustar la respuesta de un ensayo experimental a la respuesta que pueden obtener agricultores en lotes extensivos comerciales. El experimento pre-comercial utiliza necesariamente un ensayo experimental previo para centralizar el foco de evaluación en el rango específico que denotó los mejores rendimientos posibles.

El rango específico para un experimento pre-comercial se definió para densidad y fertilización. Para densidad, el rango se definió utilizando el máximo global de producción determinado en esta investigación y como límite inferior una densidad baja en lotes comerciales de productores de maíz de la zona. Para el caso de fertilizante, se utilizó lo que recomienda la literatura para producir cinco y ocho toneladas de maíz para definir el límite inferior y superior respectivamente. Los nuevos niveles trabajarán de forma en que se aprecie un poco el crecimiento y disminución de la curva de rendimiento. Adicionalmente, se busca ajustar los intervalos según el comportamiento que se mostró en las unidades experimentales del experimento de campo.

Análisis marginal.

El análisis marginal determinó la combinación que maximiza el retorno después de siembra, fertilización y cosecha para un mediano y gran productor de maíz híbrido en condiciones experimentales. Este análisis utilizó la superficie de respuesta de rendimientos experimentales, el precio de campo de maíz y los costos asociados a fertilización y densidad mediante una función de margen bruto. Esta función identifica la combinación que genera el mayor retorno posible a los demás costos después de siembra, fertilización y cosecha. El precio que se utilizó en esta evaluación fue el precio de campo que tiene el kilogramo de maíz y el costo de producción de cada tratamiento fue determinado como el costo unitario promedio de densidad y fertilizante por la cantidad de cada factor más la mano de obra promedio utilizada. 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, el suministro de más fertilizante y más plantas por hectárea se ve relacionado 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 promedio unitario de fertilización N-P-K y densidad. Con esta información se utilizó la herramienta Solver de Excel para encontrar la combinación de densidad y dosis proporcional de fertilización que sujeta a la función de margen bruto generó los mayores retornos posibles a los demás costos para el caso del mediano y gran productor de maíz híbrido, independientemente que esta combinación óptima económica no se encuentre en las evaluadas en el experimento de campo.

Perfil de agricultores. El perfil del mediano productor de maíz comprende para este estudio una disponibilidad de 10 hectáreas y utiliza mano de obra para cumplir todas sus actividades. El perfil del productor grande de maíz comprende una disponibilidad de 50 hectáreas y utiliza mecanización para la siembra y cosecha.

Precio de campo. El precio que se utilizó en esta evaluación fue el precio de venta de la carga de maíz en grano (90 kg) de la unidad de Producción de Granos y Semillas de Zamorano. El precio de venta no incluye gastos de transporte debido a que los clientes recogen el producto en la unidad y por lo general se encuentra ligeramente por debajo del precio que establece el reporte diario del SIMPAH (Sistema de Información de Mercados de Productos Agrícolas de Honduras) de precios de venta al por mayor de granos básicos.

Costo de producción. El costo de producción utilizado en este estudio fue el costo unitario promedio para densidad y dosis proporcional de fertilización. El costo de densidad fue calculado por el precio de las semillas más el costo en que se incurre al sembrarlas y posteriormente en cosechar la densidad final, dividido para el total de plantas cosechadas para obtener el costo promedio unitario. En el caso de la fertilización el costo estuvo asociado a la dosis de nitrógeno, para esto, se utilizó el precio unitario en sí de los fertilizantes (Urea, DAP y KCl) más el costo de mano de obra promedio de aplicar esa cantidad de fertilizante dividido para el total de kilogramos de nitrógeno utilizado. Los costos de fertilización y densidad fueron estimados para el caso del mediano y gran productor de maíz de la misma forma, la diferenciación fue el descuento del 20% en precios de insumos que percibe el gran productor y la utilización de maquinaria en las actividades de siembra y cosecha.

El precio de los insumos que se utilizó fue el más bajo cotizado, el cual lo presentó la compañía de CADELGA para el caso de fertilizantes y DUWEST quien es un distribuidor de Dupont Pioneer para el caso de las semillas. 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 dosis proporcional de fertilización N-P-K y densidad de plantas por hectárea que maximice el retorno sin incluir los demás costos de producción, los cuales sí se evalúan en el presupuesto completo. El retorno se obtuvo de una simple resta de los ingresos totales menos los costos atribuibles a densidad y fertilización promedios. El modelo de la función de margen bruto (Ecuación 2) se aprecia a continuación:

$$MB = [P^{\circ} * (Y^{\circ})] - [C^{\circ}_{Dens}(Dens) + C^{\circ}_{Fert}(Fert)] \quad [2]$$

donde:

MB: el retorno posible después de la siembra, fertilización y cosecha a los demás costos por el rendimiento experimental de maíz en función de la densidad y fertilización.

Y[°]: función de producción, indicando el rendimiento experimental de maíz en kilogramos por hectárea.

Dens: densidad (plantas por hectárea).

Fert: dosis proporcional de fertilización N-P-K basada en dosis de nitrógeno (kilogramos por hectárea).

C°_{Dens} : costo unitario promedio unitario de una planta de maíz.

C°_{Fert} : costo unitario promedio de un kilogramo de dosis proporcional N-P-K de fertilización basada en dosis de nitrógeno.

Senda de Expansión. La senda de expansión fue estimada para determinar las combinaciones que en la superficie de respuesta de rendimiento experimental minimicen el costo de obtener determinado nivel de producción. Conjuntamente a la senda de expansión, se determinó las líneas de pseudoescala también 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 para el agricultor.

Un nivel de producción puede ser obtenido por diferentes combinaciones de dosis proporcional de fertilización y densidad de plantas. Este conjunto de combinaciones que generan, para este caso el mismo rendimiento de maíz, se les denominan isocuantas. Las isocuantas fueron utilizadas junto con las limitantes presupuestarias para determinar la combinación que minimiza el costo de obtener ese mismo nivel de producción. Esta combinación fue determinada a través de la tasa marginal de sustitución que no es más que el cambio en recursos que mantienen un mismo nivel de producción, es decir, cuanto debo ceder de un recurso para adquirir una unidad adicional de otro y mantener el rendimiento constante. El punto óptimo para cada nivel de producción fue la combinación donde la pendiente de la limitante presupuestaria es igual a la pendiente de la isocuanta. La unión de estos puntos a través de los niveles de producción es denominada “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 maíz, 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 fertilización y densidad, por medio de las limitantes presupuestarias (Policonomics, 2006) (Debertin, 2012).

Las isocuantas fueron determinadas mediante la función Goal Seek de Excel, donde se encontraron las distintas combinaciones que generan el mismo nivel de producción. Las isocuantas fueron establecidas para cada restricción presupuestaria. Las restricciones presupuestarias fueron establecidas para cada nivel de producción y el óptimo económico local se encuentra en el punto en que se intercepta con la limitante presupuestaria. Los puntos óptimos económicos locales para cada nivel de producción utilizaron la razón de los precios y la tasa marginal de sustitución. La razón de los precios fue determinada mediante una simple división del costo promedio unitario de densidad por el costo promedio unitario de fertilización. Este resultado se igualó a la tasa marginal de sustitución para encontrar la combinación que minimiza el costo de ese nivel de producción.

Líneas de pseudoescala. Las líneas de pseudoescala delimitan el espacio geométrico donde puede producir el agricultor 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. Esta condición manifiesta que el valor físico marginal de un factor entre el valor unitario del mismo factor debe ser igual a uno, independientemente que la misma condición para el otro factor no sea igual. No obstante, el valor del otro factor sí debe ser mayor a uno.

Presupuesto completo.

Los beneficios netos fueron evaluados para establecer una base para la relación de rendimientos y ganancias entre ensayos experimentales y pre-comerciales posteriores. La evaluación utilizó un presupuesto completo en la combinación óptima para un mediano y gran productor de maíz híbrido utilizando adicionalmente los ingresos y el beneficio bruto.

El presupuesto completo es una herramienta que se utilizó en esta investigación con el objetivo de generar una óptica global de la combinación óptimas para el mediano y gran productor de maíz. Adicionalmente, el presupuesto completo incluyó los ingresos y beneficio bruto.

En el análisis marginal se evaluó la combinación que maximiza el retorno después de sembrar, fertilizar y cosechar para cada productor, mientras que en este análisis se tomaron ambas combinaciones y se evaluarán con la variable de margen neto, es decir, incluyendo todos los costos asociados al nivel de producción.

Ingresos. El ingreso de cada tratamiento se determinó con el rendimiento experimental total de kilogramos de maíz por el precio de campo del maíz. La producción total de kilogramos de maíz por hectárea se calculó con una función de producción dependiente de densidad y dosis proporcional de fertilización.

Margen neto El margen neto fue utilizado para establecer una base de comparación para posteriores experimentos pre-comerciales. Los beneficios brutos se obtuvieron por la simple resta de los ingresos menos los costos variables y costos fijos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de la investigación se aprecian en dos fases: el análisis productivo y el análisis económico. El análisis productivo se utilizó para evaluar las variables de dosis proporcional de fertilización y densidad en condiciones experimentales, y posteriormente determinar la regresión de rendimiento para identificar la combinación que maximiza producción. El análisis económico se utilizó para determinar la combinación que genera el máximo retorno posible a los demás costos después de la siembra, fertilización y cosecha. Esta combinación se evaluó sujeto y no sujeto a limitantes presupuestarias como base de comparación para rendimientos y ganancias en experimentos pre-comerciales posteriores.

Resultados productivos.

Los suelos del experimento se caracterizaron por ser francos arcillosos con 36% arena, 26% limo y 38% arcilla (Anexo1). La cantidad de nitrógeno que aportó el suelo fue de 14.4 kilogramos por hectárea y esto fue adicional a la cantidad especificada para cada tratamiento.

Interacción de factores. La interacción entre los factores de densidad y dosis proporcional de fertilización evaluados independientemente, se muestra en las figuras 1 y 2. La interacción de los factores generó una óptica intuitiva del comportamiento general de las combinaciones de dosis proporcional de fertilización y densidad.

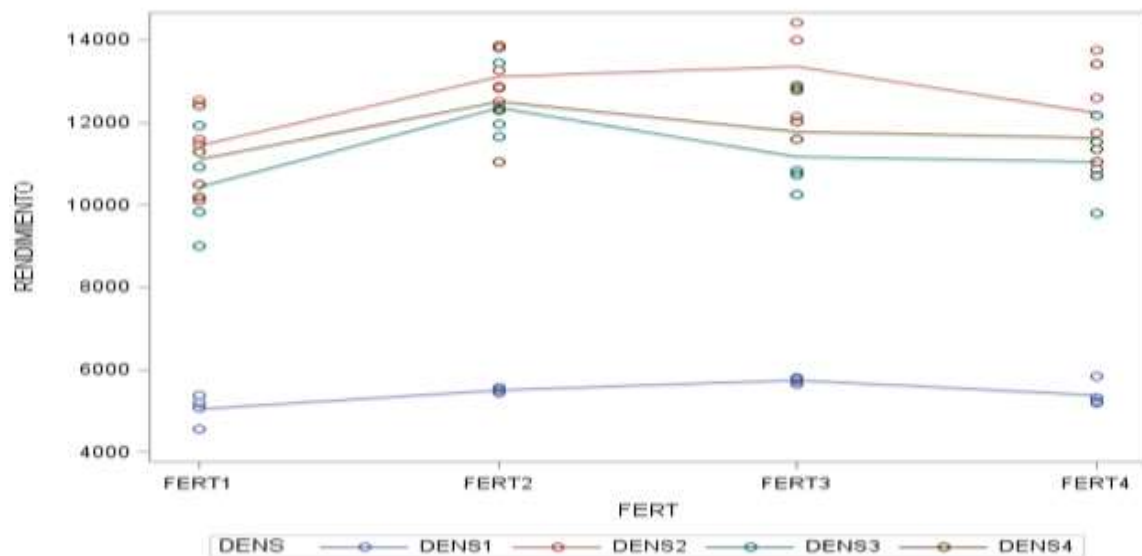


Figura 1. Plano de interacción para densidad sujeto a incrementos en la dosis proporcional de fertilización N-P-K del experimento de campo en Zamorano, Honduras, 2017.

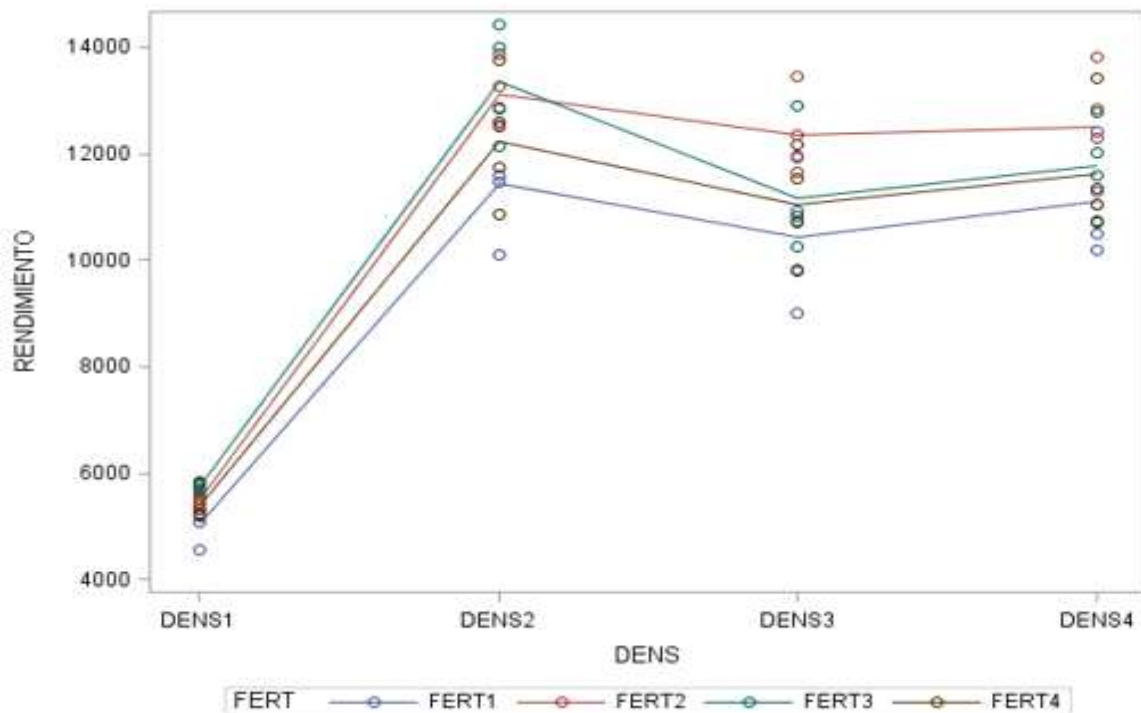


Figura 2. Plano de interacción para fertilización según incremento en la densidad de plantas por hectárea del experimento de campo en Zamorano, Honduras, 2017.

En la Figura 1 se aprecia que la tendencia de rendimiento dentro de cada densidad tiende a aumentar al incrementar la fertilización hasta cierto punto. Para las densidades de 50,000 y 76,000 plantas por hectárea el rendimiento aumentó hasta la tercera fertilización que corresponde a la aplicación de 166 kg de nitrógeno, 33 kg de fósforo y 126 kg de potasio, y a partir de ese punto presentó una tendencia a la baja. Las densidades de 101,000 y 126,000 plantas por hectárea sólo denotaron crecimiento hasta la segunda fertilización correspondiente a la aplicación de 125 kg de nitrógeno, 25 kg de fósforo y 95 kg de potasio, posteriormente se aprecia una disminución en rendimiento al aplicar más fertilizante. Este efecto en las altas densidades puede ser atribuible a que en esos niveles se requiere más fertilizante.

La Figura 2 expresa la respuesta en rendimientos de las dosis proporcionales de fertilización al aumentar densidades del experimento de campo. Para las cuatro dosis proporcionales de fertilización, la densidad que mostró los más altos rendimientos fue de la segunda densidad correspondiente a 76,000 plantas/ha. A partir de la segunda densidad se aprecia un decrecimiento marginal en el rendimiento a medida que se aumenta el número de plantas por hectárea.

La tendencia de los rendimientos del factor de densidad, es parcialmente atribuible al factor de acame observado en las unidades experimentales al momento de la cosecha. El acame en las parcelas con mayor densidad llegó a mostrar hasta un 20% de acame. No obstante, fue interesante notar que, en las parcelas con altas densidades y alta dosis de fertilización

el porcentaje de acame fue menor que en las parcelas con la misma densidad y menor dosis de fertilización.

Función de producción. Los parámetros de la función de producción determinan el rendimiento de maíz esperado en condiciones experimentales por la combinación de cierta cantidad de dosis proporcional de fertilización, con base a la cantidad de nitrógeno aplicado, y la densidad de planta por hectárea utilizada. Los parámetros fueron estimados mediante la regresión de rendimiento (Ecuación 1), en el Cuadro 3 se muestra el análisis de varianza de la regresión y el coeficiente de determinación (R^2) del modelo, adicionalmente los coeficientes de la regresión se muestran en el cuadro 4.

Cuadro 2. Análisis de varianza de la regresión de rendimiento sobre las combinaciones de proporción de dosis de fertilización y densidad por hectárea del experimento de campo en Zamorano, Honduras, 2017.

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	Pr> F
Regresión	5.00	436,693,399	87,338,680	37.6437	5.25059E-17
Residual	58.00	134,568,103	2,320,140		
Total	63.00	571,261,503			
Observaciones	64.00				
R^2	0.76				

Cuadro 3. Coeficientes de la regresión para la estimación de la función de producción de maíz sobre la densidad y dosis proporcional de fertilización N-P-K en Zamorano, Honduras, 2017.

Variabes	Coeficientes	Error estándar	P-value
Intercepto	-19,382.131080000	3,573.5850	1.188E-06
Densidad	0.524348894	0.0573	7.384E-13
Densidad ²	-2.61227E-06	0.0000	1.287E-11
Fertilización	75.814929210	32.3687	0.0226231
Fertilización ²	-0.231138284	0.0971	0.0206291
Densidad*Fertilización	9.56832E-06	0.0001	0.9466386

El análisis de varianza de la regresión junto con el coeficiente de determinación indicó que las variables utilizadas explican el rendimiento experimental que se obtiene de determinado nivel de densidad de plantas y dosis proporcional de fertilización. El coeficiente de determinación (R^2) es alto considerando que la regresión se realizó con 64 observaciones. En comparación con otras investigaciones como la de Sabasi et al. (2015), quienes realizaron una investigación en intensificación de fertilización, podemos resaltar que este modelo tiene un alto poder de predecir lo que realmente pasó en el experimento de campo.

La función de producción con los parámetros estimados es presentada a continuación (Ecuación 3):

$$\text{Rendimiento} = -19382 + 0.52(\text{Dens}) - 0.0000026(\text{Dens})^2 + 75.8(\text{Fert}) - 0.23(\text{Fert})^2 + 0.0000096(\text{Dens} * \text{Fert}) \quad [3]$$

La regresión fue analizada con una prueba de White para examinar si existe heterocedasticidad. La prueba de White trabajó bajo el supuesto que si el Chi cuadrado calculado es menor al Chi cuadrado tabular no hay heterocedasticidad.

Ho: No hay heterocedasticidad.

Ha: Hay heterocedasticidad.

Chi2 (calc): N*R²: 48.9240

Chi2 (tab): 79.0820

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 3 muestra la superficie de respuesta que se obtuvo de la función de producción de rendimiento experimental de maíz según combinaciones de dosis proporcional de fertilización N-P-K y densidad. La función de producción permite trabajar la superficie de respuesta para determinar la combinación que me genera el máximo rendimiento posible (Figura 4); 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 mayor a 0.7 y el valor F es alto.

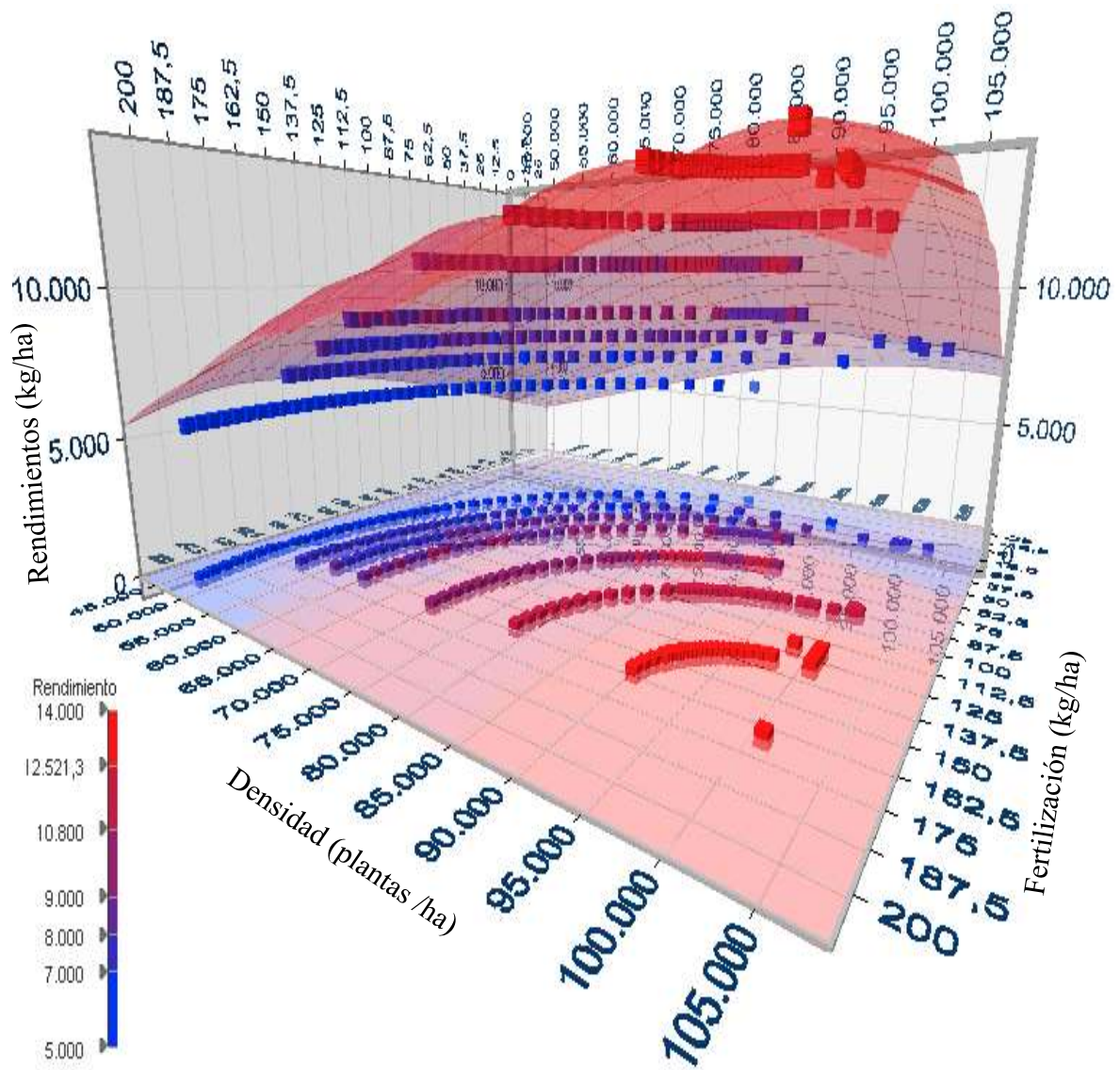


Figura 3. Superficie de respuesta de rendimientos experimentales según la función de producción obtenida con la regresión de densidad y fertilización graficada mediante XLSTAT-Excel, Honduras, 2017.

En la superficie de respuesta se aprecia que a medida que aumenta la dosis proporcional de fertilización y la densidad aumentan los rendimientos obtenidos hasta cierto punto donde después comienza a decrecer. Este punto exacto es detallado más adelante como el punto de máxima producción de la superficie (Figura 4). Aún no se han reportado investigaciones que evalúen el cambio proporcional de fertilización N-P-K para contrastar los datos de la investigación, no obstante, si responden a un comportamiento normal de cambio en la dosis de nitrógeno. Adicionalmente, la diferencia con los datos de campo de otras investigaciones es que estos cambios en fertilización respetan la ley del mínimo.

Al aumentar la densidad de plantas aumentan los rendimientos obtenidos hasta cierto punto. Este efecto se compara con el obtenido por Yan et al. (2017) donde una alta densidad

restringió la absorción de nitrógeno y así disminuyó la producción. En el caso de aumentar la proporción de dosis de fertilización y densidad conjuntamente, tienen un efecto marginal positivo. Adicionalmente la interacción indicó que existe un cambio más que proporcional a los coeficientes de regresión de cada factor cuando aumentamos una planta o un kilogramo de fertilizante. Este efecto se contrasta con el descrito en la investigación de Martínez (2004). Los rendimientos de Martínez son más bajos que los de esta investigación. Esto es atribuible a que el experimento de esta investigación trabajó con un ensayo experimental y Martínez con un ensayo pre-comercial. Los rendimientos experimentales del experimento de campo son comparables con el promedio reportados por el “Variety Trial Results” por el departamento de fitotecnia de las universidades estatales estadounidenses de Dakota del Norte y de Michigan. Estos rendimientos experimentales básicamente son los rendimientos potenciales que posee el híbrido en sí.

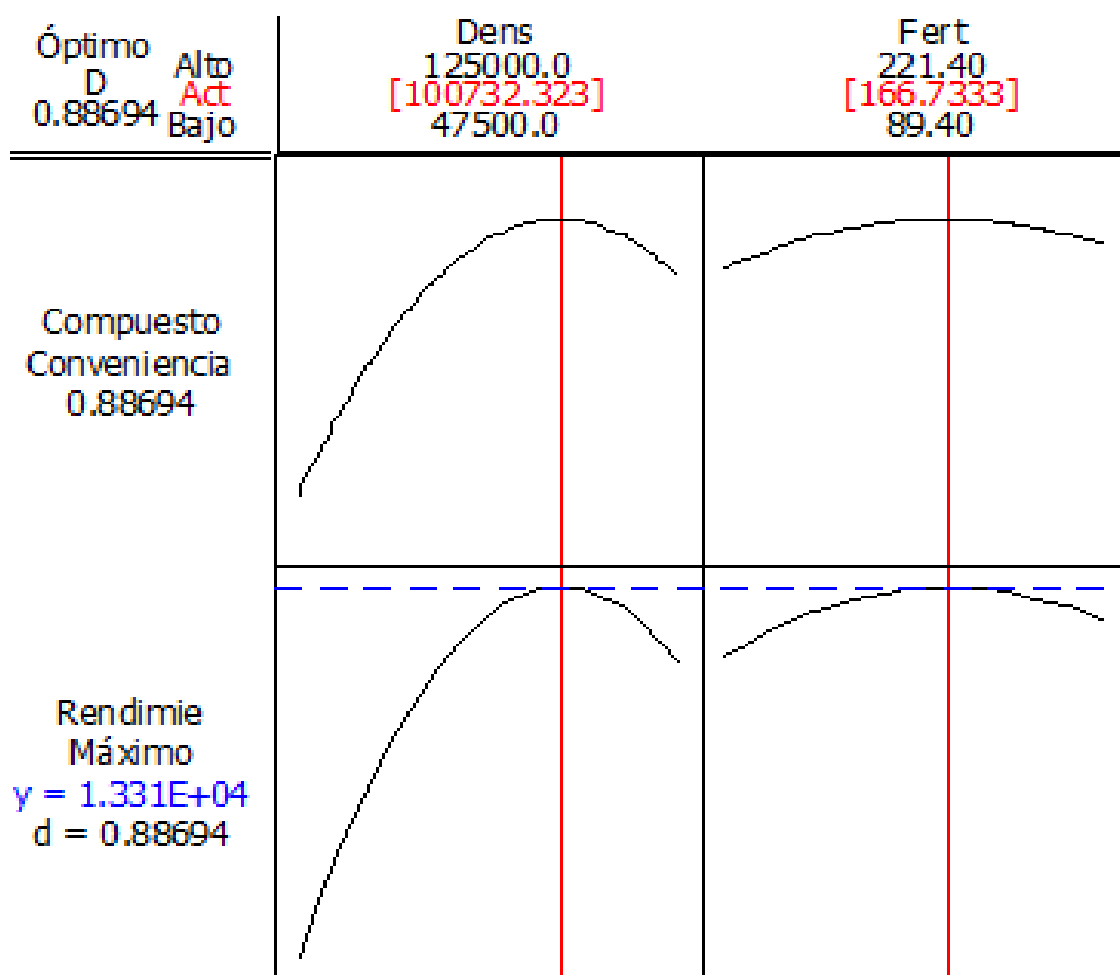


Figura 4. Punto de máximo rendimiento posible en la superficie de respuesta de rendimientos experimentales graficado mediante el software Minitab (versión 13.0), Honduras, 2017.

La Figura 4 muestra separadamente las cantidades de densidad y dosis proporcional de fertilización que en combinación genera el máximo rendimiento en la superficie de respuesta de rendimiento experimental. Esta combinación indicó el óptimo productivo. La combinación de dosis proporcional de fertilización y densidad de siembra que obtiene el mayor rendimiento posible es de 166.7 kilogramos de nitrógeno, 127 kilogramos de fósforo y 119.9 kilogramos de potasio con una densidad de 100,732 plantas por hectárea. En el caso de la densidad, se puede contrastar con lo que recomienda la casa comercial de Pioneer en Honduras que es de 80,000 plantas por hectárea. El cambio a 100,732 puede ser atribuible al manejo del diseño experimental, por lo que se debe desarrollar un ensayo pre-comercial enfocando el rango de densidades.

Experimento pre-comercial. El rango de densidad deberá tomar como límite superior 102,000 plantas por hectárea, un poco más de la densidad óptima productiva determinada en esta investigación y utilizar como límite inferior 62,000 plantas por hectárea, correspondiente a una densidad baja que utilizan productores de la zona. Para el caso de fertilizante se utilizó lo que recomienda la literatura para producir cinco y ocho toneladas de maíz para determinar el límite inferior y superior, respectivamente. El límite inferior es de 100 kg por hectárea y el superior de fertilización es de 264 kilogramos de dosis proporcional de fertilización basado en cantidad de nitrógeno.

Los niveles para un posterior experimento pre-comercial son para el caso de densidad de 62, 72, 82, 92 y 102 mil plantas por hectárea y los niveles de dosis proporcional de fertilización N-P-K basada en la cantidad de nitrógeno son de 100, 155, 210 y 265 kilogramos de nitrógeno por hectárea y su correspondiente proporción de fosforo y potasio. En un posterior experimento pre-comercial se trabajará con estos niveles para apreciar un poco el crecimiento y disminución de la curva de rendimiento. Adicionalmente, se busca reducir los intervalos; para densidad se redujo el intervalo de 25,000 a 10,000 plantas por hectárea. Para el caso de fertilización, se aumentó el intervalo debido a que en el ensayo experimental se percibió que en las densidades más altas pueden requerir mayor cantidad de nutrientes para expresar su potencial.

Resultados económicos.

Análisis marginal. El máximo retorno posible a los demás costos después de la siembra, fertilización y cosecha fue determinado para el caso de un mediano y un gran productor de maíz híbrido utilizando la metodología de análisis marginal. El análisis marginal se utilizó para identificar cuál es exactamente la combinación de insumos que brinda el máximo retorno posible a los demás costos cuando no hay ninguna restricción presupuestaria. La combinación óptima económica fue determinada independiente que dicha combinación se encuentre o no en las evaluadas en el experimento de campo.

Los costos unitarios de densidad y fertilización para cada tipo de productor de maíz fueron estimados (Cuadro 6) y adicionalmente se determinó el promedio para trabajar la función de margen bruto que se detalla más adelante.

Cuadro 4. Estimación de costos para los factores de la función de producción para un mediano productor (MP) y un gran productor (GP) de maíz híbrido en Zamorano, Honduras 2017.

TRT	Costo de densidad MP (USD/planta)	Costo de densidad GP (USD/planta)	Costo de fertilización MP (USD/kg)	Costo de fertilización GP (USD/kg)
1	0.0092	0.0055	2.1544	2.0085
2	0.0089	0.0059	1.5279	1.3824
3	0.0090	0.0054	1.2801	1.1341
4	0.0089	0.0053	1.1228	0.9765
5	0.0079	0.0051	2.1544	2.0085
6	0.0078	0.0056	1.5279	1.3824
7	0.0078	0.0051	1.2801	1.1341
8	0.0077	0.0049	1.1228	0.9765
9	0.0077	0.0050	2.1544	2.0085
10	0.0076	0.0054	1.5279	1.3824
11	0.0075	0.0049	1.2801	1.1341
12	0.0075	0.0046	1.1228	0.9765
13	0.0073	0.0051	2.1544	2.0085
14	0.0074	0.0053	1.5279	1.3824
15	0.0075	0.0048	1.2801	1.1341
16	0.0074	0.0047	1.1228	0.9765
Promedio	0.0080	0.0052	1.5213	1.3754

Los costos unitarios de densidad y fertilización determinados en el Cuadro 6 resultaron ser más bajos para el gran productor que para el mediano. Esta diferencia en los costos que aplica al costo promedio unitario determinado se debe básicamente a los descuentos por volumen que percibe el gran productor. El costo promedio unitario de densidad es más alto en USD 0.0040 por planta y USD 0.1459 por kilogramo de dosis proporcional de fertilización para un mediano productor de maíz con respecto a un gran productor.

La estimación de máximo retorno a los demás costos después de siembra, fertilización y cosecha utilizó la superficie de respuesta junto con los costos de insumos y el precio de campo del maíz de USD 0.3/kg para determinar la función de margen bruto. La función de margen bruto (Ecuación 4) determinó la combinación que máxima el retorno a los demás costos después de la siembra, fertilización y cosecha para un mediano y gran productor de maíz. La expresión de la función de margen bruto se muestra a continuación:

$$MB = [USD0.3 * (Y^o)] - [C^o_{Dens}(Dens) + C^o_{Fert}(Fert)] \quad [4]$$

La función de margen bruto utilizó los costos promedios de un mediano y gran productor de maíz para densidad y fertilización calculados en el Cuadro 6. La combinación que maximiza el retorno a los demás costos después de siembra, fertilización y cosecha para un mediano productor es de 155 kg de nitrógeno, 31 kg de fósforo y 115 kg de potasio con una densidad de 95,527 plantas por hectárea. Para el caso del gran productor de maíz, la

combinación que generó el máximo retorno posible a los demás costos después de la siembra, fertilización y cosecha fue de 156 kg de nitrógeno, 31 kg de fósforo y 119 kg de potasio con una densidad de 97,328 plantas por hectárea. A partir de estas combinaciones para cada caso, al agregar un dólar de insumos, el rendimiento cambia, y el dólar invertido en esa unidad adicional genera menos de un dólar de retorno. El costo menor de insumos que obtiene un gran productor de maíz es lo que provoca que se utilice una mayor cantidad de insumos en relación a un mediano productor.

Senda de expansión. La senda de expansión de producción para un mediano y un gran productor de maíz trabajaron bajo el modelo que se aprecia en las ecuaciones 5 y 6, respectivamente:

$$\text{Fert} = 0.0022(\text{Dens}) - 53.038 \quad [5]$$

$$\text{Fert} = 0.003(\text{Dens}) - 138.11 \quad [6]$$

Las ecuaciones 5 y 6 buscan la dosis proporcional de fertilización que minimiza el costo de determinado nivel de producción sujeto a una densidad específica. Al aumentar una planta adicional la dosis de fertilización aumenta en 0.002 y 0.003 kg para el caso del mediano y gran productor de maíz respectivamente. Esto se muestra de manera más clara en las figuras 5 y 6. La diferencia entre las ecuaciones del senda de expansión fueron basadas en la diferencia de costos entre un mediano y gran productor de maíz. Los gráficos del senda de expansión para un mediano y gran productor de maíz utilizaron la información que se detalla a continuación en los cuadros 7 y 8:

Cuadro 5. Producciones máximas posibles con las combinaciones de densidad y dosis proporcional de fertilización N-P-K basadas en cantidad de nitrógeno para medianos productores (MP) sujeto a diferentes limitantes presupuestarias, Honduras, 2017.

Limitante presupuestaria (USD)	Producción isocuanta (kg/ha)	Densidad (plantas/ha)	Nitrógeno (kg/ha)
585	6,500	57,700	73
666	7,500	60,982	80
757	9,000	66,490	92
839	10,000	70,721	101
949	13,000	91,555	146

Cuadro 6. Producciones máximas posibles con las combinaciones de densidad y dosis proporcional de fertilización N-P-K basadas en la cantidad de nitrógeno para grandes productores (GP) sujeto a diferentes limitantes presupuestarias, Honduras, 2017.

Limitante presupuestaria (USD)	Producción isocuanta (kg/ha)	Densidad (plantas/ha)	Nitrógeno (kg/ha)
405	6,500	62,589	51
464	7,500	65,497	60
531	9,000	70,379	75
591	10,000	74,128	86
671	13,000	92,592	142

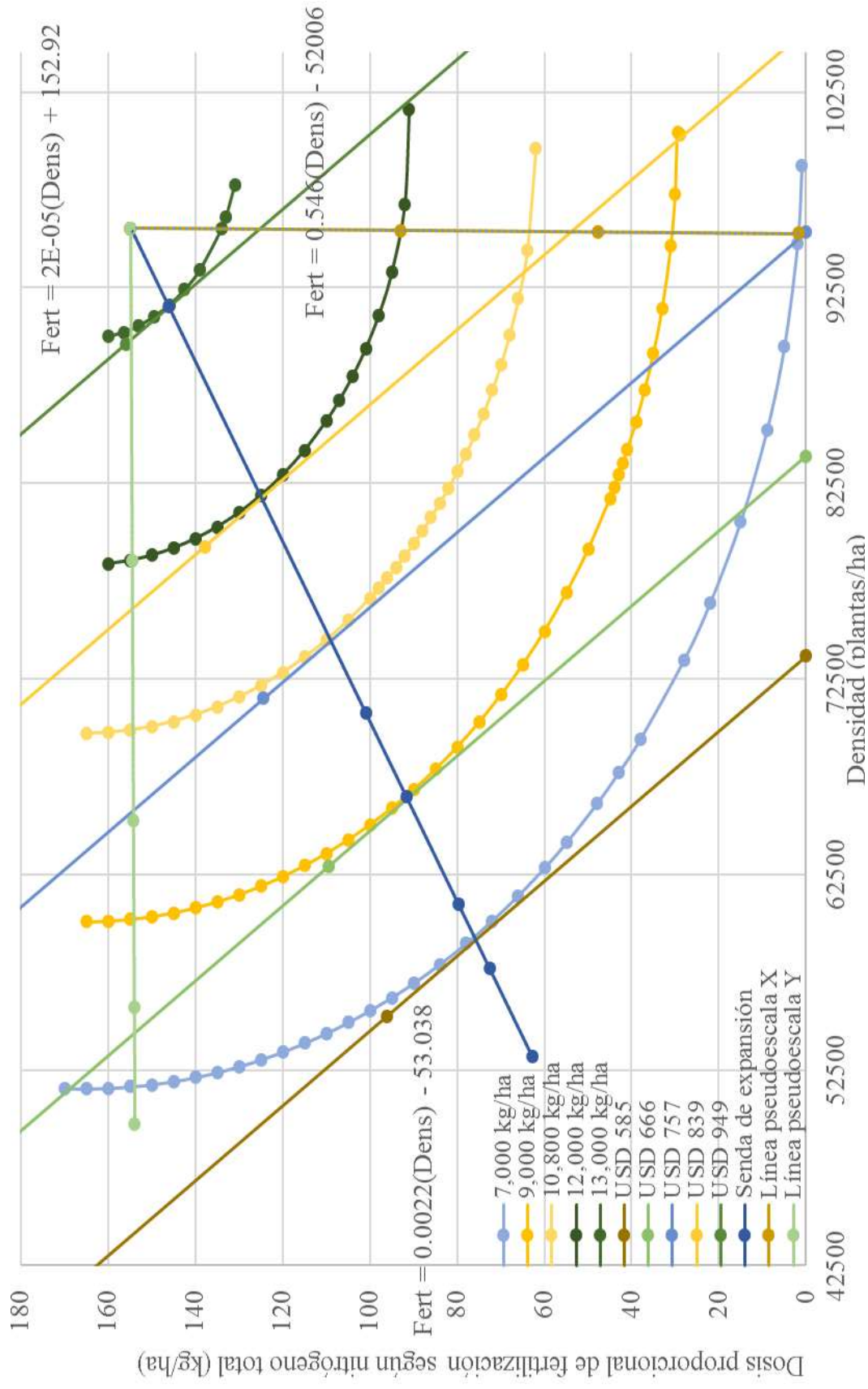


Figura 5. Senda de expansión en condiciones experimentales para medianos productores de maíz híbrido en Zamorano, Honduras 2017.

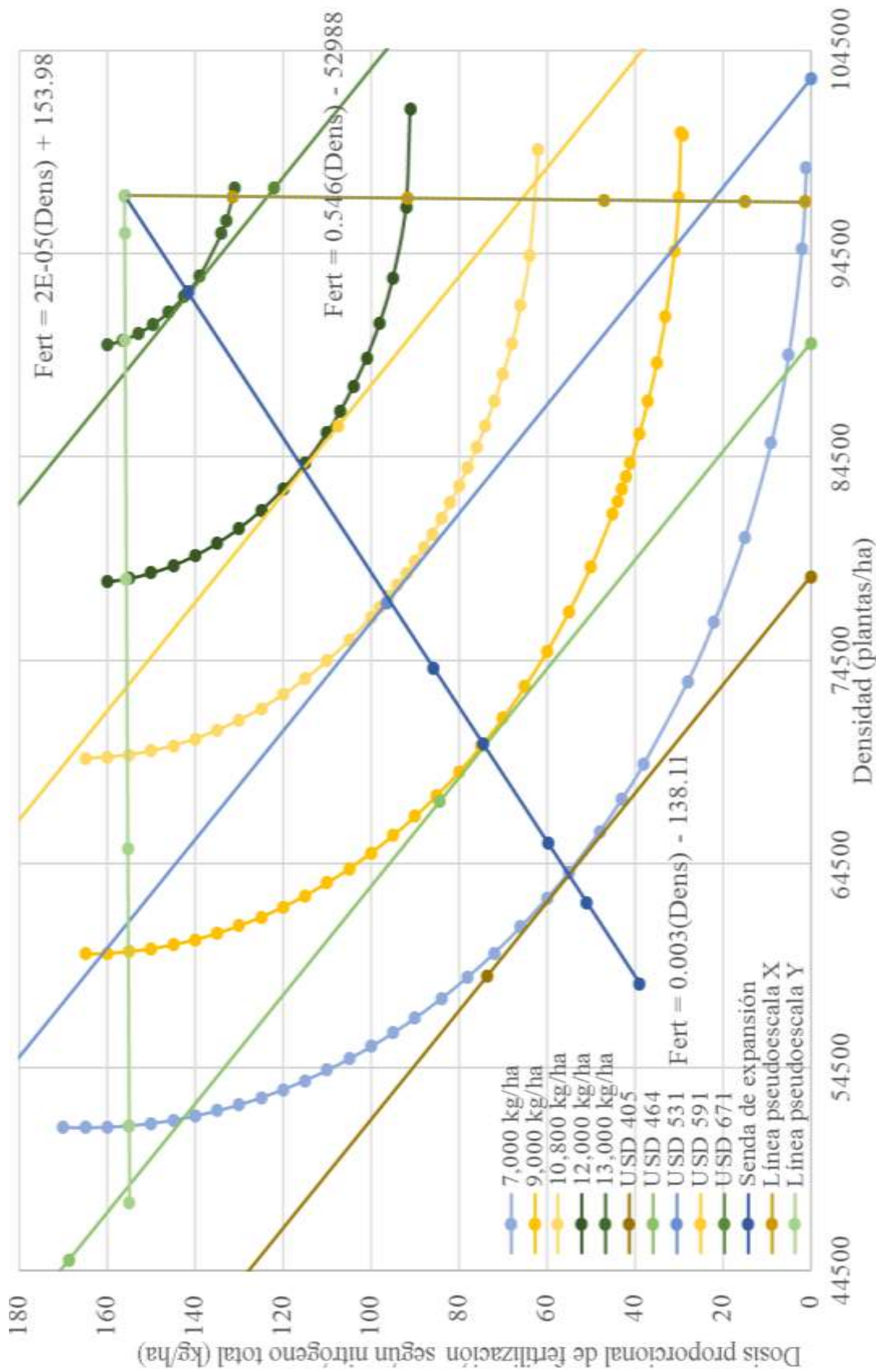


Figura 6. Senda de expansión en condiciones experimentales para grandes productores de maíz híbrido en Zamorano, Honduras 2017.

Las figuras 5 y 6 muestran la senda de expansión para un mediano y gran productor de maíz respectivamente. La diferencia entre cada productor de alcanzar el mismo nivel de producción fue los costos de producción donde el precio de los insumos resultó ser más barato para el gran productor. Adicionalmente en las figuras 5 y 6 se muestran las líneas de pseudoescala que unen la cantidad de un insumo que maximiza el retorno a los demás costos sujeto a la cantidad de otro insumo. Las líneas de pseudoescala respondieron a un modelo lineal que se expresa a continuación en las ecuaciones 7 y 8 para el caso de un mediano y gran productor respectivamente:

$$\text{Fert} = -0.0002(\text{Dens}) + 175.99 ; \text{Fert} = 0.0194(\text{Dens}) - 1694.6 \quad [7]$$

$$\text{Fert} = -0.0002(\text{Dens}) + 174.43 ; \text{Fert} = 0.0159(\text{Dens}) - 1393.1 \quad [8]$$

Las ecuaciones 7 y 8 buscan la dosis proporcional de fertilización que maximizan el retorno de un insumo sujeto a la presencia de otro; por esta razón se le conoce también a las líneas de pseudoescala como “fronteras económicas de producción”. Al aumentar una planta adicional la dosis de fertilización óptima económica en el eje “y” aumenta en 0.00002 teniendo en cuenta para cada caso una base alrededor de 153 kg/ha. Para el eje “x”, al aumentar una planta la dosis de fertilización óptima aumenta en 0.55 para ambos, mediano y gran productor de maíz.

Presupuesto completo.

Los cuadros 9 y 10 muestran los presupuestos para la producción de maíz para un mediano y gran productor. Adicionalmente se detalla el margen neto estimado por hectárea de la combinación óptima determinada en el análisis marginal. El margen neto fue calculado por ciclo de cultivo. Se tomó en cuenta las combinaciones óptimas económicas determinadas y se utilizó los presupuestos completos para conocer el estado de los retornos tomando en cuenta todos los costos variables y fijos de producción. Los costos variables evaluados fueron fungicidas, fertilizantes foliares, insecticidas, herbicidas, mano de obra permanente, mano de obra temporal, riego, cosecha, preparación de suelos, fertilizantes y semillas. Para el caso de los costos fijos se evaluaron los gastos por imprevistos y los gastos generales de mantenimiento.

El presupuesto completo sirvió para establecer una base para la relación de rendimientos y ganancias para ensayos pre-comerciales posteriores y así determinar el porcentaje de disminución de experimental a pre-comercial. La combinación óptima se determinó para cada escenario y se resume en los cuadros 9 y 10.

Cuadro 7. Presupuesto completo para un ciclo de producción de maíz híbrido para un mediano productor (MP) para una hectárea sembrada en Zamorano, Honduras 2017.

Rendimiento (kg/ha)				13,209.00
Precio de campo (USD)				0.30
Total ingresos				3,962.70
Costos variables (CV)	Unidad	Cantidad	Costo unitario (USD)	Costo por ha USD/ha
1. Preparación del suelo	Pases	2.00	100.00	200.00
2. Siembra				560.00
Semilla P4082WHR	Bolsa de semilla	2.00	250.00	500.00
Mano de obra	Horas-hombre	40.00	1.50	60.00
3. Fertilización				176.64
Fertilizante proporcional	kg	155.00	0.59	91.14
Mano de obra	Horas-hombre	57.00	1.50	85.50
4. Control de malezas				45.00
Roundup max	kg	3.00	15.00	45.00
6. Fungicidas				30.00
Nativo	gr	200.00	0.15	30.00
7. Riego				262.00
Cintas de riego	m	12,500.00	0.02	262.00
9. Cosecha				249.00
Mano de obra	Horas-hombre	166.00	1.50	249.00
8. Trabajador permanente				256.00
Total costos variables				1,778.64
Costos fijos (CF)				
1. Gastos por imprevistos	% CV	0.05	1,778.64	88.93
2. Mantenimiento general	% CV	0.05	1,778.64	88.93
Total Costos Fijos				177.86
Costos totales				1,956.50
Margen neto				2,006.20
% Rentabilidad				2.03

Cuadro 8. Presupuesto completo para un ciclo de producción de maíz híbrido para un gran productor (GP) para una hectárea sembrada en Zamorano, Honduras 2017.

Rendimiento (kg/ha)				13,253.75
Precio de campo (USD)				0.30
Total ingresos				3,976.12
Costos variables (CV)	Unidad	Cantidad	Costo unitario (USD)	Costo por ha USD/ha
1. Preparación del suelo	Pases	2.00	80.00	160.00
2. Siembra				460.00
Semilla P4082WHR	Bolsa de semilla	2.00	200.00	400.00
Mano de obra	Horas-hombre	40.00	1.50	60.00
3. Fertilización				153.86
Fertilizante proporcional	kg	155.00	0.44	68.36
Mano de obra	Horas-hombre	57.00	1.50	85.50
4. Control de malezas				36.00
Roundup max	kg	3.00	12.00	36.00
6. Fungicidas				24.00
Nativo	gr	200.00	0.12	24.00
7. Riego				209.60
Cintas de riego	m	12,500.00	0.02	209.60
9. Cosecha				199.20
Mano de obra	Horas-hombre	166.00	1.20	199.20
8. Trabajador permanente				256.00
Total costos variables				1,498.66
Costos fijos (CF)				
1. Gastos por imprevistos	% CV	0.05	1,498.66	74.93
2. Mantenimiento general	% CV	0.05	1,498.66	74.93
Total Costos Fijos				149.87
Costos totales				1,648.52
Margen neto				2,327.60
% Rentabilidad				2.41

Unitariamente un gran productor percibe USD 320/ha más que el mediano productor. Esto se debe a que los costos unitarios promedios para un gran productor son menores a los de un mediano productor debido a que el gran productor de maíz percibe descuentos por volumen que el mediano productor no percibe. No obstante, aunque la diferencia de benéfico bruto es solo USD 300, al multiplicarlo por el área disponible de cada agricultor se puede apreciar una diferencia significativa de alrededor de USD 96,320. Esta aseveración resalta una de las razones de porque el maíz es un cultivo extensivo, debido a que la única forma de percibir márgenes netos altos es aumentando la producción al mínimo costo.

El retorno sobre la inversión, fue evaluada con el porcentaje de rentabilidad. Para el caso de la combinación óptima del mediano productor resultó de 2.03%, lo que indica que, por cada dólar invertido, el proyecto generará el dólar que se invirtió más USD 1.03 de retorno. La combinación que maximiza el retorno a las demás actividades después de siembra, fertilización y cosecha para un gran productor resultó en 2.41%, lo que indica que el gran productor de maíz percibe USD 0.38 más por dólar invertido que el mediano productor.

Los retornos evaluados en este estudio comprendieron resultados experimentales, que no son replicables por un agricultor comercial y por esta razón se espera que el margen neto percibido por un productor de maíz será menor al descrito en esta investigación. No obstante, estos resultados expresan el verdadero máximo valor de beneficio bruto en las mejores condiciones posibles. Esta evaluación brindó las líneas bases para desarrollar un ensayo pre-comercial que considere rangos de evaluación más específicos para brindar una recomendación ajustada a lo que en realidad ocurre en los lotes productivos comerciales de maíz híbrido.

4. CONCLUSIONES

- La superficie de respuesta de rendimiento experimental de maíz es cóncava y alcanza un máximo global productivo en la combinación de 166 kilogramos de nitrógeno, 33 kilogramos de fósforo y 120 kilogramos de potasio con una densidad de 100,732 plantas por hectárea determinada por la función cuadrática: $\text{Rendimiento} = -19382 + 0.52(\text{Dens}) - 0.00000(\text{Dens})^2 + 75.8(\text{Fert}) - 0.23(\text{Fert})^2 + 0.0000096(\text{Dens} * \text{Fert})$.
- El costo menor de insumos que obtiene un gran productor de maíz es lo que provoca que se utilice una mayor cantidad de insumos en relación a un mediano productor, alcanzando el óptimo económico para un mediano productor en la combinación de 155 kg de nitrógeno, 31 kg de fósforo y 115 kg de potasio con una densidad de 95,527 plantas por hectárea, y con una senda de expansión caracterizada por la función $\text{Fert} = 0.0022(\text{Dens}) - 53.038$. Para el gran productor de maíz, el óptimo económico se alcanza en la combinación de 156 kg de nitrógeno, 31 kg de fósforo y 119 kg de potasio con una densidad de 97,328 plantas por hectárea, y con una senda de expansión caracterizada por la función $\text{Fert} = 0.003(\text{Dens}) - 138.11$.
- La base de comparación entre ensayos experimentales y pre-comerciales posteriores son los rendimientos y ganancias en el punto óptimo experimental, donde para el mediano productor es de 13,208 kg/ha con un margen neto de USD2,006/ha y para el caso del gran productor es de 13,253 kg/ha con un margen neto de USD2,327/ha.
- El rango de evaluación de densidad y dosis proporcional de fertilización para el establecimiento de un ensayo pre-comercial posterior incluye las densidades de 62, 72, 82, 92 y 102 mil plantas por hectárea y las dosis de fertilización de 100, 155, 210 y 265 kilogramos por hectárea de nitrógeno y sus dosis proporcionales de fósforo y potasio.

5. RECOMENDACIONES

- Replicar este experimento en distintas zonas de Honduras, evaluar nuevos materiales de siembra y analizar los cambios al sembrar maíz en la temporada de verano para lograr apreciar cambios en el comportamiento del rendimiento y ganancias percibidas por los productores de maíz híbrido.
- Aplicar los rangos de niveles de densidad y fertilización determinados en esta investigación en un ensayo pre-comercial para generar recomendaciones a los medianos y grandes productores que maximicen ganancias sujeto a los rendimientos que se pueden alcanzar en lotes comerciales.

6. LITERATURA CITADA

Bertsch, F., Fallas, R., Echandi, C., & Henríquez, C. (2011). Nutrient absorption and phenology development of the Costa Rican corn hybrid HC-57. *Revista de Ciencias Agrícolas: Universidad de Costa Rica*. Recuperado el junio de 2017, de http://www.mag.go.cr/rev_agr/v35n02_completa.pdf

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&idioma=spanish

Chacín, F. (1998). *Diseño y Análisis de Experimentos para generar Superficies de Respuesta*. Maracay, Venezuela: Universidad Central de Venezuela.

CIC, C. (2017). *Informe mercado de cereales*. Londres: IGC. Obtenido de <http://www.igc.int/downloads/gmrsummary/gmrsumms.pdf>

CIMMYT, C. I. (2015). *Producción de Maíz en centroamerica*. Costa Rica: CYMMYT. Recuperado el 10 de 06 de 2017, de www.cimmyt.org/es

Cuzzy, P. A. (1989). *Evaluación económica de la productividad de maíz híbrido H-27 a la aplicación de diferentes niveles de fertilización nitrógenada y fosforada en la Escuela Agrícola Panamericana*. Biblioteca Wilson Popenoe.

Debertin, D. L. (2012). *Agricultural Production Economics*. Kentucky USA: Macmillan Publishing Company. Recuperado el May de 2017, de <http://www.uky.edu/~deberti/prod/agprod5.pdf>

Elidonzo, J. O. (2013). *Evaluación del rendimiento de los híbridos de maíz DK357VTPRO, DK7088VTPRO y P4082WHR para la producción de ensilaje*, Zamorano, Honduras. Biblioteca Wilson Popenoe. Obtenido de <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/1668/1/CPA-2013-031.pdf>

FAO. (2006). *El maíz en los trópicos*. Depósito de documentos de la FAO. Recuperado el 2016, de <http://www.fao.org/docrep/003/x7650s/x7650s02.htm>

Franzen, D., Sharma, L., Bu, H., & Denton, A. (2016). Evidense for the ability of active-optical sensors to detect the nutrients deficiency in corn. ACSESS. Recuperado el 25 de 05 de 2017, de <https://dl.sciencesocieties.org/>

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=análisis+marginal+krugman&source=bl&ots=CLeWwk3nur&sig=koaRBS5t0qv7jzAl_jRPMuDEc_4&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwiPn5zOxY_VAhXHcT4KHYQUdVAQ6AEIRzAE#v=onepage&q&f=false

Madonni, G., Ortgui, M., Gonzalez, P., & Cirilos, A. (1997). Modificaciones en la relación entre intercepción de la radiación e índice de área foliar en dos híbridos de maíz ante cambio en la densidad de plantas. Congreso Nacional de Maíz (págs. 1-6). Argentina: Pergamino AIANBA.

Martínez, M. (2004). Efecto de 3 densidades de siembra y 4 niveles de fertilización nitrogenada sobre el crecimiento, desarrollo y rendimiento del maíz híbrido H-INTA-991. Universidad Nacional Agraria de Nicaragua, 34. Recuperado el 2016, de <http://repositorio.una.edu.ni/1919/1/tnf01m385e.pdf>

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-of-technical-substitution/>

Sabasi, D., Chapoto, A., & Asante, C. (2015). Fertilizer Intensification and Soil Fertility Impact on Maize Yield . Northern Ghana: School of Economic Sciences Washington State University.

Scielo. (2002). POBLACIÓN Y FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN UN HÍBRIDO DE MAÍZ PARA ENSILAJE EN EL VALLE CENTRAL REGADO. Agricultura técnica. Recuperado el 2016, de http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0365-28072002000200008

Singh, M., Thelen, K., Widdicombe, W., & Williams, A. (2016). Michigan corn performance trials. Michigan USA: Michigan State University-College of Agriculture and Natural Resources.

USD A. (2015). Análisis del Cultivo de Maíz en Honduras. Secretaría de Agricultura y Ganadería. Recuperado el 2016, de <file:///C:/Users/aspirantes/Downloads/201510%20AC%20MAIZ.pdf>

Yan, P., Pan, J., Zhang, W., & Chen, X. (2017). A high plan density reduces the ability of maize to use soil nitrogen. PONE. Obtenido de <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0172717>

7. ANEXOS

Anexo 1. Informe de resultados de análisis de suelos de las unidades experimentales evaluadas en Zamorano, Honduras, 2017.

LABORATORIO DE SUELOS ZAMORANO		LSZ-F126-1	
INFORME DE RESULTADOS DE ANÁLISIS DE SUELOS		Versión: 002	
Sistema de Gestión de Calidad ISO 17025			
Solicitante	Fecha Ingreso Muestra	Fecha Emite Informe	Procedencia de la muestra
Tesis Engel Benavides	2017-05-16	2017-05-16	EAP, Zamorano
Dirección del cliente	N° Lote de Análisis	Cultivo	Informe N°
EAP, Zamorano	2017-14	---	2017-147
		Si	No
			x

	Bajo
	Medio
	Alto

Código Interno Lab	Muestra	Textura	g/100g			pH (H ₂ O)	g/100g			mg/Kg (extractable)									
			Arena	Limo	Arcilla		C.O.	M.O.	N _{org}	P	K	Ca	Mg	Na	S	Cu	Fe	Mn	Zn
17-S-1613	#1	Franco Arcilloso	36	26	38	7.08	0.29	0.51	0.03	4	2795	279	1	1.6	84	71	0.1	0.1	
Rango Medio							2.00	0.20	13	Por Saturación de bases			20	1.7	56	28	1.7	0.5	
							4.00	0.50	30				80	3.4	112	112	3.4	8	

Métodos: K, Ca, Mg, Na, Cu, Fe, Mn, Zn: Solución extractora Mehlich 1, determinadas por espectrofotometría de absorción atómica. P: Solución extractora Mehlich 1, determinado por colorimetría. % Carbono Orgánico: Método de Walkley & Black para suelos minerales no calizas con incertidumbre de ±0.04 (C.O. + 58% de M.O.) % N total: 0% de M.O. pH: 1:1 en agua AGAC 954.16 rango de 4.00-7.00 con incertidumbre de ±0.11. Textura: Método de Bouyoucos, B, S: Solución extractora frotado de calcio, determinadas por colorimetría.

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.

Responsable del análisis: E. Aguilar
Ing. Edmundo Aguilar Solís

Interpretación: Eduardo Guzmán
Ing. Eduardo Guzmán López

Verifica: ACT
Dra. Gloria Arce de Guzmán
Directora Unidad de Suelos



E-mail: laboratorio@suelos@zamorano.edu, gguzg@zamorano.edu., Tel: (504) 2287-2000 ext. 2316 Fax: (504) 2287-4242 Cel: 9969-0886
Laboratorio de Suelos, Departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria Apartado Postal # 93 Tegucigalpa-Honduras. Km 30 Carret. Danlí

Anexo 2. Distribución de los 16 tratamientos de proporción de dosis de fertilización y densidad de plantas/ha en el experimento de campo en Zamorano, Honduras, 2017.

Bloque 1		Bloque 2		Bloque 3		Bloque 4
7		2		8		1
3		13		4		6
12		11		5		14
11		9		15		16
2		10		1		8
13		7		14		10
16		5		16		12
6	Calle	14	Calle	12	Calle	7
5		16		9		2
15		15		13		11
14		1		6		4
8		3		10		15
9		6		2		13
4		12		3		5
1		8		7		9
10		4		11		3

Anexo 3. Michigan boletín anual de comparación de híbridos de maíz, Michigan, 2016.

