

Determinación del óptimo técnico y económico en el cultivo de papa de temporal

JOSÉ LUIS MORALES-HERNÁNDEZ, SAMUEL REBOLLAR-REBOLLAR, JUVENCIO HERNÁNDEZ-MARTÍNEZ Y FELIPE DE JESÚS GONZÁLEZ-RAZ*

RESUMEN

Se calcula el nivel óptimo técnico (NOT) y económico (NOE) en la producción de papa para determinar el uso eficiente de recursos y permitir al productor maximizar sus ganancias monetarias; la investigación se realizó en diez municipios del Estado de México en 2011. Se utilizaron dos modelos econométricos cúbicos con rendimientos marginales decrecientes: el primero con DAP (18-46-00), fosfonitrato y cloruro de potasio como nutriente; el segundo se refiere a la fertilización con mezcla papera. Los resultados para el primer modelo fueron: NOT en DAP (18-46-00) con 929.1 kg y NOE de 922.7 kg de insumo; para fosfonitrato el NOT fue 272.0 y el NOE de 270.3 kg; en cloruro de potasio el NOT fue de 282.7 y el NOE fue de 281.6 kg. Para el segundo, el NOT de mezcla papera fue 1 465.0 kg ha⁻¹ y un NOE de 1 448.1 kg ha⁻¹. Se concluye que el máximo rendimiento de papa no implicó la mayor ganancia en dinero. En los dos modelos la ganancia en el NOE es mayor que en el NOT.

Palabras clave: producto marginal, función de producción, eficiencia, optimización.

Clasificación JEL: C14, C23, C60, D24, D33, O14.

* Centro Universitario UAEM Temascaltepec-Universidad Autónoma del Estado de México. Km 67.5, carretera Toluca-Tejupilco. Colonia Barrio de Santiago S/N. Temascaltepec, Estado de México. C. P. 51300. Correo electrónico: srebolllar@uaemex.mx

ABSTRACT

Determination of the technical and economic optimum in potato crop of temporary

This research aims to calculate the optimum technical level (OTL) and the optimum economic level (OEL) in the production of potato that allows the producers to maximize their profit. The OTL and OEL were calculated in 10 municipalities of the State of Mexico in 2011. Two cubic econometric models with marginal decreasing returns were used. The first model refers to the nutrients such as diammonium diphosphate, phosphonitrate and potassium chloride. The second model refers to the fertilization with potato mixing exclusively utilized in the Valleys of Toluca and Zinacantepec. Field information from 71 producers of potato was used. The results of the first model were: for diammonium diphosphate OTL was 929.1 and OEL 922.7 kg of input; for phosphonitrate OTL was 272.0 and OEL 270.3kg, and for potassium chloride OTL was 282.7 and OEL was 281.6 kg. The result in the second model or production function indicates OTL 1965.0 and OEL 1448.1 kg ha⁻¹ of potato mixing. In conclusion the maximum returns of potato did not entail big profits. In the two models the profit from OEL was superior in relation to OTL.

Keywords: marginal product, production function, efficiency, optimization.

JEL Classification: C14, C23, C60, D24, D33, O14.

INTRODUCCIÓN

En México, la producción de papa tiene lugar en la mayoría de las entidades, por ello las siembras ocurren en diferentes condiciones agroclimáticas y con la utilización de diversas tecnologías que van desde el uso de la yunta y la siembra manual, hasta la maquinaria de siembra, cosechadoras mecánicas y sofisticados sistemas de fertirrigación, con el empleo de distintos niveles insumos productivos (CONPAPA, 2010; Doll y Orazem, 1984).

La producción de papa alcanzó, en el periodo 1990-2010, un volumen promedio de 1 994 miles de toneladas (t), obtenida de una superficie cosechada de 65 170 ha⁻¹, con un rendimiento promedio de 22.36 t por hectárea.

De acuerdo con datos de la Secretaría de Desarrollo Agropecuario del Estado de México (SEDAGRO), de 1996 a 2010, la producción de papa en el Estado de México se ubicó en un volumen de 107 mil t, que representó un decrecimiento de -0.07% promedio anual en relación con la de 1996, aunque la superficie sembrada, en ese mismo periodo, se redujo a razón de -3.4% promedio anual. Este descenso se contrarrestó por un incremento de 3.5% en el rendimiento por hectárea (SEDAGRO, 2011).

En el Estado de México, durante 2011, la siembra de papa se realizó, principalmente, en las áreas de temporal en 27 municipios; 10 de ellos abarcaron 91.7% del total de superficie sembrada. En orden de importancia los municipios con siembra de papa fueron: Juchitepec 1 125 ha (26.6%); Tenango del Valle, 768 ha (18.1%); Zinacantepec, 610 ha (14.4%); San José del Rincón, 448 ha (10.6%); Villa Victoria, 350 ha (8.2%); Villa de Allende, 300 ha (7.1%); Amanalco, 100 ha (2.4%); Jalatlaco, 97 ha (2.3%); Joquicingo, 68 ha (1.6%); Tianguistenco, 65 ha (1.5%) (SEDAGRO, 2011).

En estos municipios, el uso de factores de producción se limita por los recursos económicos del productor, que en muchas ocasiones reduce márgenes de inversión en semillas mejoradas, uso de insumos (fertilizante) y otros que son indispensables para obtener calidad en el tubérculo y lograr mejores precios en los mercados. Por ello, cobra importancia el estudio de la función de producción como instrumento para medir la eficiencia en el uso de los insumos productivos (Doll y Orazem, 1984; Espinoza, 2001, Rebollar *et al.*, 2014). El objetivo de esta investigación fue determinar los niveles técnicos (NOT) y económicos (NOE) de los recursos que los productores de papa utilizan en diez municipios del Estado de México.

La problemática para la agricultura que incluye la determinación de los óptimos, tanto técnico como económico, es un factor de costos y de producción. El uso de estas herramientas de cálculo permite optimizar la respuesta en variables de interés y, así, manejar los recursos de la explotación de manera más eficiente.

La función de producción surge desde que la empresa desea convertir los factores productivos en bienes; tiene su base en el análisis microeconómico, como uno de los dos elementos determinantes de la sustentabilidad de la empresa. Un empresario que intenta alcanzar el equilibrio de la empresa, es decir, que intenta maximizar su beneficio

a corto plazo, tendrá en cuenta, simultáneamente, las características tecnológicas de sus instalaciones y las posibilidades de utilización brindadas por las técnicas productivas disponibles; además, considerará el costo del proceso productivo (FAO, 2015).

1. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en el Estado de México, de coordenadas geográficas: latitud norte $22^{\circ} 45'$ a $22^{\circ} 55'$ y longitud oeste $101^{\circ} 28'$ a $105^{\circ} 42'$ (Franco *et al.*, 1992), en diez municipios productores de papa (SEDAGRO, 2011).

La información se obtuvo por muestreo estratificado (Cochran, 2004) dirigido a productores de papa del Estado de México; incluyó un total de 71 productores. La encuesta se aplicó de junio a noviembre de 2011, con datos sobre cantidades y precios de insumos empleados en la producción: fertilizantes, semillas, plaguicidas y rendimientos de tubérculo por hectárea, todos registrados en cantidades por unidad de superficie.

1.1. Supuestos del modelo de optimización

A través del tiempo, los polinomios de orden bajo (menor o igual a tres) son los más empleados para estimar la superficie de respuesta (González *et al.*, 2000; Colmenares *et al.*, 2002; Hernández *et al.*, 2006), debido a su fácil interpretación y cálculo de los estimadores.

Los modelos pseudocuadráticos representan una alternativa y comprenden el modelo raíz cuadrada que se ha utilizado, ampliamente, en experimentos relacionados con dosis de fertilización; han sido objeto de estudio en trabajos orientados a determinar algunas características del ajuste de la superficie, como eficiencia de estimación de los coeficientes de regresión y varianza, así como sesgo de la respuesta estimada (Díaz *et al.*, 1991; Castillo *et al.*, 1996; Briones y Martínez, 2002). En general, el propósito de la estimación de una superficie es obtener niveles de factores que optimicen la respuesta en las variables de interés.

En ocasiones la dificultad, en el caso de los modelos pseudocuadráticos, reside en el procedimiento de cálculo para determinar los puntos extremos o la estimación de los coeficientes de regresión.

Se utilizaron dos modelos econométricos que permitieron explicar el comportamiento de la variable dependiente (rendimiento de tubérculo) en función de variables explicativas o independientes. El

primer modelo se aplicó a tres nutrientes por separado: como variables explicativas fueron los insumos difosfato de amonio (DAP) (18-46-00), fosfonitrato y cloruro de potasio, empleado por 90% de los productores. El segundo modelo consideró como variable explicativa o independiente el fertilizante conocido como *mezcla papera*, usado principalmente en los Valles de Toluca y Zinacantepec, de gran demanda entre productores de esta región (Martínez *et al.*, 2008; Rebollar *et al.*, 2008). Los modelos fueron los siguientes:

Modelo 1

$$Y_1 = \beta_o + \beta_1 A_1 + \beta_2 A_{12}^2 + \beta_3 A_{13}^3 + \mu_i$$

Donde:

Y_1 = Rendimiento de papa, kilogramo por hectárea.

β_o = Intercepto de la función.

β_i = Parametros a estimar; $i = 1, 2, 3$ (DAP (18-46-00)), fosfonitrato y cloruro de potasio.

A_n^m = Insumos: fosfato diamónico, fosfonitrato, cloruro de potasio.

μ_i = Error estadístico, aleatorio estocástico o término de perturbación.

Modelo 2

$$Y_1 = \beta_o + \beta_1 A_1 + \beta_2 A_{12}^2 + \beta_3 A_{13}^3 + \mu_i$$

Donde:

Y_1 = Rendimiento de papa, kilogramo por hectárea.

β_o = Intercepto de la función.

β_i = Parametros a estimar.

A_n^m = Mezcla papera.

μ_i = Error estadístico, aleatorio o término de perturbación.

Los modelos 1 y 2 se justifican con la teoría de la producción, en especial la función de producción (como una relación técnica insumo-producto) (Nicholson, 2008) y, específicamente, con condiciones necesarias y suficientes de concavidad de la curva (Nicholson, 2008), con lo cual es posible derivar algebraicamente los óptimos técnicos y económicos (Doll y Orazem, 1984; Mankiw, 2007), como a continuación se describe.

El nivel óptimo técnico (NOT) (Rebollar *et al.*, 2011; Rebollar *et al.*, 2014) para el modelo 1 y el 2 ocurre cuando, matemáticamente, el $PMg = 0$, es decir, el rendimiento marginal o producto marginal es igual

a cero, que equivale al punto cuando se logra la máxima producción (dentro de la curva de la función de producto total o de producción), sin considerar los precios del insumo y del producto (Pindyck, 2009; Portillo *et al.*, 2013; Rebollar *et al.*, 2014).

$Y = f(X)$, donde $Y =$ producción, $X =$ insumo variable, y $\frac{dy}{dx} = 0$ (condición matemática de primer orden) (Nicholson, 2008), para obtener el NOT o el nivel de insumo variable que representa la máxima producción (Portillo *et al.*, 2013; Rebollar *et al.*, 2014).

El nivel óptimo económico (NOE) para el modelo 1 y el 2 ocurre cuando el PMg es igual a la relación de precios del insumo y del producto (Doll y Orazem, 1984; Rebollar *et al.*, 2008a; Rebollar *et al.*, 2014).

$$\text{PMg} = \frac{P_x}{P_y} \text{ o } \frac{dy}{dx} = \frac{P_x}{P_y},$$

donde P_x y P_y son los precios unitarios del insumo y del producto.

Los modelos se estimaron con procedimientos del Modelo Lineal General, *proc reg*, con la variante *proc glm* y *maxr*, que permite calcular el máximo coeficiente de determinación o bondad de ajuste (R^2). Se utilizó el programa Statistical Analysis System (SAS) en su versión 2010.

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.1 Análisis estadístico

La información sobre fertilizantes se utilizó para ajustar una función de producción con rendimientos marginales decrecientes (Nicholson, 2008). Para el primer modelo se obtuvo una función cúbica con signos esperados de acuerdo con la teoría económica, presentó los siguientes valores en cada nutriente:

Modelo 1

$$Y_{DA} = 16523 - 23.51261DA + 0.08053DA^2 - 0.00004871DA^3$$

ee	(402.67)	(0.000)	(0.005)	(2.472)
----	----------	---------	---------	---------

t_c	(41.03)	(-14.33)	(15.42)	(-9.51)
-------	---------	----------	---------	---------

$$R^2 = 0.98$$

Comprobacion t (Gujarati y Porter, 2009):

$$t = \frac{\beta_2}{ee\beta_2}$$

$$t = 16523/402.67 = 41.03 \quad t = 0.08053/ 0.0052 = 15.42$$

$$Y_{FOS} = 15282 - 33.74462F + 0.70516F^2 - 0.00158F_3$$

ee	(437.93)	(0.000)	(0.051)	(8.293)
t _c	(34.90)	(-16.33)	(13.82)	(-4.07)

R² = 0.98

$$Y_{KCL} = 15988 - 65.84648KCL + 0.77391KCL^2 - 0.00155KCL^3$$

ee	(376.963)	(0.000)	(0.041)	(6.787)
t _c	(42.41)	(-19.54)	(18.49)	(-9.70)

R² = 0.79

Donde: DAP = (fosfato diamónico o 18-46-00, F= fosfonitrato, KCL = cloruro de potasio.

Las F calculadas (Fc) en este primer modelo fueron: 1494.85, 1269.10 y 1073.08 con probabilidades de F < 0.0001, e indican, en cada ecuación, el número de veces que el cuadrado medio de la regresión (CMR) contiene al cuadrado medio del error (CME) en los tres insumos: DAP, fosfonitrato y cloruro de potasio; adicionalmente, dado que el valor de las Fc es grande, la hipótesis nula se rechazaría en favor de la alternativa, lo anterior evidencia que la variable independiente es importante para predecir el rendimiento.

Los valores entre paréntesis de cada modelo, en el primer renglón, son los errores estándar de los estimadores, que cuando se multiplican por dos dan como resultado un valor menor que el del estimador, lo que otorga significancia estadística al modelo (Gujarati y Porter, 2009; Rebollar *et al.*, 2014).

El segundo renglón proporciona la prueba t de Student en cada estimador del modelo: en el cúbico, los valores del DAP fueron 14.33, 16.33 y 19.54 con Pr > | t | < 0.0001; en el cuadrático fueron 15.42, 13.82 y 18.49 con Pr > | t | < 0.001 y, finalmente, en el término lineal fueron 9.51, 4.07, y 9.79 con Pr > | t | < 0.001 para el DAP, fosfonitrato y cloruro de potasio. El coeficiente de determinación (R²) (Gujarati y Porter,

2009: 75) explica la bondad de ajuste o respuesta de rendimiento de papa debida a la uniformidad de las dosis de fertilizante aplicadas por el productor; es decir, brindan la proporción de la variación total en la variable dependiente Y que se explica por la variable (única) independiente X (DA, FOS, KCl y MP en cada ecuación)¹; mide la proporción o el porcentaje de la variación total en Y explicada por el modelo de regresión. De manera textual, la R² en el primer modelo fue 0.98; significa que más o menos 98% de la variación en el rendimiento de papa, bajo la modalidad temporal, se explicó por la variación en las cantidades utilizadas de los insumos DAP, fosfonitrato y cloruro de potasio.

En la ecuación Y_{KCL} la R² fue 0.79, significa que sólo 79% de la variación en el rendimiento de papa de temporal por unidad de superficie, se explica por el cloruro de potasio.

Modelo 2

La F calculada resultó con valor de 228.6, con una probabilidad de F < 0.001. El primer renglón, debajo del modelo, corresponde al error estándar del estimador, que al ser multiplicado por dos da como resultado un valor menor que el estimador, situación que indica la significancia estadística (Rebollar *et al.*, 2008; Rebollar *et al.*, 2011; Rebollar *et al.*, 2014).

El coeficiente de determinación (R²) para la mezcla papera fue 0.96, que explica la respuesta de rendimiento de tubérculo debida al insumo variable (fertilizante); el segundo renglón indicó los valores de la prueba de t; en el componente cúbico fue 1.77 con Pr de | t | < 0.0905, en el componente cuadrático fue 3.31 con Pr | t | < 0.001 y en el componente lineal de 3.08 con Pr | t | < 0.0053.

Los valores que se obtuvieron en el modelo, fueron:

$$\begin{array}{l}
 Y_{MP} = 16161 - 20.068MP + 0.0508MP^2 - 0.00002MP^3 \\
 \text{ee } (846.271) \quad (0.000) \quad (0.015) \quad (6.514) \\
 t_c \quad (19.10) \quad (-1.77) \quad (3.31) \quad (-3.08) \\
 R^2 = 0.96
 \end{array}$$

Donde MP = mezcla papera.

1. $R^2 = \frac{SCE}{SCR}$, donde SCE = Suma de cuadros del error, SCT = Suma total de cuadrados

$$R^2 = \frac{\beta_2 \sum y_i x_{2i} + \beta_3 \sum y_i x_{3i}}{\sum y_i^2}$$

Los valores de los coeficientes de determinación en ambos modelos se explican por el uso, similar, en cantidades de fertilizante usadas por productores de manera comercial; más aún, el ciclo agrícola presentó condiciones climáticas favorables para este cultivo en el año de estudio, en cuanto a precipitación y temperatura.

Para probar la normalidad del conjunto de datos utilizados en este análisis, se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk, una de las más sencillas y potentes (Pérez, 2004). En la estimación con 26 grados de libertad para la mezcla papera se obtuvo un estadístico calculado de 0.890 y un nivel de significancia de 0.0096. Para los fertilizantes difosfato de amonio, fosfonitrato y cloruro de potasio, se empleó la prueba de Kolmogorov-Smirnov, con 71 g.l., fue 0.142, 0.148 y 0.129, cuya significancia fue 0.0012, 0.0002 y 0.0051. Las pruebas estadísticas indican que la información usada en la estimación de los modelos posee una distribución normal.

Obtención de NOT, primer modelo estimado:

$$Y_{DA} = 16523 - 23.51261DA + 0.08053DA^2 - 0.00004871DA^3$$

La condición de primer orden:

$$\begin{aligned} dy/dx = -3(0.00004871)DA^2 + 2(0.08053)DA - 23.51261 &= 0 \\ -0.0001461DA^2 + 0.16106DA - 23.51261 &= 0 \end{aligned}$$

Al resolver el binomio cuadrado para el insumo DA:

DA = 929.1 kilogramos por hectárea (la segunda raíz pertenece a la etapa I de la producción y se deshecha).

Obtención del NOE:

En el caso de la solución al NOE, se consideraron los precios de los insumos Px = \$5.86 (precio kg DAP), Py = \$8.50 (precio de kg de papa comercial).

$$Y_{DA} = 16523 - 23.51261DA + 0.08053DA^2 - 0.00004871DA^3$$

$$dy/dx = -3(0.00004871)DA^2 + 2(0.08053)DA - 23.51261 = P_x/P_y$$

Resolviendo la ecuación cuadrática se obtiene el NOE.

NOE = DA = 922.7 kilogramos por hectárea

2.2. Análisis económico

El signo negativo que precede a los valores de los coeficientes de las variables independientes en ambos modelos indicó la presencia de

funciones de producción cúbicas con rendimientos marginales decrecientes, lo que significa que por cada incremento de una unidad adicional de insumo variable (fertilizante) se producirán aumentos cada vez menores en el rendimiento de tubérculo de papa (ley de los rendimientos físicos marginales decrecientes). En este sentido, en las condiciones de evaluación, el valor de la ordenada al origen (β_0) tanto en el modelo 1, con valores de 16 523, 15 988, y 15 988, como en el modelo 2 con β_0 de 16 461 no tienen significado económico (Gujarati y Porter, 2009: 81; Rebollar *et al.*, 2011; Rebollar *et al.*, 2014); además son interpretados como el nivel de rendimiento que alcanzaría la producción del tubérculo sin la aplicación de fertilizante, cuando la variable independiente toma un valor de cero.

2.2.1. Óptimo técnico o nivel de máxima producción (NOT)

De acuerdo con Lanfranco y Helguera (2006), Rebollar *et al.* (2011), Rebollar *et al.* (2014) y Wadsworth (1997), el óptimo técnico (NOT) es aquel donde la función de producción encuentra su punto máximo en términos de la producción física por volumen. El NOT se ubica, siempre, arriba del óptimo económico y representa el nivel de producción donde no intervienen los precios de los insumos (Rebollar *et al.*, 2014). Una vez determinadas las funciones de producción, es posible indicar que al inicio la producción aumentará a una mayor velocidad de transformación del insumo variable (fertilizante) en el producto total, a medida que se agregue una unidad adicional del insumo variable; no obstante, llegará un punto donde el peso de los tubérculos presentará un rendimiento marginal decreciente: en este nivel el insumo variable produce el máximo peso u óptimo técnico (Rebollar *et al.*, 2014).

Por tanto, al sustituir los valores estimados en cada ecuación en los modelos 1 y 2 y sustraerles el costo total del insumo variable (fertilizantes) en todo el proceso productivo, se obtiene el rendimiento del tubérculo: donde se logra la máxima producción o máximo rendimiento (NOT).

En el segundo modelo, con mezcla papera, el máximo rendimiento (NOT) se alcanzó con 1 465.1 kg y su máxima ganancia (NOE) con 1 448.1 kg por hectárea.

Para el modelo 1, en la etapa o fase I de la producción, el producto marginal aumenta cada vez que se agrega un kilogramo de insumo; es decir, al aumentar un kg de DAP (18-46-00), fosfonitrato y cloruro de potasio, se induce un aumento de 12.3, 51.8 y 41.8 kg de tubérculo

de papa. La fase I termina cuando el PME es máximo e incorpora el máximo valor que toma el PMg, que en este trabajo presentó valores de 20.8, 71.0, y 62.7 kg de tubérculo por kilogramo de fertilizante; estos valores integran lo que se conoce como punto de inflexión de la función de producción, en el que los rendimientos empiezan a ser decrecientes (Nicholson, 2008; Rebollar *et al.*, 2014).

En la segunda etapa, el producto total (PT) sigue incrementándose con cada kilogramo adicional de fertilizante, pero el valor del producto medio (PME) disminuye sucesivamente; ésta se conoce como de *rendimientos marginales decrecientes*, con valores para DAP (18-46-00) de 20.8 a cero, fosfonitrato de 71.0 a 0.0, y cloruro de potasio de 62.7 a cero.

El producto promedio (PME) alcanza su nivel máximo en la fase II con valores en difosfato diamónico de 18.3, fosfonitrato en 63.7 y cloruro de potasio con 55.6 kg.

La etapa II concluye cuando el PT alcanza su valor máximo en la curva de producto total (PT), o bien, cuando el PMg toma un valor cero; ello implica que la pendiente, en ese punto, es cero; después se tiene un descenso, vinculado con el momento en que el suministro de insumo alcanzó valores de 929.0 en el DAP, 272.0 en fosfonitrato y 282.7 kg en cloruro de potasio. El valor correspondiente al PMg es cero en los tres casos; después, el PMg se vuelve decreciente y negativo (etapa III de la producción).

Esta fase del proceso productivo, conocida como *etapa rentable* (Rebollar *et al.*, 2011; Rebollar *et al.*, 2014), se inicia donde el PME es máximo hasta el punto donde la Elasticidad de la Producción (Ep) es 0.051 en DAP, 0.01 en fosfonitrato y 0.6 en cloruro de potasio.

La fase III se caracteriza porque los valores del PMg son negativos, esto es, hay rendimientos decrecientes pero negativos, debido a que con cada unidad adicional de DAP, fosfonitrato y cloruro de potasio, el valor de PT desciende sucesivamente.

El modelo 2 representa la alternativa de fertilización para los productores en los Valles de Toluca y Zinacantepec, respecto a la forma tradicional; además, incluye en su formulación el nematicida. Se aplica de forma comercial en siembra (24 bultos) y un reabonado o segunda aplicación (ocho bultos), es decir, utiliza 1 200 kg en siembra y 400 kg en reabonado, para un total de 1 600 kg por hectárea (Martínez *et al.*, 2008; Rebollar *et al.*, 2008).

En el comportamiento de las variables en el proceso productivo, en la fase I, al suministrar un kilogramo de mezcla papera, se induce un aumento de 13.4 kg de tubérculo: esto representa el PMg. El PMg es creciente en la etapa I de la producción, con cada unidad de mezcla papera agregada; concluye cuando el PMe es máximo y se alcanza en 22.8 kg de tubérculo, lo que se conoce como *punto de inflexión de la curva de producción*.

Para la fase II de la producción, el producto total (PT) sigue aumentando con cada kilogramo adicional de mezcla papera; pero cuando el PMg disminuye sucesivamente, tiene lugar la *etapa de rendimientos marginales decrecientes*, donde el PMg va de 22.0 a 0.0 kg. El PMe, por su parte, alcanza el punto máximo en 19.9 kg de tubérculo de papa. Cuando la producción total es máxima, esto es, 32.9 t por hectárea, concluye la fase II, y corresponde a un suministro en mezcla papera de 1 465.0 kg, después de la cual hay un descenso en rendimiento. El PMg correspondiente en la máxima producción es de cero, esto es, la pendiente en ese punto es cero, de ahí que la funcionalidad de la condición de primer orden (Nicholson, 2008; Rebollar *et al.*, 2011; Rebollar *et al.*, 2014) indique que después el PMg tome valores negativos.

La etapa III de la producción se caracteriza por productos marginales negativos (Doll y Orazem, 1984; Rebollar *et al.*, 2014), es decir, con cada kg de mezcla papera, el valor de la producción total desciende; esto se explica fisiológicamente porque la cantidad de fertilizante que absorbe la planta afecta su funcionamiento, propiciando que el tubérculo tenga crecimiento irregular y con deformaciones; el nutriente ya no se absorbe o el exceso de absorción origina dichas alteraciones.

En cuanto a la elasticidad de la producción, en la fase I llega a 1.18; la etapa II o *fase rentable del proceso productivo* (Rebollar *et al.*, 2011; Posadas *et al.*, 2011, Rebollar *et al.*, 2014) inicia a partir del punto donde el PMe es máximo; después de este valor sigue la etapa III, con rendimientos negativos. Se aplicó al valor del NOT en los dos modelos, una prueba de unidades de insumo anterior y posterior en las ecuaciones (cuadro 1), para cada insumo, lo cual prueba, de forma matemática, que solo a ese nivel se garantiza la obtención del NOT.

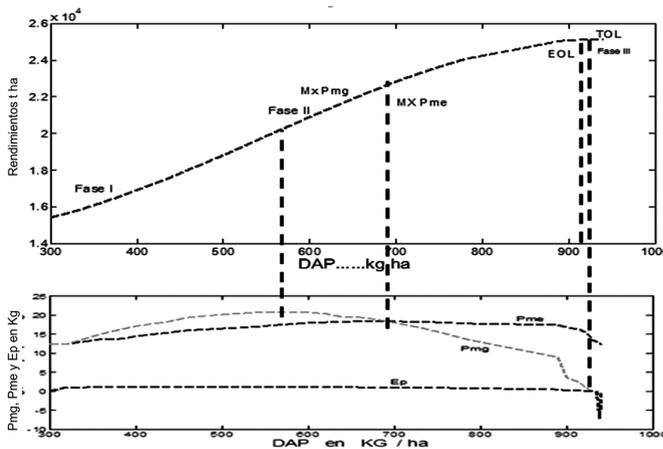
Además de la discusión técnica, es preciso señalar que los métodos de optimización proporcionan medios eficaces y sistemáticos para elegir, entre infinitas soluciones, cómo surgen de los problemas con un número grande de variables de decisión. En países donde la información

sobre la composición de nutrientes en etiquetas es obligatoria, como EE.UU., los procesos que optimizan los nutrientes resultan esenciales (FAO, 2013). En muchos casos, tales procedimientos son la consecuencia de aplicar la investigación a nivel de la empresa y, por tanto, no está disponible públicamente; en el caso de la papa, su importancia es de orden público: ahorrar y obtener producciones óptimas es fundamental dados los recursos dedicados al cultivo.

Las figuras 1 y 2 representan la forma gráfica de la función de producción para DAP (figura 1) y cloruro de potasio (figura 2), correspondientes al modelo 1; en la figura 3 se tiene la respuesta para la mezcla papera correspondiente al segundo modelo estimado.

Con referencia a la figura 1, para DAP, en la etapa I de la producción, la ganancia en rendimiento de tubérculo fue mayor con relación con la II y III, etapa de rendimientos crecientes; es la fase de formación de tubérculo, concluye donde el PMe es máximo. La fase II es de rendimientos decrecientes, pero positivos (Rebollar *et al.*, 2014), y termina donde la derivada de la función de producción se iguala a cero (PMg = 0).

Figura 1
FUNCIÓN DE PRODUCCIÓN EN EL CULTIVO DE PAPA EN DAP, PME, PMG Y EP. ESTADO DE MÉXICO, 2012

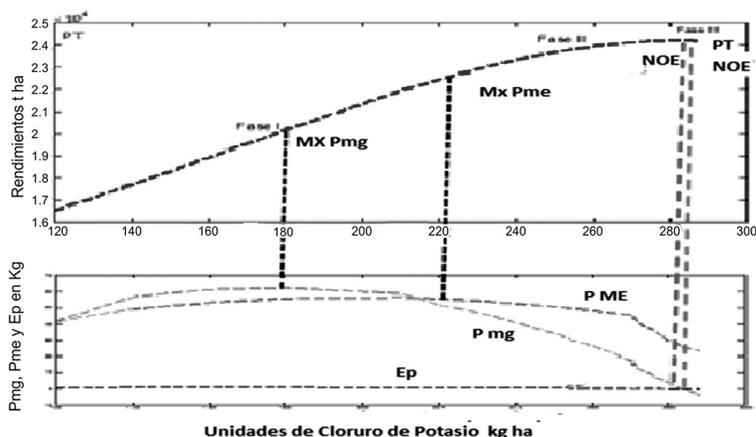


Fuente: Cálculos propios con base en información de campo.

En algún punto de la etapa II se localiza el NOE, que fue de 922.7 kg aplicados para un rendimiento de 24 t/ha de tubérculo. Por su parte, en la

etapa III, aunque el tubérculo continúa con la absorción de fertilizante, sus ganancias de peso son menores (tasas decrecientes negativas), por lo que el productor debe cortar el follaje de la planta y detener la absorción de nutriente, pues el costo de producir un kilogramo de tubérculo sería mayor de lo que recibiría por su venta; esto es, el CMg (Costo marginal) > IMg (Ingreso marginal) y las ganancias disminuirían a mayor tiempo del cultivo en el terreno. Por definición, en la etapa I, el PMg es mayor que el PMe (PMg > PMe) y estos se igualan donde el PMe es máximo, después el PMg descende hasta llegar a valores negativos, después de la etapa III.

Figura 2
FUNCIÓN DE PRODUCCIÓN EN EL CULTIVO DE PAPA, CLORURO DE POTASIO. PMe, PMg Y Ep. ESTADO DE MÉXICO.



Fuente: Cálculos propios con base en información de campo.

En la figura 2 se hace referencia al cloruro de potasio. Para la etapa I la ganancia fue mayor en relación con las II y III, a tasas mayores que la unidad. La fase I termina donde el PMe es máximo. La fase II, es de tasas decrecientes positivas, termina donde el PMg = 0 y en algún espacio del segmento de curva se localiza óptimo económico, que en la investigación fue 281.6 con un rendimiento de tubérculo de 24.2 t/ha.

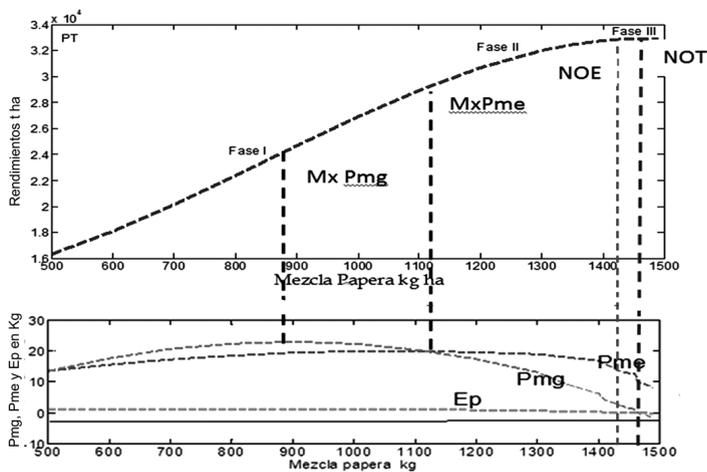
En la fase III se tienen, también, rendimientos marginales decrecientes negativos; el CMg es mayor al IMg. Por definición, en la etapa I el PMg > PMe y estos se igualan en el punto donde PMe es máximo; el

PMg continúa descendiendo hasta llegar a valores negativos (después del inicio de la fase III de la producción).

Para mezcla papera (figura 3), en la fase I el rendimiento de tubérculo fue mayor en relación con las etapas II y III; aquí los rendimientos son crecientes a tasa mayores que la unidad, la elasticidad de la producción fue mayor a la unidad, por lo que el insumo presentó su mayor eficiencia en transformarse en tubérculo; es un proceso de absorción de la planta. La etapa termina donde el PME es máximo (Doll y Orazem, 1984; Rebollar *et al.*, 2011; Rebollar *et al.*, 2014).

Figura 3

FUNCIÓN DE PRODUCCIÓN EN EL CULTIVO DE PAPA, MEZCLA PAPERERA Y SU RELACIÓN CON EL PME, PMG Y EP. ESTADO DE MÉXICO, 2012



Fuente: Cálculos propios con base en información de campo.

En la segunda fase de la figura 3, el tubérculo continúa ganando peso, pero a tasas decrecientes positivas; termina en el punto donde la derivada de la función de producción se iguala a cero ($PMg=0$); es decir, por más que se aumente el insumo variable, no puede proporcionar más rendimiento. Para el caso de la investigación, el valor de la mezcla papera fue 1 448.5 kg, nivel menor a la recomendación comercial de la zona.

En la fase III, aun cuando el tubérculo ya absorbió el nutriente necesario y es capaz de lograr mayor tamaño, puede parar la absorción (tener tasas decrecientes negativas), por lo que el productor debe cortar el follaje

en el tubérculo, dado que el costo de producir un kilogramo más de rendimiento sería mayor de lo que reciba por la venta. Visto de otra forma, el $CMg > IMg$, por lo que en esta etapa las ganancias económicas disminuirían en función del tiempo en que el tubérculo permanece en el terreno.

2.2.2. Nivel óptimo económico (NOE) o de máxima ganancia

El nivel óptimo económico (NOE) corresponde al nivel de producción donde se maximizan los beneficios (ingresos totales), en relación con los precios de los productos y de la estructura de costos (Lanfranco y Helguera, 2006; Rebollar *et al.*, 2014); se produce donde el PMg del insumo variable se iguala a su costo marginal (CMg), definido como el aumento en el costo total (CT) necesario para producir una cantidad adicional de producto (Rebollar *et al.*, 2014); dado que los rendimientos son decrecientes; o bien, cuando el valor de la derivada, en ese punto, sea igual a la relación de precios del mismo y del producto (Rebollar *et al.*, 2014).

Se consideran las derivadas para estimar tanto el NOT como el NOE, así como las ganancias netas para cada nivel, con el insumo variable (fertilizante). Así, el NOE, para ambos modelos, se obtuvo cuando el $PMg = Px/Py$, es decir, cuando la primera derivada de la función, (PMg) se igualó a la relación de precios del insumo y del producto. Con los precios de cada insumo y del producto, en la fecha en que se realizó la investigación, en el modelo 1 se estimaron los ingresos totales; con datos similares se obtuvieron los ingresos totales del modelo 2. La ganancia neta, el NOE, en ambos modelos fue mayor, en relación con el momento en que el tubérculo alcanzó el máximo peso (NOT) (cuadro 2).

Cuadro 2

COMPARACIÓN DE GANANCIAS POR INSUMO UTILIZANDO EL NOT Y EL NOE EN EL CULTIVO DE PAPA. ESTADO DE MÉXICO, 2012

Concepto	Variable	Ingreso total	Costo total (\$)	Ganancia	Diferencia
NOT	DAP (18-46-00)	213 575.2	5 442.5	208 130.7	19.3
NOE		231 556.9	5 407.0	208 150.0	
NOT	Fosfonitrato	225 068.5	2 088.9	222 979.6	10.5
NOE		225 067.5	2 077.4	222 990.1	
NOT	Cloruro de potasio	205 734.8	2 869.3	202 766.5	5.1
NOE		205 728.4	2 956.8	202 771.6	
NOT	Mezcla papera	279 649.2	15 382.8	264 311.4	88.3
NOE		279 605.2	15 205.5	264 399.7	

Fuente: Elaboración propia.

La teoría económica señala que la óptima producción o NOT no necesariamente implica la obtención de la máxima ganancia, dado que al NOE se da una mejor combinación en el costo del insumo variable (fertilizante) con el producto obtenido, logrando con ello un mayor ingreso para el productor de papa que el que obtendría cuando comercializa sus tubérculos al NOT. Las fluctuaciones de precios que predominen en un momento dado en el mercado afectarían la ganancia máxima en relación con el peso óptimo de venta de los tubérculos.

Por último, en el ámbito social, el crecimiento de la productividad agrícola deriva en mayor disponibilidad de alimentos y menores precios reales de éstos. En el ámbito de la pequeña agricultura, el crecimiento de la productividad aumenta los ingresos rurales y la disponibilidad de alimentos.

CONCLUSIONES

El máximo rendimiento para tubérculo de papa no implicó mayor ganancia monetaria para el productor. En cada modelo, el valor de la variable dependiente para el NOE fue menor que el NOT, demostrando la teoría de la producción en cuanto al comportamiento de las fases del proceso productivo. Por tanto, las ganancias al NOE fueron mayores que las del NOT. En general, la ganancia más alta se obtuvo con la mezcla papera de uso más generalizado para el Valle de Toluca- Zinacantepec. El orden descendente de ganancias continuó para fosfonitrato, DAP y cloruro de potasio, de uso en los diez municipios productores de papa. Los resultados podrían utilizarse para actualizar paquetes tecnológicos de los Institutos de Investigación, o aplicarlos de manera directa con los productores en los municipios evaluados.

BIBLIOGRAFÍA

- Briones, E. F. y G. A. Martínez (2002). "Eficiencia de algunos diseños experimentales en la estimación de una superficie de respuesta", *Agrociencia*, 36, pp. 201-210.
- Castillo, V. M.; G. A. Martínez; M. A. Castillo y R. J. A. Santizo (1996). "Comparación de diseños a estimar superficies de respuesta", *Agrociencia*, 30, pp. 75-81.

- Cochran, W. G. (1984). *Técnicas de Muestreo*. CECSA, México.
- Colmenares, C. B.; G. A. Martínez; D. A. Martínez; G. M. E. Ramírez y C. F. González (2003). “Región confidencial para óptimos económicos en modelos pseudocuadráticos”, *Agrociencia*, 7, pp. 177-185.
- CONPAPA (2010), “Confluencia del subcomponente de sanidad vegetal con los planes rectores de los sistemas producto vinculados con campañas fitosanitarias con el programa de prevención y manejo de riesgos de la reglas de operación 2001”, México, <http://www.senasica.gob.mx>, [10 de enero de 2011].
- Díaz, G. J. A., G. A. Martínez, C. F. González, M. A. Castillo y R. J. A. Santizo (1991). “La eficiencia de los diseños de tratamientos empleados en la investigación agrícola, considerando el ajuste de modelos pseudocuadráticos”, *Agrociencia*, 3, pp. 27-47.
- Doll, J. P. and F. Orazem (1984), *Production Economics. Theory with applications*, 2nd edn., John Wiley Sons, Canadá.
- Espinoza, G.J.A. (2001), “Productividad del sistema producto pecuario en México”, *Técnica pecuaria Méx.*, 39 (2), pp. 127-138.
- FAO (2013), *La variabilidad espacial de las funciones de producción que gobiernan la acuicultura y la pesca continental*, Departamento de Pesca.
- Franco, M. S., R. I. Cadena, T. A. González, H. E. Orozco, B. S. Salazar, R. J. L. Coronado, G. H. H. Graniel, M. V. Peña, J. V. Santana, P. L. Hernández (1992), *Atlas del Estado de México*. Gobierno del Estado de México / Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca.
- González, E. D. R., B. S. Alcalde, C. J. Ortiz y M. A. Castillo (2000), “Dinámica de la acumulación de potasio por trigo cultivado en diferentes ambientes”, *Agrociencia*, 34, pp. 1-11.
- Gujarati, D. N. y D. C. Porter (2009), *Econometría*, 5^a ed., Mc Graw Hill. México.
- Hernández, S. J., G. M. Cuca, M. A. Pró, A. M. González y P. C. Becerril (2006), “Nivel óptimo biológico y económico de calcio en gallinas *leg-horn* blancas de segundo ciclo de postura”, *Agrociencia*, 40, 49-57.
- Lanfranco, C. B. y P. L. Helguera (2006), “Óptimo técnico y económico. Diversificación, costos ocultos y los estímulos para mejorar los procesos en la ganadería nacional”, *Revista INIA*, 8, pp. 2-5.
- Mankiw, G. (2007). *Microeconomía*, 6^a ed., Antony Bosch Editores, México.
- Martínez, M. J. N., R. S. Rebollar, S. J. A. García, J. D. Cardoso, M. J. Hernández, R. R. Rojo, A. B. Portillo, R. F. de J. González, A. O. Ramírez (2008). “Elaboración de mezclas de fertilizantes para papa y maíz en el valle de Toluca, Estado de México 2008”, *Revista Mexicana de Agronegocios*, cuarta época, año XII. vol. 24, junio-diciembre, pp. 668-679.
- Nicholson, W. (2008), *Teoría microeconómica. Principios básicos y ampliaciones*. 9^a ed., ENGAGI Learning, México.
- Pérez, L. C. (2004), *Técnicas de análisis multivariante de datos. Aplicaciones con SPSS*, Pearson Prentice Hall, Madrid.

- Pindyck, R. S. y D. L. Rubinfeld (2009), *Microeconomía*, 7ª ed., Pearson Prentice Hall, Madrid.
- Posadas, D. R. R., R. S. Rebollar, M. J. Hernández, R. F. J. González, R. A. Rebollar, S. E. Guzmán (2011), “Niveles de optimización económica en bovinos engordados en corral”, en Arras-Vota, Ana María de Guadalupe y Ofelia Adriana Hernández-Rodríguez (coords.), *Administración, agrotecnología y redes de conocimiento*, Pearson. México, pp. 55-62.
- Rebollar, R. S., D. R. R. Posadas, M. J. Hernández, R. F. J. González, S. E. Guzmán, y R. R. Rojo (2011) “Technical and economics optimal in feedlot cattle”, *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14 (2), pp. 413-420.
- Rebollar, R. S., M. J. Hernández, R. R. Rojo, J. D. Cardoso, L. G. Rodríguez, S. E. Guzmán (2008), “La programación lineal en la elaboración de mezclas de fertilizantes”, *Panorama Administrativo*, (4), pp. 33-50.
- Rebollar, R. S., M. J. J.-Hernández, R. F. J. González, H. P. Mejía y J. D. Cardoso (2008b), “Óptimos económicos en corderos Pelibuey engordados en corral”, *Universidad y Ciencia*, 24 (1), pp. 67-73.
- Rebollar, R. S., T. G. Gómez, M. J. Hernández, J. N. Callejas y S. E. Guzmán (2014), “Óptimos económicos en cortes de carne de cerdo en dos regiones de México”, *Revista Agronomía Mesoamericana*, 25(1), pp. 161-168.
- Rebollar, R. S., T.-G. Gómez, M. J. Hernández, R. Rojo, R.-F. J. González, R., N.-F. Avilés (2008a), “Determinación del óptimo técnico y económico en una granja porcina en Temascaltepec, Estado de México”, *Ciencia Ergo Sum*, 14 (3), pp. 255-262.
- SEDAGRO (2011), *Departamento de Agricultura*, http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=350, [10 de febrero de 2011].
- Wadsworth, J. (1997), “Capítulo 6. Conceptos económicos en el manejo y análisis de sistemas”, *Análisis de Sistemas de Producción Animal. Tomo 2. Las Herramientas básicas. (Estudio fao Producción y Sanidad Animal 140/2)*, <http://www.fao.org/docrep/W7452S/w7452s00.htm#Contents>, [10 de enero de 2011].