

OPTIMIZACIÓN ECONÓMICA DE LOS SISTEMAS PRODUCTIVOS FAMILIARES DE LA ASOCIACIÓN ASIPAP, UMALA, LA PAZ

Economic optimization of the family production systems of the ASIPAP association, Umala, La Paz

Marco Antonio Patiño Fernández¹

RESUMEN

La producción de papa (*Solanum tuberosum*), quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) y cebada (*Hordeum vulgare*) es esencial para la seguridad alimentaria de las familias en la región del Altiplano Central de Bolivia. Sin embargo, los eventos climáticos y la dinámica del mercado, originan incertidumbre en la producción, ¿qué producir?, ¿cuánto? y ¿cuándo?, repercute en el sistema productivo familiar haciendo de éstos menos resilientes. En este contexto el objetivo del presente estudio es desarrollar una propuesta de planificación productiva para la optimización económica de los cultivos de papa, quinua y cebada a través de la programación lineal. Para este fin, entre los meses de abril a septiembre del 2022, se recolectó información secundaria y de primera mano, a través de talleres comunales, observación participativa y encuestas familiares; en los ámbitos: social, ambiental y económico-productivo. Estas encuestas se realizaron a seis estudios de caso familiar, representando a los tres tipos de familia existente: formación, consolidación y re estructuración. Para la optimización económica, los datos se analizaron mediante el software libre *R* versión 4.1.2 (2021-11-01), como lenguaje de programación, utilizando la interfase *RStudio*, paquete *lpSolve* y la función *lp*. Los resultados mostraron diferentes escenarios, en función a la tipología familiar, destacando que con la producción de papa se logra los mayores beneficios económicos por la demanda insatisfecha del mercado, seguida por la quinua y la cebada, que se convierte en el cultivo de emergencia. Con la programación lineal se cuenta con información económica que maximiza los ingresos económicos de 27 al 48 % dependiendo del tipo de familia, sujeta a variar en función a coyunturas sociales, económicas y medioambientales.

Palabras clave: programación lineal, investigación operativa, sistema de ecuaciones, restricciones productivas. agricultura familiar.

ABSTRACT

The production of potatoes (*Solanum tuberosum*), quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) and barley (*Hordeum vulgare*) is essential for the food security of families in the Central Altiplano region of Bolivia. However, weather events and market dynamics cause uncertainty in production: what to produce? How much? And when? It has an impact on the family productive system, making them less resilient. In this context, the objective of this study is to develop a productive planning proposal for the economic optimization of potato, quinoa and barley crops through linear programming. For this purpose, between the months of April and September 2022, secondary and first-hand information was collected through community workshops, participatory observation, and family surveys; in the areas: social, environmental and economic-productive. These surveys were carried out on six family case studies, representing the three types of existing families: formation, consolidation and restructuring. For economic optimization, the data was analyzed using the free software *R* version 4.1.2 (2021-11-01) was used as programming language, using the *RStudio* interface, *lpSolve* package and the *lp* function. The results showed different scenarios, depending on the family type, highlighting that potato production achieves the greatest economic benefits due to unsatisfied market demand, followed by quinoa and barley, which become emergency crops. With linear programming, economic information is available that maximizes economic income from 27 to 48 % depending on the type of family, subject to vary depending on social, economic and environmental circumstances.

Keywords: linear programming, operations research, system of equations, productive restrictions. family farming.

¹  Docente Investigador, Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Andrés, Doctorante en Ciencias Agrarias, Bolivia.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0582-8478>. marcopatinofernandez@gmail.com

INTRODUCCIÓN

La producción agrícola es susceptible de sufrir pérdidas por efecto de cambio climático, que impacta en los ecosistemas terrestres (Herrero et al., 2016), con incremento o variación de temperaturas, prolongadas sequías, periodos de heladas e intermitente frecuencia de precipitaciones pluviales; que tienen su efecto en la aparición e incidencia de plagas, enfermedades y un acelerado proceso de erosión y pérdida de cobertura vegetal (Lozano-Povis et al., 2021). A estos factores medioambientales se suma los de tipo social al existir poca o ninguna cultura de parte la agricultura familiar, para realizar procesos de planificación sobre ¿qué producir?, ¿cuánto producir? y ¿cuándo producir?, que conlleva a contar con bajos rendimientos de los cultivos y por ende poco margen de utilidad de los productos cultivados.

Bajo este contexto el presente estudio tiene como objetivo desarrollar una propuesta de planificación productiva para la optimización económica de los cultivos de papa, quinua y cebada a través de la programación lineal, orientada a agricultores familiares de la provincia Aroma del departamento de La Paz, bajo el principio de uso racional y optimización de los recursos escasos. La programación lineal en la agricultura se constituye en una herramienta de utilidad debido a su capacidad para resolver problemas en el caso concreto de maximizar las utilidades considerando las variables de decisión, la función objetivo y las restricciones.

El aporte de la agricultura familiar a la seguridad alimentaria de la población (Fundación Tierra, 2016; Vargas, 2017; Parmás, 2020; Tito y Wanderley, 2021), se encuentra condicionado a factores de índole climático, social y económico que ponen en riesgo la sostenibilidad de los sistemas familiares (Hidalgo, 2015), el uso de procesos o sistemas de planificación que optimice la producción es relevante. La optimización agrícola, debe constituirse en una actividad fundamental por integrar tanto las demandas de los productores, consumidores y del medio ambiente. A nivel de consumidor se garantiza la seguridad alimentaria y la trazabilidad de los productos; a nivel de productor, se mejora los ingresos económicos, el uso adecuado de los medios y la reducción de costos de producción. A nivel del medio ambiente, se racionaliza el aprovechamiento de los recursos naturales y reduce la erosión del suelo. Para este fin Barboza-Navarro et al. (2021),

sugieren utilizar la programación lineal, como un modelo matemático que contribuya al productor en facilitar la toma de decisiones con respecto a la asignación de los recursos económicos, productivos, medioambientales y sociales que bien, podrían ser limitados.

Al ser la producción agrícola fundamental para garantizar la seguridad alimentaria familiar de una población y tomando en cuenta que ésta actividad debe ser rentable; la optimización en la toma de decisiones en sistemas agropecuarios a nivel de una agricultura familiar es importante, por lo cual se debe visualizar cómo maximizar la ganancia neta en función de las actividades agrícolas y los recursos requeridos para su producción (Labra-Marín, 2018). Por tanto la importancia del uso de los modelos de simulación constituyen herramientas complementarias para el manejo de las unidades productivas familiares, las mismas que contribuyen a la toma de decisiones óptimas para su desarrollo, al contribuir con información relevante del sistema productivo (Manzanares, 2018).

Para Labra-Marín (2018), la programación lineal es un método para minimizar/maximizar funciones lineales sujeto a restricciones de igualdad o desigualdad. Se basa en la definición de una función objetivo, que representará en su definición los parámetros que integran aquello que se quiere optimizar. Para definir el problema, es preciso conocer la condiciones y restricciones que limitan el problema, relacionadas con la disponibilidad de los recursos (Barboza-Navarro et al., 2021), mismos que deben ser iguales o mayores a cero (Arto, 2019). Para Alvarado (2009), es un modelo matemático que aporta con información para la toma de decisiones de las unidades productivas.

Djumaeva et al. (2009), al realizar un trabajo de maximización en el uso de arbustos y árboles en Asia Central como alimento sustancial de los animales, logran mejorar los ingresos entre 34 a 53 %, en función a las temporadas. Los autores destacan la importancia de la programación lineal como una forma de promover modelos sostenibles. Otro aporte sustancial a la optimización de procesos lo propone Arto (2019), quien, al realizar un trabajo en una cuenca, diseña la estrategia de optimización bajo un enfoque de desarrollo territorial, en torno al uso eficiente del agua. En el estudio, además señala las principales restricciones del uso de una programación lineal, entre ellas: a) cada variable tiene un peso, en función al objetivo proporcional a su valor; b) cada

variable actúa independiente de las otras; solo se permite una función objetivo. Por tanto, a medida que se añaden más variables al problema, la complejidad puede crecer en exceso, siendo difícilmente resolubles mediante la programación lineal y presentando cada vez mayor error (Arto, 2019). Por lo expuesto, el presente trabajo pretende desarrollar una propuesta de planificación productiva para la optimización económica de los cultivos de papa, quinua y cebada a través de la programación lineal, con el fin de contribuir a una mejor toma de decisiones para la producción óptima de determinados cultivos, considerando el uso de insumos, la mano de obra, la incertidumbre y cambios del mercado bajo un enfoque de maximizar los beneficios económicos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación de la zona de estudio

La residencia de los productores de la Asociación Integral de Productores Agropecuarios de Patihipi (ASIPAP), es parte de la comunidad del mismo nombre, ubicada a 17°30'36.126" latitud sur y 67°48'35.672" longitud oeste, municipio de Umala, provincia Aroma del departamento de La Paz (Bolivia).

Metodología

La investigación es de tipo descriptivo y exploratorio, por analizar la situación actual de los sistemas

productivos familiares en torno a dos productos importantes la papa y quinua para la seguridad alimentaria, y la cebada como forraje para el ganado. Para la recolecta de información se utilizaron las técnicas de la observación participante, la entrevista a líderes locales, un taller comunal y encuestas. Todas estas realizadas entre los meses de abril a septiembre de 2022 en la comunidad de Patihipi.

Para la optimización económica (1), de inicio se realizó el taller comunal (2), para la recolecta de información general en los ámbitos económico, organizacional y ambiental, considerando aspectos como el acceso de superficie agrícola por familia, cantidad de hectáreas mínima y máxima por ciclo agrícola, que garantice la seguridad alimentaria, número de miembros por familia, manejo de la diversidad de especies cultivadas, entre otros.

Tomando en cuenta que el total de socios es de 18 socios que representan a 12 familias, y para lograr la representatividad de la muestra, se utilizó tres estudios de caso familiares, considerando el ciclo de vida familiar: formación, consolidación y re-estructuración. Por el tipo de estudio, se requiere además de la representatividad del grupo la predisposición de la familia (pareja) en cooperar con la recolecta e interpretación de datos, mismos que fueron obtenidos a través de encuestas estructuradas, entrevistas y observación participativa (3).



Figura 1. Flujograma de la metodología.

La recolecta de información (4), fue fundamental para desarrollar un sistema de ecuaciones que permitió incorporar los tres tipos de familia en el modelo de programación lineal. Se consideraron diversos factores de estudio como: a) los cultivos papa, quinua y cebada (forraje); b) el acceso y uso de maquinaria agrícola; así como c) la cantidad de hectáreas mínima

y máxima necesaria para la producción, que garantice la seguridad alimentaria y genere excedentes para el acceso a recursos monetarios. A partir de estos datos, se identificaron la función objetivo, las variables de decisión y las restricciones necesarias para la resolución del modelo.

Tabla 1. Modelo para la identificación de función objetivo y restricciones.

Función objetivo: $z = i_p h_p + i_q h_q + i_c h_c$	Dónde: z = función objetivo de maximización. i = ingreso en Bs por cultivo h = hectáreas por cultivo
Variables de decisión: hectáreas por cultivo h_p, h_q y h_c	Donde: h = hectáreas p = papa q = quinua c = cebada
Las restricciones:	Donde:
$1h_p + 1h_q + 1h_c \leq 15$ (1)	h = hectáreas
$6Hr_p h_p + 3Hr_q h_q + 3Hr_c h_c \leq 20$ (2)	p = papa
$12Ab_p h_p + 3Ab_q h_q + 5Ab_c h_c \leq 30$ (3)	q = quinua
$1Jh_p + 1Jh_q + Jh_c \leq 121$ (4)	c = cebada
$1h_p + 0h_q + 0h_c \leq 3$ (5)	Hr = horas tractor
$0h_p + 1h_q + 0h_c \leq 3$ (6)	Ab = Abono
$0h_p + 0h_q + 1h_c \leq 3$ (7)	J = Jornal
$1h_p + 0h_q + 0h_c \geq 0,1$ (8)	
$0h_p + 1h_q + 0h_c \geq 0,04$ (9)	
$0h_p + 0h_q + 1h_c \geq 1$ (10)	

Para el análisis y propuesta de maximización (5), se desarrolló la función objetivo (ecuación z), que estima la utilidad bruta a partir de los ingresos (i) en bolivianos generado por los tres cultivos (p, q y c), en función a las hectáreas (h), destinadas para cada uno.

La restricción (1), considera que la suma de las hectáreas por cultivo sea menor o igual a 15 ha ($1h_p + 1h_q + 1h_c \leq 15$), siendo el promedio de la tenencia de tierra en la comunidad. Las familias disponen el uso de maquinaria agrícola, siendo la restricción igual o menor a 20 horas destinadas para la producción de los cultivos, ecuación 2 ($6Hr_p h_p + 3Hr_q h_q + 3Hr_c h_c \leq 20$); así mismo, utilizan abono orgánico para los tres cultivos que debe ser menor o igual a 30 toneladas, ecuación 3 ($12tph_p + 3tqh_q + 5tch_c \leq 30$). Estas dos últimas restricciones son constantes en cantidad por cultivo, para los tres tipos de familia. Considerando que la mano de obra es fundamental para realizar los procesos productivos desde la preparación del suelo, hasta la selección del producto, el acceso a la mano de obra es diferente por cultivo y tipo de familia,

siendo la restricción menor o igual a 121 jornales, ecuación 4 ($1Jh_p + 1Jh_q + Jh_c \leq 121$). Se considera las restricciones de hectáreas máximas por cultivos, ecuaciones 5, 6 y 7, y las mínimas 8, 9 y 10, necesarias para garantizar el acceso a los productos de papa y quinua, de acuerdo al consumo per cápita y para la crianza de ovinos.

Para el análisis de programación lineal se utilizó el software libre R versión 4.1.2 (2021-11-01), como lenguaje de programación, empleando la interfase RStudio, paquete lpSolve y la función lp.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Situación real por tipo de familia

La Tabla 2, resume las características productivas, destino de la producción interna y comercial como los ingresos económico monetarios generados por la producción en la campaña agrícola 2021-2022. La cantidad de hectáreas sembradas por cultivo es producto de la experiencia o intuición que tienen las familias estudio de caso.

Tabla 2. Resumen de características productivas, destino de la producción e ingresos por tipo familiar.

Tipo de familia	Características productivas			Destino interno (kg)			Destino comercial (kg)			Ingresos por venta de productos (Bs kg ⁻¹)			Total (Bs)	Total (USD)	
	Cultivos	Superficie ha	Semilla kg	Producción kg	Semilla	Autocom.	Transfor.	Al. Animal	Semilla	Consumo	Semilla	Consumo			Sub total
Formación (5)	Papa	1,25	644	6210	2300	230	276	0	1564	1840	8160	5600	13760	16160	2318.51
	Quinua	3	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Cebada	3	46	7360	0	0	0	3680	0	3680	0	2400	2400	0	0
Consolidación (6)	Papa	1,75	874	8832	874	322	276	0	460	6900	2400	21000	23400	35900	5150.64
	Quinua	4	20	2300	0	0	0	0	0	2300	0	12500	12500	0	0
	Cebada	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Reestructuración (3)	Papa	1,5	920	1840	0	230	230	0	138	1242	720	3780	4500	5100	731.71
	Quinua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	Cebada	4	46	1840	0	0	0	920	0	920	0	600	600	0	0

1USD = 6.96 Bs.

La familia en formación compuesta de cinco miembros implementó en la gestión agrícola un total de 4.25 ha, en principio con la siembra de papa (1.25 ha) y quinua (3 ha). Sin embargo, debido al evento climático registrado, alta precipitación pluvial en la etapa de emergencia de la quinua, originó la pérdida del cultivo; siendo reemplazada esta superficie por cebada. El destino de la producción de papa se orienta a contar con semilla para el siguiente ciclo agrícola (37 % del total), un 8 % destinada para el consumo y transformación del producto y un 55 % destinada para la venta como semilla (1 564 kg) y papa consumo (1 840 kg). El ingreso económico generado por la papa fue de Bs. 13 760, equivalente a 974.17 USD (6.97 Bs = 1 USD). Este tipo de familia también destinó a la venta 3 680 kg de cebada, reportando un ingreso monetario de Bs. 2 400 (344.33 USD). Por tanto, el total de ingreso monetario obtenido fue de Bs 16 160 (2 318.51 USD).

La familia en consolidación la conforman un total de seis miembros, todos con mayoría de edad. Lograron sembrar 5.75 ha (1.75 de papa y 4 de quinua). Del total de la producción destinan un 10 % como semilla para siguiente ciclo agrícola, un 7 % para el autoconsumo directo o transformado; siendo el resto 83 % a la venta (5 % como semilla y 78 % como papa para el consumo). El ingreso que percibe por la venta de papa es de Bs. 23 400 (3 357.25 USD). Por otra parte, destinó una superficie de 4 ha para la producción de quinua, siendo su rendimiento de 0.58 t ha⁻¹. El precio ofertado en el mercado local es de Bs. 5.43 kg⁻¹, haciendo un total de Bs. 12 500 (1 793.40 USD). Por tanto, el total de ingreso monetario percibido fue de Bs. 35 900, equivalente a 5 150.64 USD.

La familia en reestructuración lo conforman tres personas, los padres de familia adultos mayores. La

familia optó por sembrar 5.50 ha de papa (1.50 ha) y cebada (4 ha); no así quinua, debido a las constantes precipitaciones pluviales en temporada de siembra. Del total de producción de papa, un 25 % lo destina para el consumo directo y la transformación. Para la venta destina un total de 1 380 kg (75 %), 138 kg como semilla y 1 242 kg como papa para el consumo. El total de ingreso obtenido por la venta de papa fue de Bs. 4 500 (645.62 USD). A este ingreso se añade el percibido por la venta de cebada de Bs. 600 (86.08 USD), haciendo un total de ingreso monetario de Bs. 5 100, equivalente a 731.71 USD.

En los tres estudios de caso, se muestra una situación real y la forma intuitiva de la planificación para la producción, obteniendo productos que garantizan en parte la seguridad alimentaria familiar y excedentes sujetos para la comercialización. Este hecho responde a la estrategia que optan las familias en principio para garantizar la seguridad alimentaria y luego comercializar el producto para la adquisición de productos transformados (Fundación TIERRA, 2014; Vargas, 2017). Se hace necesario resaltar que el comportamiento productivo que asumen las familias responden a las condiciones sociales, económicas y medioambientales de su contexto.

Situación con maximización

Para realizar el modelo de maximización de ingresos, se consideró datos teóricos como la cantidad de horas de tractor y abono orgánico por hectárea necesario para realizar el proceso productivo. Por otra parte, tanto la cantidad máxima y mínima por hectárea es resultado del análisis desarrollado con los productores, en torno al acceso a la tierra y la cantidad mínima requerida para que la producción autoabastezca. En esta misma línea la mano de obra (jornal) difiere de las familias estudio de caso.

Tabla 3. Características de ingresos y disposición de equipos, insumos por tipo familiar.

Tipo de familia	Cultivo	Ingreso en (Bs ha ⁻¹)	Ingreso en (USD ha ⁻¹)	Horas (tractor ha ⁻¹)	Abono (t ha ⁻¹)	Jornal ha ⁻¹	Maximo (ha)	Minimo (ha)
Formación	Papa	13 760	1 974.18	6	12	38	3	0.10
	Quinua	0	0	3	3	5	3	0.04
	Cebada	2 400	344.33	3	5	13	3	1.00
Consolidación	Papa	23 400	3 357.25	6	12	50	3	0.10
	Quinua	12 500	1 793.40	3	3	30	3	0.04
	Cebada	0	0	3	5	15	3	1.00
Reestructuración	Papa	4 500	645.62	6	12	25	3	0.10
	Quinua	0	0	3	3	4	3	0.04
	Cebada	600	86.08	3	5	15	3	1.00

Total/ha = 15; Hr/tractor = 20; Abono = 30; Jornal = 121; 1 USD = 6.96 Bs.

Obtenido los ingresos por la venta de productos y definidas las restricciones, se introdujo los datos al

Rstudio y *lpsolve*, en función a los coeficientes y signos por tipo de familia descritos en la Tabla 4.

Tabla 4. Coeficientes y signos empleados para obtener la función objetivo (maximizar).

Tipo de familia	Coeficientes y signos
Formación	<pre>f.obj <-c(13760, 0, 2400) f.con <- matrix(c(1, 1, 1, 6, 3, 3, 12, 3, 5, 38, 5, 13, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1), nrow = 10, byrow = TRUE) f.dir <- c("<=", "<=", "<=", "<=", "<=", "<=", "<=", ">=", ">=", ">=") f.rhs <- c(15, 20, 30, 121, 3, 3, 3, 0.1, 0.04, 1) lp("max", f.obj, f.con, f.dir, f.rhs) lp("max", f.obj, f.con, f.dir, f.rhs)\$solution</pre>
Consolidación	<pre>f.obj <-c(23400, 12500, 0) f.con <- matrix(c(1, 1, 1, 6, 3, 3, 12, 3, 5, 50, 30, 15, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1), nrow = 10, byrow = TRUE) f.dir <- c("<=", "<=", "<=", "<=", "<=", "<=", "<=", ">=", ">=", ">=") f.rhs <- c(15, 20, 30, 121, 3, 3, 3, 0.1, 0.04, 1) lp("max", f.obj, f.con, f.dir, f.rhs) lp("max", f.obj, f.con, f.dir, f.rhs)\$solution</pre>
Re estructuración	<pre>f.obj <-c(4500, 0, 600) f.con <- matrix(c(1, 1, 1, 6, 3, 3, 12, 3, 5, 25, 4, 15, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1), nrow = 10, byrow = TRUE) f.dir <- c("<=", "<=", "<=", "<=", "<=", "<=", "<=", ">=", ">=", ">=") f.rhs <- c(15, 20, 30, 121, 3, 3, 3, 0.1, 0.04, 1) lp("max", f.obj, f.con, f.dir, f.rhs) lp("max", f.obj, f.con, f.dir, f.rhs)\$solution</pre>

Donde: f.obj <-c(0,0,0) = vector del coeficiente de la función objetivo; f.con <- matrix(c(1, 1, 1,...) = matriz de coeficientes para la matriz de restricciones; f.dir <- c("<=", ...) = vector de dirección de la restricción; f.rhs <- c(15, 20,...) = valores de la restricción.

Corrido los datos en *lpsolve*, se obtuvo la función objetivo, la cantidad de hectáreas por cultivo, en

función a las restricciones establecidas, mismas descritas en la Tabla 5.

Tabla 5. Máximos ingresos económicos en función a la superficie y cultivo, por tipo de familia.

Familia en formación			Familia en consolidación			Familia en re estructuración		
Función objetivo: Bs. 30			Función objetivo: Bs. 49			Función objetivo: Bs. 9		
Max. ingresos 929.07			Max. ingresos 300.00			Max. ingresos 930.00		
USD 4			USD 7			USD 1		
437.46			073.17			424.68		
Determinación de variable hectarea/cultivo			Determinación de variable hectarea/cultivo			Determinación de variable hectarea/cultivo		
Papa (p)	2.07		Papa (p)	2.00		Papa (p)	2.07	
Quinua (q)	0.04		Quinua (q)	0.20		Quinua (q)	0.04	
Cebada (c)	1.00		Cebada (c)	1.00		Cebada (c)	1.00	
Restricciones para la producción			Restricciones para la producción			Restricciones para la producción		
Hectareas	3.11	≤ 15	Hectareas	3.20	≤ 15	Hectareas	3.11	≤ 15
Papa	2.07	≤ 3	Papa	2.00	≤ 3	Papa	2.07	≤ 3
Quinua	0.04	≤ 3	Quinua	0.20	≤ 3	Quinua	0.04	≤ 3
Cebada	1.00	≤ 3	Cebada	1.00	≤ 3	Cebada	1.00	≤ 3
Papa	2.07	≥ 0.10	Papa	2.00	≥ 0.10	Papa	2.07	≥ 0.10
Quinua	0.04	≥ 0.04	Quinua	0.2	≥ 0.04	Quinua	0.04	≥ 0.04
Cebada	1.00	≥ 1	Cebada	1.00	≥ 1	Cebada	1.00	≥ 1
Tractor	1.56	≤ 20	Tractor	15.60	≤ 20	Tractor	15.56	≤ 20
Abono	30	≤ 30	Abono	29.60	≤ 30	Abono	30	≤ 30
Jornal	91.99	≤ 121	Jornal	121	≤ 121	Jornal	66.99	≤ 121

De acuerdo a la Tabla 5, la familia en formación cultivando 2.07 ha de papa, 0.04 ha de quinua y 1 ha de cebada lograría una maximización de sus ingresos de Bs. 30 929 (4 437.46 USD), que incrementa en un 48 % más de lo previsto intuitivamente. La familia en consolidación destinando 2 ha de papa, 0.20 ha de quinua y 1 ha de cebada maximiza sus ingresos en Bs. 49 300 (7 073.17 USD), incrementando un 27 %. La familia en consolidación al cultivar 2.07 ha de papa, 0.20 ha de quinua y 1.00 ha de cebada, igual que la familia en formación lograría obtener un ingreso de Bs. 9 930 (1 424.68 USD), incrementando en un 48 % a lo previsto intuitivamente.

El utilizar la programación lineal como una herramienta para la planificación del sistema agrícola familiar generaría incrementos en los ingresos familiares en un 27 y 48 % en función al tipo familiar. Este incremento se debe a una mejor distribución de la tierra, siendo la producción de papa la de mayor rentabilidad en la gestión agrícola 2021-2022. En diferente contexto socioproductivo, Barboza-Navarro et al. (2021) mencionan que la papa genera mayores utilidades anuales en los sistemas productivos familiares. Las familias productoras al asumir la comercialización de papa como estrategia y vinculación al mercado, lo hacen bajo la coyuntura actual de la demanda que tiene el producto tanto como semilla y consumo directo de la población, cuyo consumo per cápita año fue de 100 kg/persona/año para el 2015 y de 103 kg/persona/año para el 2021 (Helvetas Bolivia, 2021).

Es interesante notar la similitud en la distribución de tierras por cultivo entre las familias de formación y reestructuración: 2.07 ha de papa, 0.2 ha de quinua y 1 ha de cebada. Además, estas familias muestran un incremento porcentual del 48 % en la generación de recursos económicos. Este resultado, aunque teórico, está influenciado por factores como el acceso y cantidad de insumos y mano de obra destinados al proceso productivo. Cabe señalar que las familias en formación tienen menos mano de obra familiar, al estar constituidas principalmente por hijos menores de edad, mientras que las familias en reestructuración cuentan con miembros de la tercera edad. Por tanto, este comportamiento se lo asume en función a la mano de obra que tengan dentro del sistema productivo familiar, además como lo plantea la FAO-BID (2007) al tipo de sistema familiar que corresponda.

En cuanto a la influencia de la papa en el aumento de los ingresos monetarios, la familia en formación ha optado por una estrategia de venta de semilla de papa, las cuales se cotizan en el mercado regional a un precio de Bs. 5.22 kg⁻¹ (0.75 USD kg⁻¹). En comparación, el costo del kilogramo de papa para consumo en la gestión 2022 fue de Bs. 3.04 (0.45 USD), lo que les permite obtener el 60 % de sus ingresos a partir de este producto. Por otro lado, en el caso de las familias en consolidación y reestructuración, el comportamiento es diferente, ya que destinan un menor volumen de su producción como semilla y obtienen el 10 % y el 16 % de sus

ingresos respectivamente a partir de esta estrategia. Este antecedente confirma lo estratégico e importante que es la producción de papa para las familias, al garantizar la seguridad alimentaria de manera directa (Zapata et al., 2023), y promover a través de su comercialización recursos económicos.

Al utilizar los datos de la Tabla 2 y simular un escenario en el que las familias en consolidación y reestructuración optan por producir papa como semilla en un porcentaje similar al de la familia en formación (60 %), sus ingresos aumentarían en un 16 y 21 % respectivamente, en relación a su ingreso actual. Otro escenario a considerar es la producción de quinua, la cual fue afectada por precipitaciones pluviales en su etapa de emergencia, generando poca o nula producción. Sin embargo, si se considera un escenario en el que las condiciones climáticas son normales y el rendimiento de la quinua promedio es de 0.69 t ha⁻¹, con un precio de Bs. 5.43 por kilogramo, las familias en formación y consolidación podrían obtener Bs. 11 250 (1 614.06 USD) y 15 000 (2 152.08 USD) respectivamente, lo que modificaría sustancialmente el modelo de programación lineal de optimización. Además, si se suma un escenario de política de Estado implementada en la región desde 2021 (Patiño, 2022), que fomenta la producción de quinua orgánica, adquiriendo el producto a Bs. 11.09 (1.59 USD) el kilogramo, orientada a aumentar el consumo per cápita, que actualmente es de 2.4 kg/persona/año (CCB, 2020), la quinua se convierte en el pivote para la modelación matemática.

CONCLUSIONES

La programación lineal, calculada a través de Rstudio y Ipsolve, es una herramienta eficaz para realizar la planificación productiva familiar y maximizar los beneficios de las familias productoras del municipio de Umala. Esta optimización varía en función al tipo de familia de un 27 a 48 %, donde además de factores climáticos y productivos, depende de factores sociales como parte de las estrategias que asumen las familias productoras.

Promover la maximización de beneficios en diferentes tipos de familias generaría una mayor información a nivel de productores o instituciones, lo que permitiría una mejor toma de decisiones para la gestión de los territorios familiares, que actualmente se realiza de manera intuitiva y basada en experiencias.

El sistema productivo familiar es complejo debido a sus componentes y dinámicas, que están condicionados por factores ambientales, sociales y económicos, mismos que deben ser considerados en el análisis de optimización para acercar el modelo matemático a la realidad concreta.

BIBLIOGRAFÍA

- Alvarado, J. 2009. La programación lineal aplicación de las pequeñas y medianas empresas (en línea). Revista Reflexiones 88(1). Consultado 27 jul. 2023. Disponible en <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4796082>
- Arto, J. 2019. Modelo y optimización de los recursos de una cuenca hidrográfica. Aplicación a la cuenca del Segura (en línea). Tesis maestría. Consultado 20 nov. 2022. Disponible en https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/17161/TFM_ArtoCuesta.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Barboza-Navarro, D; Solórzano-Thompson, J; Paniagua-Molina, J. 2021. Optimización económica para el cultivo de papa, zanahoria y cebolla en Cartago, Costa Rica (en línea). Tecnología en Marcha 30(4). Consultado 02 feb. 2023. Disponible en <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10669/84829/Barboza%20et%20al%20%282021%29%20Optimizaci%C3%B3n%20econ%C3%B3mica%20papa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- CCB (Comunicadores Construyendo Bolivia). 2020. Del 2013 al 2019 el consumo per cápita de quinua subió de 1.2 a 2.4 kilogramos en Bolivia (en línea). Consultado 20 ene. 2021. Disponible en <https://www.ccb.com.bo/economia/noticia/2592/del-2013-al-2019-el-consumo-per-capita-de-quinua-subio-de-12-a-24-kilogramos-en-bolivia>
- Dujmaeva, D; Djanibekov, N; Vlik, PLG; Martius, C; Lamers, JPA. 2009. Options for Optimizing Dairy Feed Rations with Foliage of Trees Grown in the Irrigated Drylands of Central Asia (en línea). Research Journal of Agriculture and Biological Sciences 5(5): 698-708, 2009. Consultado 20 oct. 2022. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/236343263_Options_for_Optimizing_Dairy_Feed_Rations_with_Foliage_of_Trees_Grown_in_the_Irrigated_Drylands_of_Central_Asia
- FAO-BID. 2007. Políticas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe (en línea). (F. Soto Baquero, M. Rodríguez Fazzone, C. Falconi, Edits.) Santiago, Chile. Consultado 15 may. 2020. Disponible en <https://webimages.iadb.org/publications/spanish/document/Pol%C3%ADticas-para-la-agricultura-familiar-en-Am%C3%A9rica-Latina-y-el-Caribe.pdf>

- Fundación TIERRA. 2014. Políticas Diferenciadas para los distintos tipos de campesinos (en línea). Propuesta para Políticas Públicas, 1-4. Consultado 16 may. 2020. Disponible en http://www.ftierra.org/index.php?option=com_mtree&task=att_download&link_id=123&cf_id=52
- Fundación TIERRA. 2016. Políticas diferenciadas para los distintos tipos de campesinos (en línea). 15(2), 1–23. Consultado 10 dic. 2022. Disponible en http://www.ftierra.org/index.php?option=com_mtree&task=att_download&link_id=123&cf_id=52
- Herrero, M; Henderson, B; Havlík, H; Philip, K; Thornton, RT; Conant, PS; Stefan, AN; Hristov, PG; Gill, M; Butterbach-Bahl, KM; Valín, H; Garnett, T; Stehfest, E. 2016 Greenhouse gas mitigation potentials in the livestock sector (en línea). *Nature Clim Change* 6(1):452-461. Consultado 05 oct. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1038/nclimate2925>
- Helvetas Bolivia. 2021. Se propone Ley para fomento del consumo de papa en Bolivia; 25 jun 2021 (en línea). Consultado 27 ene. 2022. Disponible en https://www.helvetas.org/es/bolivia/quienes-somos/siguenos/noticias/Se-propone-Ley-para-fomento-del-consumo-de-papa-en-Bolivia_pressrelease_8219
- Hidalgo, R. 2015. Los paradigmas de la economía campesina (en línea). *Temas Sociales* (36): 165-212. Consultado 12 abr. 2021. Disponible en http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0040-29152015000100009&lng=es&tIng=es
- Lozano-Povis, A; Alvarez-Montalvan, CE; Moggiano, N. 2021. El cambio climático en los andes y su impacto en la agricultura: una revisión sistemática (en línea). *Scientia Agropecuaria* 12(1):101-108. Consultado 25 ener. 2022. Disponible en http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2077-99172021000100101
- Manzanares, E. 2018. Utilización de modelos de simulación para la gestión y manejo de ganado bovino doble propósito en condiciones de trópico seco (en línea). Tesis Lic. Universidad Autónoma del Estado de México. México. Consultado 13 feb. 2023. Disponible en <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/94597>
- Labra-Marín, D; Rayas-Amor, AA; Herrera-Hernández, EC; Martínez-García, C.; García-Martínez, A; Núñez-López, M. 2018. La optimización como herramienta para la toma de decisiones en sistemas agropecuarios en pequeña escala (en línea). *Agro Productividad* 11(11). Consultado 02 ene. 2023. Disponible en <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/articulo/view/1285/1048>
- Patiño, M. 2022. Experiencia interinstitucional en la producción orgánica de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) provincia Aroma, departamento de La Paz. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales* 9(3):97-108. Consultado 11 feb. 2023. Disponible en <https://doi.org/10.53287/grii5428hy80b>
- Parnás, M. 2020. Un modelo econométrico del ingreso monetario de los Núcleos de Agricultura Familiar en el Departamento Figueroa, Santiago del Estero, durante el año 2012 (en línea). *Estado y Sociedad*. Edición N° X. Año 2020. Centro de Estudios de Demografía y Población. Consultado 21 jul. 2021. Disponible en <https://fhu.unse.edu.ar/images/comunicacion/noticias/2021/Mariano%20Parn%C3%A1s.%20Final.pdf>
- Tito, C.; Wanderley, F. 2021. Contribución de la Agricultura Familiar Campesina Indígena a la producción y consumo de alimentos en Bolivia (en línea). La Paz. Consultado 10 jul. 2021. Disponible en http://www.iisec.ucb.edu.bo/assets/iisec/publicacion/CuadernodeInvestigacion_91_-_WEB.pdf
- Vargas, M. 2017. Apuntes sobre la agricultura familiar en Bolivia/Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (en línea). La Paz. Consultado 12 mar. 2021. Disponible en <https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/2994/BVE17068912e.pdf;jsessionid=6D39E732F1DC0B1C00BA1F5D6A760F9F?sequence=1>
- Zapata, P; Ospina-Parra, CE; Rodríguez, GA; Tapasco, J. 2023. Modelo de evaluación de tecnologías frente al cambio climático en el trópico alto de Nariño, Colombia (en línea). *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales* 10(1): 66-79. Consultado 04 ago. 2023. Disponible en <https://doi.org/10.53287/mrqm3628nk15k>

Artículo recibido en: 07 de junio del 2023

Aceptado en: 18 de agosto del 2023