

Optimización de la Producción de Quinua en la Región de Puno Usando Programación No Lineal e Inteligencia Artificial

Un estudio comparativo

F. Balarezo¹, J. Cari², M. Ponce de Leon³

Escuela Profesional de Ingeniería de Sistemas, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Perú

Abstract—El presente estudio refina un modelo de optimización para la producción de quinua en la región de Puno, una de las zonas más pobres del Perú, donde las condiciones climáticas dificultan la agricultura. La quinua, por su alto valor nutricional y su resiliencia, representa una valiosa fuente de riqueza para los habitantes del altiplano. Basado en un modelo de programación no lineal, este trabajo se enfoca en maximizar la utilidad del productor, minimizar los costos y determinar el punto de equilibrio, considerando la interacción con el mercado como una restricción clave. Para la búsqueda de la solución óptima, se implementaron y compararon dos técnicas de inteligencia artificial: los Algoritmos Genéticos (AG) y la Optimización por Enjambre de Partículas (PSO) como método alternativo. Los resultados del análisis experimental demostraron de manera concluyente la superioridad del PSO, el cual no solo encontró un valor de utilidad máxima superior, sino que también exhibió una consistencia y fiabilidad significativamente mayores a lo largo de múltiples ejecuciones. Se concluye que, aunque los Algoritmos Genéticos son una herramienta viable, el PSO se presenta como una técnica más robusta y eficaz para la optimización de problemas no lineales con restricciones en este dominio.

Keywords—*Quinoa production; optimization; productions systems; non-linear programming; genetic algorithms*

I. INTRODUCCIÓN

La quinua, considerada un superalimento por su excepcional perfil nutricional, ha ganado reconocimiento a nivel mundial gracias a sus beneficios para la salud y su versatilidad culinaria [1]. Puno, ubicada en la zona altoandina del Perú, es una de las regiones más pobres del país. Esta situación de pobreza se ve influenciada por su geografía montañosa y un clima extremo, factores que limitan tanto la actividad agrícola como las oportunidades económicas. Además, la infraestructura deficiente y el acceso limitado a servicios públicos básicos han contribuido a perpetuar condiciones de vulnerabilidad.

La economía de Puno depende principalmente de la agricultura de subsistencia y la ganadería, actividades que suelen verse afectadas por heladas y sequías. La migración hacia otras regiones en busca de mejores oportunidades es común, lo que repercute en la cohesión social y el desarrollo local [2]. La quinua es un cultivo notablemente resistente a condiciones climáticas adversas, incluyendo el frío extremo y

la escasez de agua. Originaria de la región andina, esta planta ha desarrollado adaptaciones que le permiten crecer en altitudes elevadas donde otros cultivos no sobreviven. Su bajo requerimiento hídrico la convierte en una opción viable para zonas áridas y semiáridas. Asimismo, su tolerancia al frío le permite resistir heladas, asegurando la cosecha incluso en climas severos [3]. Gracias a su alto valor nutricional y su resistencia a condiciones climáticas adversas en la región de Puno, la quinua representa una fuente invaluable de riqueza y seguridad alimentaria para las comunidades locales. Sin embargo, la producción y comercialización eficiente de este cultivo enfrenta desafíos relacionados con la complejidad de los sistemas de distribución y la variabilidad de la demanda [4].

Ante esta situación, el gobierno peruano, a través del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) con sede en Puno, ha destinado recursos para el mejoramiento genético de la quinua. El resultado más destacado de estos esfuerzos ha sido la creación de una nueva variedad denominada INIA 446-ATIPAQ, reconocida por su alta capacidad de rendimiento. Se espera que esta variedad incremente la rentabilidad económica de pequeños y medianos productores en más de un 60%.

La producción eficiente y la comercialización sostenible de este cultivo aún enfrentan desafíos significativos. Estos retos se derivan principalmente de la complejidad inherente a los sistemas de distribución y la marcada variabilidad de la demanda en la región de Puno, una de las áreas más vulnerables del Perú.

Ante este panorama, el presente estudio aborda la necesidad de una gestión más precisa y propone la formulación de un modelo de optimización robusto, basado en programación no lineal, dada su idoneidad para problemas complejos con restricciones como la interacción con el mercado para determinar el precio de venta. El objetivo central de este modelo es establecer condiciones óptimas que permitan maximizar la utilidad, minimizar los costos de producción y determinar el punto de equilibrio para los productores de quinua, proporcionando así una herramienta valiosa para la toma de decisiones informadas.

Además, para la resolución de este modelo, se han explorado y comparado diversas técnicas de Inteligencia Artificial (IA). Específicamente, se ha llevado a cabo una

replicación y análisis exhaustivo de Algoritmos Genéticos (AG), evaluando operadores como la selección sexual (SS) y la selección por torneo (ST).

Adicionalmente, se ha implementado la Optimización por Enjambre de Partículas (PSO) como un algoritmo metaheurístico comparativo, analizando su desempeño y convergencia frente a los AG para determinar cuál de ellos ofrece un mejor rendimiento en la búsqueda de soluciones óptimas.



Fig 1. Quinua INIA 446-ATIPAQ. Cortesía de la sede del INIA en Puno.

La estructura del presente es la siguiente: la Sección II describe en detalle la metodología utilizada para la formulación del modelo de optimización, así como los fundamentos y la implementación de los algoritmos genéticos y la optimización por enjambre de partículas. La Sección III presenta los resultados numéricos obtenidos del modelo de optimización para la maximización de utilidad, la minimización de costos y el punto de equilibrio, además de los hallazgos de la comparación de rendimiento y convergencia entre los Algoritmos Genéticos y PSO. Finalmente, la Sección IV ofrece la discusión y conclusiones clave derivadas del estudio.

II. METODOLOGÍA

Algoritmos Genéticos (AG)

Se implementaron con un framework de algoritmos genéticos, para replicar y extender el enfoque original del estudio. La metodología incorpora dos estrategias de selección comparativas:

- Selección por Torneo (ST): Configuración estándar donde los individuos son seleccionados mediante comparación competitiva de aptitud (tamaño de torneo = 3). Este enfoque prioriza la explotación de soluciones de alta calidad.
- Selección Sexual:

Variante bioinspirada que divide la población en dos subgrupos ("machos" y "hembras"). El cruce se restringe entre subgrupos para promover diversidad genética. La reproducción utiliza:

Styles named "Selección Sexual"

Algorithm 1: Heading

```
def cruce_personalizado(ind1, ind2):  
    if random.random() < 0.5:  
        ind1[0], ind2[0] = ind2[0], ind1[0]  
    alpha = 0.5  
    ind1[1] = (1-alpha)*ind1[1] + alpha*ind2[1]  
    ind2[1] = (1-alpha)*ind2[1] + alpha*ind1[1]  
    End
```

Parámetros Clave:

Población: 100 individuos

Generaciones: 50

Tasa de cruce: 0.65

Tasa de mutación: 0.08

Operadores de mutación: Gaussiana para variables continuas ($\sigma=5$), cambio entero para discretas

Optimización por Enjambre de Partículas (PSO)

Como contraste metaheurístico moderno, desarrollamos una variante PSO usando PySwarms, adaptada para variables mixtas:

- Representación de Partículas:
Variables continuas con discretización posterior de x_1 (área de tierra) durante evaluación.
- Función Objetivo

Styles named "Función Objetivo"

Algorithm 1: Heading

```
def funcion_objetivo_pso(particulas):  
    costos = []  
    for p in particulas:  
        x1 = np.round(p[0]) # Discretización  
        if not verificar_condiciones([x1, p[1]]):  
            costos.append(1e10) # Penalización  
        else:  
            costos.append(-calcular_utilidad(x1, p[1]))  
    return np.array(costos)
```

Configuración del Enjambre:

Partículas: 100

Iteraciones: 50

Pesos cognitivo/social: $c_1=0.5$, $c_2=0.3$

Inercia: $w=0.9$

Límites de velocidad: $\pm 20\%$ del espacio de búsqueda

Operadores de mutación: Gaussiana para variables continuas ($\sigma=5$), cambio entero para discretas

El estudio se llevó a cabo en la región de Puno, conocida por su altitud y clima adverso, lo que representa desafíos significativos para la actividad agrícola. El centro operativo se estableció en la Universidad Nacional del Altiplano de Puno, con coordenadas geográficas aproximadas de 15.8402° de latitud sur y 70.0219° de longitud oeste. Esta ubicación estratégica permitió el acceso directo a recursos académicos y conocimientos locales en producción agrícola, especialmente en investigación y desarrollo de la quinua, un cultivo de gran relevancia económica y cultural en la región.

Además, la proximidad a los terrenos agrícolas del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), ubicados en el distrito de Salcedo, así como a los agricultores locales, facilitó la recolección de datos en campo y la implementación práctica de las estrategias propuestas, enriqueciendo así los resultados del estudio y asegurando que las soluciones desarrolladas fueran coherentes con las condiciones reales de producción en Puno.

Formulación del modelo de optimización

El primer paso para formular un modelo de optimización no lineal es definir claramente el objetivo del problema y el contexto en el que se aplica. La optimización no lineal suele aplicarse a problemas complejos donde la relación entre las variables no es lineal, lo que la distingue de los métodos lineales tradicionales [5]. En este caso, se busca maximizar las ganancias, minimizar los costos y encontrar el punto de equilibrio que indique cuándo no se tienen ni pérdidas ni beneficios.

Las variables de decisión son aquellos elementos que se controlan para alcanzar un objetivo óptimo. En un modelo de optimización no lineal, estas pueden incluir cantidades de recursos, niveles de producción y precios, donde los cambios en dichas variables influyen de manera no lineal sobre la función objetivo y las restricciones [6].

La función objetivo es la expresión matemática que debe maximizarse o minimizarse. En muchos casos industriales y económicos, dicha función es no lineal debido a características de costos o ingresos que no aumentan de forma constante. Las formas comunes incluyen funciones cuadráticas y exponenciales que representan rendimientos o costos de escala [7]. Las restricciones definen los límites dentro de los cuales debe encontrarse la solución óptima. En la programación no lineal, las restricciones también pueden ser no lineales y estar relacionadas con capacidades de recursos, limitaciones tecnológicas o condiciones del mercado [5].

Una vez que el modelo se resuelve en función de un sistema de ecuaciones, las variables y constantes deben satisfacer las condiciones de Kuhn-Tucker, es decir, deben ser mayores o iguales a cero. Después de obtener una solución numérica, el modelo debe validarse utilizando datos reales para evaluar su efectividad. Este proceso asegura que el modelo no solo sea matemáticamente correcto, sino también útil y aplicable en contextos reales, lo cual es esencial para la toma de decisiones prácticas [5].

III. RESULTADOS

Según información del INIA, se tiene:

Maximización de la utilidad

Al integrar estos elementos en el modelo de optimización, se busca no solo maximizar la rentabilidad, sino también promover prácticas agrícolas responsables y contribuir al bienestar de los agricultores locales. De este modo, la investigación se alinea con los objetivos de desarrollo sostenible, promoviendo un enfoque integral para la comercialización de la quinua en la región de Puno [8].

Este modelo se define como la diferencia entre las ventas realizadas y los costos de producción. Para simplificar, los valores numéricos han sido reducidos dividiéndolos entre mil. El objetivo es encontrar el máximo global en un modelo formal de programación no lineal, de modo que el productor pueda tomar decisiones más informadas para maximizar las ganancias y minimizar las pérdidas [9].

$$\text{Utilidad} = \text{Ventas} - \text{Costos de Producción} \quad (1)$$

Los costos de producción de la quinua consisten principalmente en mano de obra e insumos. Según la información proporcionada por la sede de INIA Puno, los costos de producción ascienden a S/. 13,242.29.

$$\text{Costes} = 13242,00 * \text{Hectáreas} \quad (2)$$

Las ventas están representadas por la producción por hectárea. Según información del INIA Puno, esta es de 1,200.00 kg por hectárea, multiplicado por el número de hectáreas cultivadas y el precio de venta en el mercado. El objetivo de este modelo innovador es determinar a qué precio de venta se alcanza la utilidad máxima.

$$\text{Ventas} = 1200 * \text{Hectáreas} * \text{Precio de Venta} \quad (3)$$

Por lo tanto:

- X_1 : superficie cultivada en hectáreas
- X_2 : precio de venta
- X_3 : demanda (mercado actual)
- X_4 : producción de la competencia

$$\text{Max } Z = 1.2 \cdot x_1 \cdot x_2 - 13.2 \cdot x_1 \quad (4)$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

1. $x_1 < 100$ (Tierra disponible 'hectáreas')

2. $x_3 \leq 150$ (Demanda Maxima)
3. $x_2 \leq PP + PP - (20.4x_1/x_3) + 17x_4$
(Relación Precio -Demanda)
4. $x_4 = 0.25$

Nota: Sea PP el precio de venta = S/. 17.00 (facilitado por INIA sucursal de Puno)

Con esto, se propone el Lagrangiano, el cual debe satisfacer las condiciones de Kuhn-Tucker:

$$L = (1.2 \cdot x_1 \cdot x_2 - 13.2 \cdot x_1) + \lambda_1(100 - x_1) + \lambda_2(150 - x_3) + \lambda_3(34 - 20.4 \cdot x_1/x_3 + 17 \cdot x_4 - x_2) + \mu_1(x_4 + 0.25)$$

Para encontrar el máximo, se deriva la función L con respecto a cada variable y se iguala a cero.

$$\frac{\partial L}{\partial x_1} = 1.2x_2 - 13.2 - \lambda_1 - \lambda_3 \frac{20.4}{x_3} = 0 \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial L}{\partial x_2} = 1.2x_1 - \lambda_2 = 0 \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial L}{\partial x_3} = \lambda_3 \frac{20.4}{x_3} - \lambda_2 = 0 \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial L}{\partial x_4} = 17\lambda_3 + \mu_1 = 0 \quad (4.4)$$

A estas se sumaron las condiciones de holgura complementaria, que dictan que un multiplicador de una restricción de desigualdad es cero si la restricción no es activa (es decir, si no se cumple como una igualdad estricta).

Se resolvió el sistema de ecuaciones asumiendo que para maximizar la utilidad, las restricciones de tierra (x_1) y demanda (x_3) serán activas.

De la restricción 4, directamente se tiene que:

$$x_4 = 0.25$$

Asumiendo que la restricción 1 es activa, entonces $x_1 = 100$, se puede usar la ecuación (4.2):

$$1.2(100) - \lambda_2 = 0 \Rightarrow \lambda_2 = 120$$

Debido a que $\lambda_3 > 0$, la restricción 3 (precio de venta) debe ser activa.

Se asumió que la demanda está en su máximo, por lo que la restricción 2 es activa

$$x_3 = 150$$

Una vez que se definió que la restricción de precio es activa, se usó para encontrar x_2 sustituyendo en:

$$x_2 = 34 - \frac{20.4(100)}{150} + 17(0.25)$$

$$x_2 = 24.65$$

Este es el precio de venta óptimo, S/. 24.65. Luego sustituyendo en la función objetivo:

$$Max Z = 1.2 \cdot (100) \cdot (24.65) - 13.2 \cdot (100)$$

$$\Rightarrow Max Z = 1,638$$

La utilidad máxima de S/1,638,000.00 se alcanza cuando el precio de venta es de S/24.65.

Punto de equilibrio

En términos simples, es el punto en el que los ingresos totales igualan a los costos totales, sin que se generen ni pérdidas ni ganancias. Este concepto es especialmente útil para las empresas al evaluar el impacto de los cambios en los costos y los precios de venta sobre las unidades necesarias para alcanzar la rentabilidad. Conocer este punto permite a los gestores determinar cuántas unidades deben venderse para cubrir los costos, y proporciona una base para tomar decisiones estratégicas sobre precios, costos y expansión del mercado, contribuyendo así a la sostenibilidad y rentabilidad a largo plazo de la empresa [10].

Para el punto de equilibrio, se considera la siguiente ecuación:

$$Z = 1.2 \cdot x_1 \cdot x_2 - 13.2 \cdot x_1 \quad (5)$$

Igualando a Cero:

$$1.2 \cdot x_1 \cdot x_2 - 13.2 \cdot x_1 = 0 \quad (5)$$

Resolviendo para el precio de Venta (x_2), tomando en cuenta que las hectáreas cultivadas son mayores que cero, se simplifica la ecuación dividiendo ambos lados por x_1

$$1.2x_2 - 13.2 = 0$$

$$1.2x_2 = 13.2$$

$$x_2 = \frac{13.2}{1.2} = 11$$

Esto indica que el punto de equilibrio se alcanza cuando el precio mínimo de venta es S/. 11.00. Es decir, se debe vender al menos a S/. 11.00 para no incurrir en pérdidas.

Minimización de costos

La minimización de costos es un objetivo clave para cualquier organización que busque mejorar su eficiencia operativa y maximizar su rentabilidad. Este proceso implica identificar y reducir gastos innecesarios, al mismo tiempo que se optimiza el uso de los recursos sin comprometer la calidad del producto o servicio. Herramientas como el análisis de costos, la programación lineal y la implementación de tecnologías digitales ofrecen enfoques eficaces para alcanzar estos objetivos [11].

Muchos autores mencionan que el enfoque de la optimización debe centrarse en la minimización de costos, ya que el mercado es tiránico y resulta difícil influir en el precio de venta. Para formular el modelo de minimización, es necesario analizar la estructura de costos proporcionada por el INIA en la Tabla A1 en los anexos, donde también se muestra la variable asignada para el modelo de minimización de costos.

Por lo tanto, el modelo propuesto de minimización de costos es el siguiente:

$$\text{Min } Z = x_1 \cdot x_2 + 1237 \cdot x_3 + 70 \cdot x_4 + 5.8 \cdot x_5 + 45 \cdot x_6 + 75.38 \cdot x_7 + 21.67 \cdot x_8 + 325 \cdot x_9 + 3.65 \cdot x_{10} + 11940 \cdot x_{11} + 7822 \cdot x_{12} \quad (6)$$

Sujeto a las restricciones:

$$x_1 \leq 125$$

$$x_3 = 1.325$$

$$x_4 \geq 20$$

$$x_5 = 311$$

$$x_6 = 1.5$$

$$x_7 = 3.25$$

$$x_8 \geq 20$$

$$x_9 = 2$$

$$x_{10} \geq 50$$

$$x_{11} = 0.05$$

$$x_{12} = 0.09$$

Según entrevistas con expertos, es muy difícil prescindir de alguno de los factores involucrados en la producción de quinua, por lo que se ha optado por reducir el costo de la jornada laboral, lo cual también es coherente con las costumbres del Ayni. Por lo tanto, al resolver el modelo, se encuentra que el costo mínimo de la jornada laboral podría reducirse a S/. 41.20.

Algoritmos genéticos y búsqueda metaheurística

Los algoritmos genéticos son técnicas de búsqueda que tienen su origen en la biología, a través del proceso de selección natural [12]. Estos algoritmos comienzan con una población inicial de soluciones, también conocidas como individuos o cromosomas, que evolucionan con el tiempo. Seleccionan a los individuos más aptos para la reproducción según una función de aptitud que evalúa su desempeño. Posteriormente, los individuos se combinan para producir

nueva descendencia, usualmente mediante un proceso llamado cruce, en el cual los padres intercambian su material genético. También se introducen pequeñas mutaciones aleatorias en algunos descendientes, con el fin de mantener la diversidad genética. Los nuevos individuos pueden reemplazar a toda la población anterior o solo a una parte de ella. La forma específica en que se realiza este reemplazo está definida por las estrategias contenidas en el propio algoritmo [13].

TABLA I. PARÁMETROS RECOMENDADOS PARA ALGORITMOS GENÉTICOS

PARÁMETRO	VALOR
Parámetro	Valor
Tamaño de población	20,100,200,400
Probabilidad de cruce	0.65
Probabilidad de mutación	0.08

La función de aptitud para maximizar la producción se muestra en el siguiente pseudocódigo:

Función aptitud(X1, X2)

retornar $1200 \cdot X1 \cdot X2 - 13200.00 \cdot X1$

Debido a que se trata de un problema de programación no lineal con restricciones, es necesario realizar comparaciones para verificar si el valor de aptitud cumple con ciertas condiciones, según la siguiente función:

Función condición(X, Y, Z)

$X4 = 0.25$

si $(X \leq 100 \ \&\& \ Z \geq 0 \ \&\& \ Y \leq 34 - (20.4 \cdot X)/Z + 17 \cdot X4 \ \&\& \ Z \leq 150)$

retornar verdadero;

si no

retornar falso;

Para evaluar y comparar el rendimiento del Algoritmo Genético (AG) y el Optimizador por Enjambre de Partículas (PSO), se realizó un experimento computacional. Cada algoritmo fue ejecutado un total de 20 veces para asegurar la robustez estadística de los hallazgos. El objetivo era determinar qué técnica ofrecía una solución superior para el problema de optimización de la utilidad. Se analizaron tanto las métricas cuantitativas como las tendencias de convergencia visual.

El análisis cuantitativo revela una ventaja en favor del algoritmo PSO. La Tabla 2 resume las estadísticas descriptivas de la utilidad máxima obtenida en las 20 ejecuciones. El PSO alcanzó una utilidad promedio superior (1636.45) en comparación con el AG (1629.06). Adicionalmente, el valor máximo de utilidad encontrado por el PSO (1637.89) fue mayor que el máximo del AG (1634.89).

Es de particular importancia la consistencia de los algoritmos. El PSO demostró ser más fiable, con una

desviación estándar de apenas 1.88. Este valor es significativamente menor a la desviación estándar del AG, que fue de 4.69. Dicha diferencia indica que el PSO converge de manera más predecible a soluciones de alta calidad en distintas ejecuciones.

TABLA II. RESUMEN ESTADÍSTICO DE LA UTILIDAD MÁXIMA ENCONTRADA TRAS 20 EJECUCIONES.

Algoritmo	Utilidad Media	Desv. Estandar	Utilidad Mínima	Utilidad Máx.
AG	1629.06	4.69	1616.68	1634.89
PSO	1636.45	1.88	1629.03	1637.89

La superioridad en consistencia del PSO se confirma visualmente. La distribución de los resultados de las 20 ejecuciones se presenta en un diagrama de cajas en la Figura 1. Se observa que el rango intercuartílico del PSO es considerablemente más compacto que el del AG. Esto refuerza la evidencia de que el PSO es un optimizador más robusto para este problema.

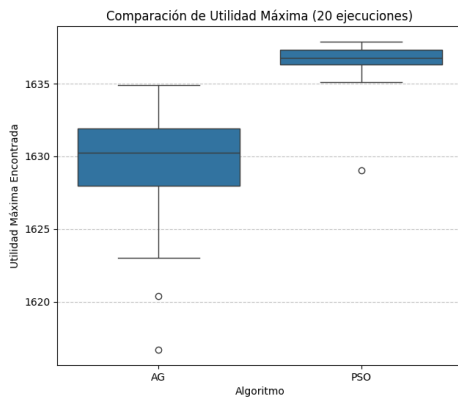


Fig. 2 Gráfico de Boxplot (AG vs PSO)

Para analizar la eficiencia de la búsqueda, se graficó la convergencia promedio de ambos algoritmos en la Figura 2. Este gráfico ilustra la evolución de la mejor solución encontrada a lo largo de las generaciones (para AG) o iteraciones (para PSO). Permite comparar visualmente la velocidad con la que cada algoritmo se aproxima a la solución óptima.

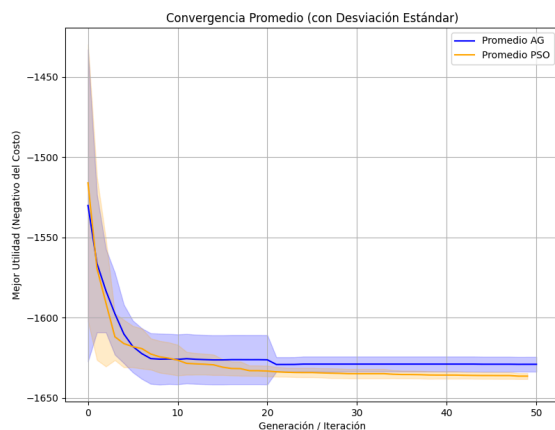


Fig 3. Gráfico de Convergencia Promedio

Al examinar la mejor solución global de todo el experimento, el PSO nuevamente obtuvo el mejor resultado. El algoritmo encontró una utilidad máxima de S/. 1637.89, correspondiente a una asignación de 100 hectáreas para x_1 y un precio de S/. 24.65 para x_2 . Por su parte, la mejor corrida del AG arrojó una utilidad máxima de S/. 1634.89. La solución del PSO no solo es superior en magnitud, sino que también utiliza la totalidad de hectáreas disponibles, una estrategia intuitiva para la maximización.

IV. CONCLUSIONES

El presente trabajo implementó un modelo de optimización para la producción de quinua, validando la aplicación de técnicas matemáticas y de inteligencia artificial para maximizar la rentabilidad de este cultivo vital para la región de Puno. Siguiendo el objetivo de mejorar el análisis, se implementó un Algoritmo Genético (AG) basado en los parámetros del estudio y se introdujo un Optimizador por Enjambre de Partículas (PSO) como técnica comparativa. La finalidad fue determinar qué método ofrecía una mayor eficacia y fiabilidad para resolver el problema no lineal con restricciones.

Los resultados del análisis comparativo demostraron de manera concluyente que el algoritmo PSO fue superior al AG para este problema específico. El PSO no solo alcanzó una utilidad máxima promedio más alta en 20 ejecuciones, sino que también encontró la mejor solución global, con una utilidad de S/. 1637.89. Esta cifra se aproxima de manera más precisa al óptimo teórico, superando el mejor resultado obtenido por el AG.

Más allá de la eficacia en la maximización, el hallazgo más significativo fue la fiabilidad del PSO. Este algoritmo exhibió una desviación estándar considerablemente menor que la del AG, lo que indica una alta consistencia en sus resultados. Dicha robustez es una característica fundamental para su aplicación en el mundo real, ya que asegura que las decisiones tomadas a partir del modelo serán predeciblemente buenas, minimizando el impacto de la aleatoriedad.

En síntesis, si bien el modelo de programación no lineal del estudio original establece un marco válido para la optimización de la producción de la quinua INIA 446-ATIPAQ, este trabajo demuestra que la elección del algoritmo de optimización es crítica. El Optimizador por Enjambre de Partículas (PSO) no solo es una técnica viable, sino que se posiciona como la herramienta más eficaz y fiable para maximizar la utilidad de los productores, cumpliendo así con el objetivo de mejorar y refinar las soluciones tecnológicas para el sector agrícola.

REFERENCIAS

- [1] J. Hernández Rodríguez, "La quinua, una opción para la nutrición del paciente con diabetes mellitus," *Rev. Cuba. Endocrinol.*, vol. 26, no. 3, p. 0, 2015
- [2] INEI, "Encuesta Nacional de hogares sobre condiciones de vida y pobreza," 2020.
- [3] K. S. Murphy and J. Matanguihan, *Quinoa: Improvement and sustainable production*. New York: John Wiley & Sons, 2015.
- [4] A. Carimentrand, A. Baudoin, P. Lacroix, D. Bazile, and E. Chia, "Las dinámicas de comercialización de la quinua en los países andinos: ¿qué

- oportunidades y retos para la agricultura familiar campesina?” Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le ..., 2014.
- [5] M. S. Bazaraa, H. D. Sherali, and C. M. Shetty, “Lagrangian duality and saddle point optimality conditions,” *Nonlinear Program. Theory Algorithms*, pp. 199–242, 2013.
 - [6] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex optimization*. Cambridge university press, 2004.
 - [7] S. J. Wright, “Numerical optimization.” 2006.
 - [8] N. Y. Mannarino, “Agricultura responsable e impuestos provinciales,” 2020.
 - [9] D. Bertsimas, K. O. Allison, and W. R. Pulleyblank, *The analytics edge*. Dynamic Ideas LLC Belmont, MA, USA, 2016.
 - [10] J. J. Weygandt, P. D. Kimmel, and D. E. Kieso, *Financial accounting*. John Wiley & Sons, 2019.
 - [11] F. Hillier and G. Lieberman, “Introduction to Operations Research with Student Access Card.” McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 2010.
 - [12] M. G. Pose, “Introducción a los algoritmos genéticos,” *Dep. Tecnol. la Inf. y las Comun. Univ. Coruña*, 2000.
 - [13] D. E. Golberg, “Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Addison Wesley,” Reading, 1989.

ANEXO A

TABLA A1

Descripción de variables para la función de costo

DESCRIPCIÓN DEL COSTO	Variable	Unidad de medida	Cantidad	Costo unitario (S/.)	Costo total (S/.)
A. Costos Directos					11,968.41
1. Costos de Producción					11,398.49
1.1. Actividades con mano de obra directa					6,522.50
ANÁLISIS DE SUELOS	X1				22.50
Toma de muestras de suelo		jornada	0.50	45.00	22.50
PREPARACIÓN DEL TERRENO	X1				
Extracción y recolección de piedras		jornada	2.00	45.00	90.00
Distribución de estiércol en el suelo		jornada	4.00	45.00	160.00
Asistente del operador de tractor		jornada	2.50	45.00	112.50
SIEMBRA Y FERTILIZACIÓN	X1				
Aplicación de herbicida		jornada	2.00	45.00	90.00
Mezcla de fertilizantes		jornada	0.50	45.00	22.50
Desinfección de semillas		jornada	0.50	45.00	22.50
Preparación de camas de surcos		jornada	1.00	45.00	45.00
Siembra manual		jornada	3.00	45.00	135.00
Aplicación de fertilizantes		jornada	1.50	45.00	67.50
Tapado manual		jornada	1.00	45.00	45.00
LABORES CULTURALES	X1				
Control ornitológico (emergencia)		jornada	4.00	45.00	180.00
1° Deshierbo		jornada	12.00	45.00	540.00
1° Eliminación de plantas fuera de tipo y raleo		jornada	2.00	45.00	90.00
Apertura de drenes		jornada	1.00	45.00	45.00
Fertilización complementaria		jornada	1.00	45.00	45.00
Aporque		jornada	10.00	45.00	450.00
Operador de maquinaria		jornada	1.00	45.00	45.00
1° Tratamiento fitosanitario		jornada	2.00	45.00	90.00
Control ornitológico		jornada	20.00	45.00	900.00
2° Deshierbo		jornada	6.00	45.00	270.00
Control de heladas		jornada	1.00	45.00	45.00
2° Tratamiento fitosanitario		jornada	2.00	45.00	90.00
Control de granizo		jornada	1.00	45.00	45.00
Selección de granos		jornada	2.00	45.00	90.00
COSECHA	X1				
Recolección de panojas seleccionadas		jornada	2.00	45.00	90.00
2° Clasificación		jornada	3.00	45.00	135.00
Instalación de carpas de secado		jornada	1.00	45.00	45.00

Asistentes de trilla		jornada	2.00	45.00	90.00
Transporte del grano al almacén		jornada	1.00	45.00	45.00
Secado de grano y desbrozado		jornada	2.00	45.00	90.00
Envasado y costura		jornada	2.00	45.00	90.00
Apilado de sacos		jornada	0.50	45.00	22.50
Carga y descarga en Tahuaco y Salcedo		jornada	2.00	45.00	90.00
POST-COSECHA	X1				
Operador de selección		jornada	2.00	45.00	90.00
Envasado y pesado en planta de procesamiento		jornada	1.00	45.00	45.00
Carga y descarga en almacén		jornada	1.00	45.00	45.00
Envasado y pesado en almacén		jornada	1.00	45.00	45.00
Etiquetado y costura		jornada	1.00	45.00	45.00
Almacenamiento		jornada	1.00	45.00	45.00
Pesado y carga		jornada	1.50	45.00	67.50
Pesado, etiquetado, costura y apilado		jornada	1.00	45.00	45.00
ASISTENCIA TÉCNICA	X3				
Asistencia Técnica del RESIDENTE		tiempo/persona	0.10	2,100.00	210.00
Asistencia del TÉCNICO AGRÍCOLA		tiempo/persona	0.225	1,800.00	405.00
ASISTENTE DE CAMPO (Participación)		tiempo/persona	1.00	1,025.00	1,025.00
1.2 MAQUINARIA Y EQUIPOS		Kg	96.00	5.49	527.04
Arado (Tractor agrícola con arado)		Kg	90.00	4.80	432.00
AGROQUÍMICOS					
Metalaxil + Mancozeb + C7 Fungicida (Hieloxil, Hieloxil Mix 72, RIDOMIL GOLD 68 WP)	X6	Kg	1.50	45.00	67.50
Lambda cihalotrina Insecticida (Aikido, Lamdex, Karate Zeon, Real)	X7	litro	1.00	150.00	150.00
Mancozeb 100% Fungicida (Manzate, Mancozeb, Aikido, Lamdex)	X7	litro	2.00	45.00	90.00
Alcohol Polivinílico Adhesivo agrícola (Adherente, Hampifol, Taxi Wett, Asperwet)	X7	litro	0.25	20.00	5.00
1.3 INSUMOS ALIMENTICIOS		horas/máquina	5.00	70.00	350.00
Semilla CERTIFICADA					
FERTILIZANTES	X5				
Fosfato diamónico		Kg	10.00	20.00	200.00
Cloruro de potasio	X5				
Urea		Kg	115.00	5.53	635.95
1.4 OTROS COMBUSTIBLES					
Gasolina	X8				
Diesel		galón	10.00	23.00	230.00
PROCESAMIENTO Y CERTIFICACIÓN		galón	20.00	21.00	420.00
Servicio de certificación	X9				

Materiales para tarjetas de certificación		servicio	1.00	470.00	470.00
OTROS		servicio	1.00	180.00	180.00
Cohetes antigranizo (Tecnología adoptada por el INIA para la prevención de granizo)	X10				
Fósforo		docena	1.00	45.00	45.00
Azufre		unidad	1.00	1.00	1.00
Plástico para cobertura		Kg	0.50	20.00	10.00
Carpas de secado		metro	50.00	4.00	200.00
Cobertores para distribución de estiércol		unidad	5.00	10.00	50.00
Palos		unidad	4.00	5.00	20.00
Rafia		unidad	3.00	15.00	45.00
Sacos		unidad	2.00	2.00	4.00
Agujas		unidad	50.00	2.00	100.00
Sacos con logo		unidad	1.00	1.00	1.00
2. GASTOS GENERALES		unidad	40.00	2.50	100.00
Contingencias (5% de los costos de producción)	X11				
B. COSTOS INDIRECTOS		otra	0.05	11,940	597.05
Gastos administrativos (5% de los costos directos)	X12				
Servicio de asistencia técnica del especialista (3% del sueldo mensual)		otra	0.05	12,538	626.90
Depreciación (1% de maquinaria y equipos)		otra	0.03	2,100.00	63.00
1.4 OTROS COMBUSTIBLES		otra	0.01	1,435.00	14.35
COSTOS TOTALES					S/. 13,242.29