



Eficiencia nutricional de cultivos agrícolas en Perú: Accesibilidad económica de proteína y energía (1997–2025)

Nutritional Efficiency of Agricultural Crops in Peru: Economic Accessibility of Protein and Energy (1997–2025)

Gorki Llerena¹; Felipe de Mendiburu¹

¹ Facultad de Encomia y Planificación, Universidad Nacional Agraria La Molina, Av. Universitaria S/N, Lima, Perú.

* Autor corresponsal: fmendiburu@lamolina.edu.pe (F. de Mendiburu).

ORCID de los autores:

G. Llerena: <https://orcid.org/0000-0002-6851-8872>

F. de Mendiburu: <http://orcid.org/0000-0003-2725-5911>

RESUMEN

La seguridad alimentaria exige evaluar tanto el valor nutricional como la accesibilidad económica de los alimentos. Este estudio propone un enfoque para analizar la eficiencia nutricional (proteica y energética) de 17 cultivos agrícolas en Perú durante el período 1997–2025, comparando productos tradicionales frente a granos y tubérculos andinos mediante el indicador de gramos de proteína y kilocalorías por unidad monetaria (precios en chacra). Utilizando modelos lineales mixtos, análisis de tendencias y clasificación funcional, se evaluó la interacción entre el período y el tipo de cultivo. Los resultados mostraron diferencias significativas ($p < 0,001$). Los granos andinos alcanzaron una eficiencia proteica comparable a la de los cultivos tradicionales, mientras que los tubérculos andinos registran menor eficiencia. En contraste, los cultivos tradicionales lideraron la eficiencia energética, seguidos por los granos y tubérculos andinos. Se concluye que la eficiencia nutricional es un indicador robusto para medir la accesibilidad económica. Asimismo, el uso de series históricas de precios de origen constituye una herramienta estratégica para la planificación agrícola, las políticas públicas y el fortalecimiento de la seguridad alimentaria.

Palabras clave: Seguridad alimentaria; Eficiencia nutricional; Cultivos andinos; Modelos lineales mixtos; Clasificación funcional.

ABSTRACT

Food security requires evaluating both the nutritional value and the economic accessibility of food. This study proposes an approach to analyze the nutritional efficiency (protein and energy) of 17 agricultural crops in Peru during the 1997–2025 period, comparing traditional products with Andean grains and tubers using indicators of protein grams and kilocalories per monetary unit (farmgate prices). Using linear mixed models, trend analysis, and functional classification, the interaction between time period and crop type was evaluated. The results showed significant differences ($p < 0,001$). Andean grains achieved protein efficiency comparable to traditional crops, whereas Andean tubers exhibited lower efficiency. In contrast, traditional crops led in energy efficiency, followed by Andean grains and tubers. In conclusion, nutritional efficiency constitutes a robust indicator for assessing economic accessibility. Furthermore, the use of historical series of farmgate prices represents a strategic tool to support agricultural planning, public policy formulation, and the strengthening of food security.

Keywords: Food security; Nutritional efficiency; Andean crops; Linear mixed models; Cluster functional.

Recibido: 21-07-2026.

Aceptado: 02-10-2026.



Esta obra está publicada bajo la licencia [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

INTRODUCCIÓN

La eficiencia nutricional, analizada desde la economía agrícola y la seguridad alimentaria, mide la cantidad de aporte nutritivo (energía, proteínas, vitaminas y minerales) que un consumidor puede obtener por cada unidad monetaria invertida. A nivel mundial, la demanda de proteínas de origen vegetal ha experimentado un aumento drástico en los últimos años, impulsada por su potencial para sustentar dietas sostenibles y saludables (Allotey, D. et al., 2026), estudios a determinado que las leguminosas son fuente rica en proteínas, pero actualmente se utiliza muy poco en la dieta humana (Semba, H. et al., 2021), el interés por los alimentos saludables de origen vegetal y los suplementos alimenticios ha aumentado en los últimos tiempos como agentes potenciales para el mantenimiento de la salud y la prevención en el tratamiento de enfermedades (Devkota, H. et al., 2021). La evaluación comparativa de la eficiencia nutricional entre diversos productos agrícolas (como granos y tubérculos andinos frente a cereales tradicionales) puede abordar dos dimensiones analíticas principales:

1. Rendimiento por costo invertido (Nutriente/Precio): evalúa la cantidad de proteína o kilocalorías obtenidas por cada sol (S/.) gastado en el producto agrícola.
2. Contenido nutricional versus eficiencia económica: un alimento puede poseer una densidad nutricional excepcionalmente alta (como la quinua o la kiwicha); sin embargo, si su precio de mercado es elevado, su eficiencia económica por sol disminuye respecto a cultivos con menor densidad nutricional pero mayor accesibilidad económica (como el arroz, el haba, el trigo, la cebada o la papa).

El Perú es reconocido globalmente como uno de los principales centros de biodiversidad agrícola, al albergar una amplia variedad de cultivos nativos que han sustentado históricamente la alimentación de su población. Los cultivos andinos, que comprenden granos, tubérculos, frutales y especies aromáticas o medicinales, poseen un notable potencial para la agregación de valor y transformación industrial (Jacobsen et al., 2003). Entre ellos destacan los granos andinos (quinua, kiwicha, cañihua y tarwi) y los tubérculos andinos (papa, oca, olluco y mashua), caracterizándose los primeros como fuentes clave de proteína vegetal y los segundos como fuentes fundamentales de energía (Ayala, 2004).

A pesar de este potencial, el desconocimiento del valor nutricional de los cultivos andinos ha propiciado transiciones dietéticas marcadas por la sustitución de alimentos tradicionales por productos ultra procesados, con repercusiones

negativas directas en la salud poblacional (Guacho et al., 2023). Al respecto, Ordinola et al. (2022) señalan que las estrategias nacionales para combatir la desnutrición deben complementarse con intervenciones integradas de agricultura y nutrición, orientadas a desarrollar y validar enfoques creativos e innovadores en las zonas más remotas del Perú. Según INEI (2022) la desnutrición crónica afectó al 11,7% de la población menor de cinco años.

En las últimas décadas, los sistemas alimentarios han experimentado transformaciones profundas impulsadas por el acelerado proceso de urbanización, la globalización de los mercados y los cambios en los patrones de consumo, exigiendo diversos enfoques para abordar la seguridad alimentaria como pilar de la sostenibilidad (Ramírez et al., 2020). No obstante, gran parte de la literatura académica se ha concentrado de manera aislada en la composición nutrimental de los alimentos, prestando menor atención a la relación dinámica entre el valor nutricional y la eficiencia económica de acceso a dichos nutrientes. En particular, existe una brecha de evidencia empírica sobre la evolución temporal de la eficiencia proteica y energética de los cultivos tradicionales y andinos a partir de series históricas de precios agrícolas.

Dado que la composición nutricional por sí sola no garantiza el acceso real de las familias a los nutrientes, puesto que dos alimentos con contenido proteico similar pueden diferir drásticamente en la cantidad que una familia puede adquirir con un mismo presupuesto, la eficiencia nutricional surge como un indicador sintético y complementario que integra la calidad nutricional y el costo económico.

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo evaluar la evolución temporal (1997–2025) de la eficiencia proteica y energética de cultivos agrícolas mediante modelos mixtos y análisis funcional de datos, identificando diferencias entre grupos de productos y patrones de comportamiento en el tiempo. La investigación parte de la hipótesis de que la eficiencia nutricional difiere de forma significativa entre los cultivos tradicionales, los granos andinos y los tubérculos andinos a lo largo del período analizado. Para ello, se evalúan las series de precios en chacra y los indicadores de eficiencia nutricional construidos a partir de las tablas de composición de alimentos, analizándose las tendencias temporales y la clasificación de los cultivos para formular recomendaciones sobre aquellos productos de mayor eficiencia socioeconómica y nutricional.

METODOLOGÍA

El presente estudio analiza la relación entre el costo de adquisición de los productos agrícolas y su aporte nutricional, permitiendo evaluar la accesibilidad y eficiencia de la dieta a nivel regional (FAO et al., 2020; Herforth et al., 2020).

La densidad nutricional en función del valor monetario constituye una métrica clave para identificar alimentos de alto valor nutricional a un menor precio relativo (Darmon & Drewnowski, 2015; Drewnowski, 2010).

Fuentes de datos y muestra de alimentos

Para la caracterización del valor nutricional, se utilizó la información técnica oficial de las Tablas Peruanas de Composición de Alimentos (CENAN/INS, 2017). La muestra incluye productos agrícolas representativos de la canasta alimenticia del Perú, tanto tradicionales (arroz, trigo, cebada, lenteja, arveja, pallar y frijol) como andinos (tubérculos: papa, oca, olluco y mashua; granos andinos: quinua, kiwicha, cañihua y tarwi; además de habas y choclo).

Los datos económicos se obtuvieron de las series oficiales de precios corrientes en chacra de las Gerencias Regionales de Agricultura de Arequipa, con 484 registros (29 años en 17 cultivos), y La Libertad, con 384 registros (25 años en 16 cultivos). Ambas regiones fueron seleccionadas por su nivel tecnológico y su representatividad en los polos productivos del sur y norte del país, respectivamente. La omisión de otras regiones se justifica por la falta de series continuas en origen, condicionada por la informalidad comercial, el autoconsumo o el desvío directo a canales mayoristas e industriales.

Aunque los registros abarcan el periodo 1997–2025 para el modelamiento mixto, el análisis funcional y de conglomerados (clusters) se restringió estrictamente al periodo 2001–2023. Esto permitió disponer de una base de datos balanceada y continua, descartando los intervalos con carencia de información (1997–2000 y 2024–2025) que comprometerían la estabilidad del agrupamiento.

Indicadores eficiencia económico-nutricional

A partir de la composición nutricional por cada 100 g de alimento (Tabla 1) y de los precios en chacra promedio anuales, se construyeron dos indicadores de eficiencia cuantitativa:

a) Eficiencia Proteica (EP)

Representa la cantidad en gramos (g) de proteína adquirida por cada unidad monetaria (1 sol, PEN) invertida en el producto agrícola:

$$EP = \frac{10 \cdot q}{p} \quad (1)$$

Donde EP: Eficiencia proteica (g de proteína/sol); p: Precio promedio anual del producto agrícola en chacra (soles/kg); 10: Factor de conversión (1000 g/kg / 100 g).

b) Eficiencia energética (EE)

Representa la cantidad de energía en kilocalorías (kcal) adquirida por cada sol invertido en el producto agrícola:

$$EE = \frac{10 \cdot k}{p} \quad (2)$$

Donde EE: Eficiencia energética (kcal/sol); p: Precio promedio anual del producto agrícola en chacra (soles/kg); k: Aporte energético en kilocalorías por cada 100 g del producto (Tabla 1).

Análisis estadístico y modelos de estimación

Se realizó un análisis exploratorio de datos para calcular estimaciones puntuales e intervalos de confianza de las medidas de tendencia central y dispersión para cada grupo de cultivo a lo largo del tiempo.

Tabla 1

Composición nutricional en 100 g del producto agrícola de alimento comestible

Productos	Proteína (%)	kcal
Tradicional		
arroz con cascara	5,9	332
arveja	21,7	247
cebada con cascara	8,4	284
trigo	10,3	289
lenteja	23,2	214
pallar	20,4	253
frijol	21,9	236
Grano andino		
cañihua	15,4	382
kiwicha	12,8	351
quinua	13,6	351
tarwi	17,3	277
haba	11,3	134
choclo	3,3	104
Tuberculo andino		
mashua	0,7	32
oca	0,9	28
olluco	1,1	59
papa	2,1	77

Fuente: Con base en las Tablas Peruanas de Composición de Alimentos CENAN/INS, 2017).

a) Modelos Lineales Mixtos (LMM)

Siguiendo metodologías econométricas aplicadas al análisis espacio-temporal de la eficiencia nutricional (Masters et al., 2018), se ajustaron modelos lineales de efectos mixtos empleando la función lmer del paquete lme4 en R (Bates et al., 2015). Las variables dependientes corresponden a los indicadores de eficiencia (EP y EE). El modelo formal se expresa como:

$Y_{ijk} = \beta_0 + \beta_1(T_i) + \beta_2 P_j + \beta_3(T_i \times P_j) + u_k + \varepsilon_{ijk}$
 Donde Y_{ijk} : eficiencia nutricional observada del producto k, del producto i en el año j; β_0 : intercepto global del modelo; β_1 : efecto fijo principal del tipo de cultivo; β_2 : efecto fijo del Periodo (variable continua ajustada en años); β_3 : efecto de la interacción fija entre el Tipo de cultivo y el Periodo, evalúa la tasa de cambio temporal de la eficiencia nutricional según el tipo de cultivo; μ_k : efecto aleatorio asociado al producto agrícola; k, con $\mu_k \sim N(0, \sigma_\mu^2)$, el cual modela la variabilidad intrínseca y la correlación entre las observaciones repetidas de un mismo producto a lo largo del tiempo; ε_{ij} : error residual, asume una distribución $\varepsilon_{ijk} \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2)$.

b) Tendencias temporales y comparación de medias

Para cuantificar las tasas de cambio longitudinales por grupo de cultivo, se evaluaron las pendientes ajustadas y sus diferencias mediante la función emtrends del paquete emmeans (Lenth & Piaskowski, 2026). Las diferencias absolutas entre tipos de cultivo se compararon a través de las medias marginales estimadas (emmeans).

c) Conglomerados funcionales (Cluster funcional)

Con el fin de clasificar los productos según la evolución continua de sus trayectorias temporales de eficiencia, se aplicó el Análisis de Datos Funcionales (FDA) (Ramsay, 2005). La agrupación de curvas de eficiencia temporal se realizó mediante los algoritmos de clasificación funcional del paquete fda.usc en R (Febrero-Bande y Oviedo de la Fuente, 2012).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización nutricional de los productos

Los productos incluidos en el estudio presentan diferencias importantes en su contenido de proteína y energía, lo que justifica su evaluación desde una perspectiva económico-nutricional. Con base en la composición nutricional expresada por cada 100 g de alimento, los productos fueron agrupados en tres categorías según su uso, frecuencia y disponibilidad: tradicionales (asociados al mercado comercial), granos andinos y tubérculos andinos (Tabla 1).

Los cultivos tradicionales comprenden alimentos de amplia presencia en la dieta peruana y en los mercados nacionales, siendo el arroz el producto más frecuente, junto con otros como frejol, lentejas, harina de trigo, cebada, arveja, entre otros. Estos productos presentan contenidos variables de proteína y energía, y constituyen una referencia importante para comparar la eficiencia nutricional con respecto a cultivos de otro origen.

Los granos andinos, productos ampliamente utilizados en el interior del país, son considerados hoy en día como alimentos de alto valor proteico y orgánico por su origen. Entre ellos destacan la quinua, kiwicha, cañihua y tarhui, los cuales también presentan un aporte energético comparable al de varios cultivos tradicionales. Estas características los convierten en una alternativa de interés para el mejoramiento de la calidad nutricional de la dieta.

Por otro lado, los tubérculos andinos, conformados por papa, oca, olluco y mashua, presentan menores concentraciones de proteína, pero constituyen una fuente importante de energía alimentaria, como se indica en la Tabla 1. Debido a su composición nutricional, estos cultivos cumplen una función complementaria dentro de la dieta andina. Estas diferencias en la composición permiten plantear que la eficiencia económica para obtener proteína y energía difiere entre los grupos de cultivos, lo que justifica un análisis posterior.

Indicadores de eficiencia económico-nutricionales

La eficiencia nutricional es inversamente proporcional al precio agrícola (Ecuación 1, 2); por lo tanto, ante un incremento en los precios, la eficiencia disminuye. Las variaciones observadas en los precios en chacra durante el período de estudio determinaron cambios importantes en la eficiencia de adquisición de proteína y energía entre los productos agrícolas.

En las Tablas 2 y 3 se muestran las estadísticas de los indicadores de eficiencia para cada producto agrícola. Los mayores coeficientes de variación se observaron en la quinua, el tarwi y el choclo, lo que indica que la eficiencia nutricional de estos cultivos fue más sensible a las fluctuaciones históricas de los precios. En contraste, el arroz, el frejol y el pallar presentaron una menor variabilidad temporal.

Evolución temporal de los indicadores

Estos indicadores son específicos para cada producto agrícola. En la Figura 1a se presenta la

eficiencia proteica de los tubérculos andinos y en la Figura 1b, su eficiencia energética. Del mismo modo, las Figuras 2a y 2b muestran la eficiencia proteica y energética, respectivamente, para el grupo de los granos andinos. Finalmente, en las Figuras 3a y 3b se ilustran los indicadores de eficiencia proteica y energética para los productos tradicionales.

Tabla 2

Estadísticas del índice de eficiencia proteica de productos agrícolas 1997-2025

Producto	Promedio +/- Sd	rango	% caída	CV%
arroz	62,80 +/- 20,40	71,60	67,8	32
arveja	121,60 +/- 50,60	186,80	80,8	42
cañihua	88,10 +/- 49,30	146,50	83,7	56
cebada	95,50 +/- 45,50	131,60	77,5	48
choclo	23,10 +/- 15,50	44,60	90,1	67
frejol	62,80 +/- 23,80	82,80	68,8	38
haba	79,80 +/- 32,40	99,40	74,2	41
kiwicha	41,60 +/- 16,00	46,70	69,8	38
lenteja	89,70 +/- 37,30	124,70	77,0	42
mashua	9,20 +/- 4,20	16,30	84,9	46
oca	12,20 +/- 5,40	17,40	80,2	44
olluco	11,80 +/- 4,60	15,00	78,1	39
pallar	65,80 +/- 25,00	98,60	74,4	38
papa	33,80 +/- 14,70	62,40	85,6	43
quinua	52,60 +/- 34,70	118,00	87,9	66
tarwi	71,40 +/- 44,30	129,70	84,5	62
trigo	101,40 +/- 47,30	155,00	79,4	47

Tabla 3

Estadísticas del índice de eficiencia energética de productos agrícolas 1997-2025

Pro-ducto	Promedio +/- Sd	rango	% caída	CV%
arroz	3533,30 +/- 1150,10	4029,30	67,8	33
arveja	1384,60 +/- 576,40	2125,90	80,8	42
cañihua	2185,20 +/- 1223,10	3634,80	83,7	56
cebada	3227,30 +/- 1538,90	4450,60	77,6	48
choclo	726,50 +/- 487,30	1407,70	90,1	67
frejol	676,40 +/- 256,10	892,00	68,8	38
haba	946,50 +/- 383,70	1179,00	74,3	41
kiwicha	1141,80 +/- 437,60	1281,80	69,8	38
lenteja	827,70 +/- 343,70	1150,00	77,0	42
mashua	422,80 +/- 191,70	741,00	84,6	45
oca	380,60 +/- 167,70	540,40	80,1	44
olluco	633,00 +/- 245,30	804,00	78,1	39
pallar	816,50 +/- 310,40	1223,30	74,4	38
papa	1241,10 +/- 540,80	2290,30	85,7	44
quinua	1356,60 +/- 895,70	3043,80	87,8	66
tarwi	1142,80 +/- 708,80	2077,20	84,5	62
trigo	2845,00 +/- 1328,10	4349,00	79,5	47

Se observa que las tablas nutricionales normalmente son constantes, sin embargo, la accesibilidad cambia cada año, significa que el valor nutricional económico es dinámico, no es fijo y depende del precio.

Descripción del modelo lineal mixto

Aplicando este modelo mixto mediante la función **lmer** del programa R, se analizó cada uno de los indicadores. A través de estos modelos, se estudió la evolución temporal de la eficiencia proteica y energética por unidad monetaria en relación con la seguridad alimentaria, sin afirmar causalidades que el estudio no evalúa directamente.

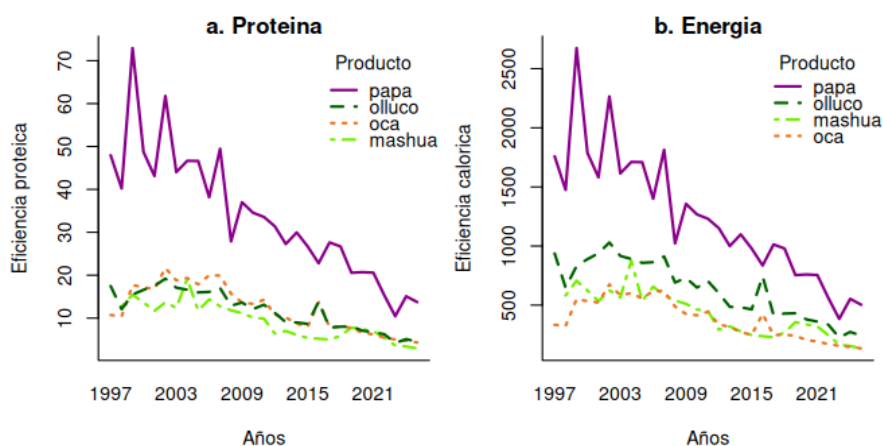


Figura 1. Eficiencia nutricional en tubérculos a) Proteica y b) Energética.

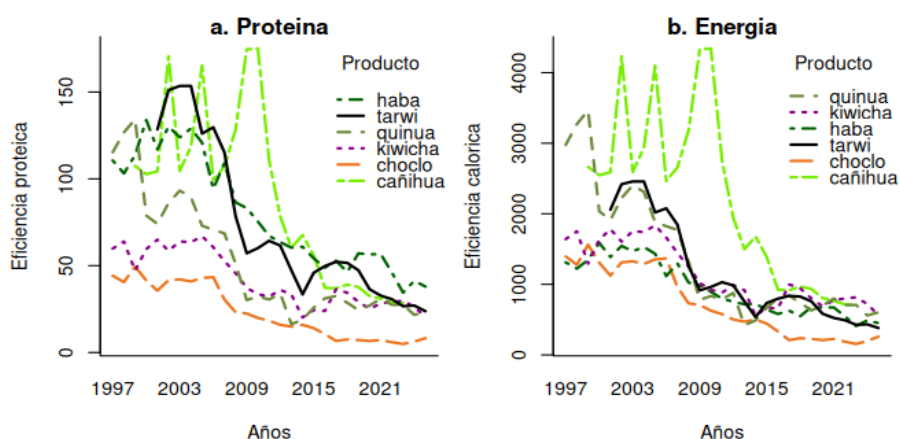


Figura 2. Eficiencia nutricional en granos andinos a) Proteica y b) Energética.

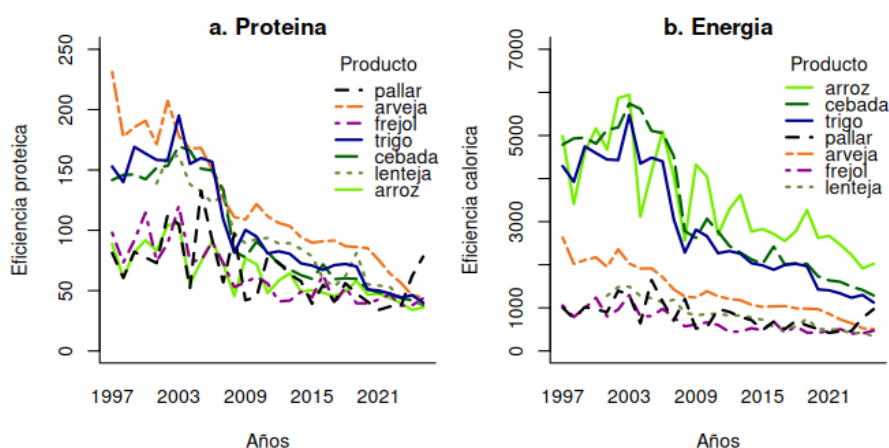


Figura 3. Eficiencia nutricional en productos tradicional a) Proteica y b) Energética.

Análisis de la eficiencia proteica de los tipos de productos

La variable dependiente Y, correspondiente a la eficiencia proteica estimada mediante el modelo mixto, se presenta en la Tabla 4. El análisis de varianza muestra que la interacción entre el tipo de producto agrícola y el periodo (años) es significativa, lo que permite analizar las tendencias temporales según el tipo de producto y sus diferencias a lo largo del tiempo (Figura 4a).

El modelo presenta un R^2 marginal de 0,63 y un R^2 condicional de 0,84. Esto indica que los efectos fijos

(tipo de producto, periodo e interacción) explican el 63% de la variabilidad observada, mientras que la inclusión del efecto aleatorio del producto agrícola incrementa la capacidad explicativa del modelo al 84%. El elevado R^2 condicional evidencia que las diferencias intrínsecas de cada cultivo constituyen una fuente importante de variación, lo que justifica la incorporación del producto como efecto aleatorio.

Las medias ajustadas muestran que la eficiencia proteica es más alta en los productos tradicionales y menor en los tubérculos andinos (Tabla 5).

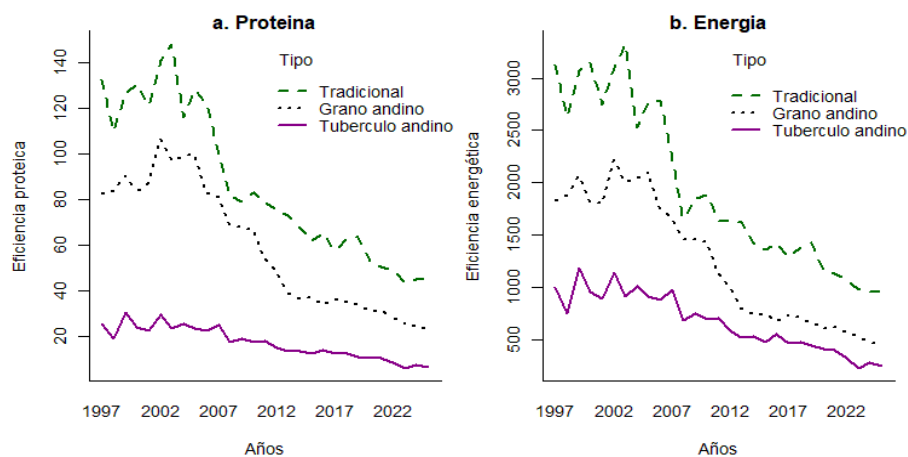


Figura 4. Eficiencia nutricional por tipo de producto a) Proteica y b) Energética.

Tabla 4

Análisis de varianza tipo III (método de Satterthwaite) para la variable eficiencia proteica

Fuentes	Gl. Num	Gl. Den	Valor F
Tipo	2	460,73	69,732 ***
Periodo	1	460,11	593,4***
Tipo: periodo	2	460,12	68,3***

Nivel de significancia: *** p < 0,001.

Tabla 5

Estimación de las medias ajustadas de la eficiencia de la proteica según el procedimiento emmeans en periodo 1997-2025

Tipo	Media ajustada	IC 95%
Grano andino	59,70	[40,33-79,07]
Tradicional	85,83	[67,91-103,76]
Tubérculo andinos	16,69	[0,0-40,41]

Por otro lado, las pendientes negativas estimadas indican una disminución progresiva de la eficiencia proteica durante el período de estudio. Las tasas de reducción fueron similares entre los cultivos tradicionales y los granos andinos, pero significativamente menores en los tubérculos andinos (Tabla 6). Este resultado contrasta con el del grano andino frente al producto tradicional, entre los cuales no se observaron diferencias estadísticamente significativas (Tabla 7).

Tabla 6

Estimación de la tendencia de la eficiencia proteica mediante el procedimiento emmeans en periodo 1997-2025

Tipo	Tendencia	IC 95%
Grano andino	-3,237	[-3,59, -2,886]
Tradicional	-3,724	[-4,04, -3,411]
Tubérculo andinos	-0,755	[-1,16, -0,347]

Tabla 7

El contraste de la tendencia del tipo del producto durante 29 años de observación de la eficiencia proteica

Contraste de tendencia	Estimado	SE	P-valor
Grano andino-Tradicional	0,487	0,239	0,1049
Grano andino-Tubérculo andino	-2,482	0,274	<0,0001
Tradicional-Tubérculo andino	-2,969	0,262	<0,0001

La tasa de disminución de la eficiencia de proteína en el tiempo no difirió significativamente entre cultivos tradicionales y granos andinos, sin embargo, los productos de tubérculos andino son diferentes al tradicional y grano andino. Se demuestra entonces que los nutrientes dejan de ser

cantidades absolutas, en nutrición normalmente se comparan alimentos por la cantidad de proteína, lo que se está demostrando que es insuficiente esta comparación, porque un alimento con más proteína que indique, este puede ser menos accesible económicamente, por eso el concepto “nutriente económicamente accesible” es más importante.

Análisis de la eficiencia energética de los tipos de productos

La variable dependiente Y, dado por la eficiencia energética, el análisis de varianza según la Tabla 8, resulta la interacción Tipo y Periodo significativa, esto significa que la diferencia de los tipos de productos es dependiente de la época fijado por tiempo, para lo cual estudiar los tipos de productos, se debe considerar el efecto del periodo.

Tabla 8

Análisis de varianza tipo III (método de Satterthwaite) para la variable eficiencia energética

Fuentes	Gl. Num	Gl. Den	Valor F
Tipo	2	461,37	30,538 ***
Periodo	1	460,05	465,226***
Tipo: Periodo	2	460,06	29,921***

Nivel de significancia: *** p < 0,001.

En relación con el modelo de eficiencia energética (Tabla 9), el análisis muestra un R^2 marginal de 0,36 y un R^2 condicional de 0,84. Esto indica que los efectos fijos (tipo de producto, periodo e interacción) explican el 36% de la variabilidad observada, mientras que, al incorporar el efecto aleatorio del producto agrícola, la capacidad explicativa del modelo se incrementa al 84%. Al igual que en el modelo de eficiencia proteica, el elevado R^2 condicional justifica la inclusión del producto como efecto aleatorio.

Tabla 9

Estimación de las medias ajustadas de la eficiencia de la energética según el procedimiento emmeans en periodo 1997-2025

Tipo	Media ajustada	IC 95%
Grano andino	1256	[487, 2025]
Tradicional	1906	[1194, 2618]
Tubérculo andinos	666	[-276, 1608]

La tendencia entre los distintos tipos de productos se presenta en la Tabla 10, los cambios son mayores en los productos tradicionales y mucho menor en tubérculos andinos.

Tabla 10

Estimación de la tendencia de la eficiencia energética mediante el procedimiento emtrends en periodo 1997-2025

Tipo	Tendencia	IC 95%
Grano andino	-69,6	[-79,1, -60,2]
Tradicional	-84	[-92,4, -75,6]
Tubérculo andinos	-30	[-41, -19]

Por su parte, el análisis de contraste de tendencias entre los distintos tipos de productos se presenta en la Tabla 11.

Se observa que la tasa de cambio de la eficiencia energética entre los granos andinos y los productos tradicionales no presenta diferencias estadísticamente significativas a lo largo del tiempo (aunque se observa una tendencia marginal con $p \approx 0,06$). En cambio, la tendencia en los tubérculos andinos difiere de manera altamente significativa respecto a los granos andinos y productos tradicionales.

Tabla 11

El contraste de la tendencia del tipo del producto durante 29 años de observación de la eficiencia energética

Contraste de tendencia	Estimado	SE	P-valor
Grano andino-Tradicional	14,4	6,43	0,0666
Grano andino-Tubérculo andino	-39,6	7,36	<0,0001
Tradicional-Tubérculo andino	-54	7,03	<0,0001

Estos resultados indican que la pérdida de eficiencia energética fue significativamente distinta entre los tipos de cultivo. La evolución temporal de la eficiencia energética para los tres grupos de productos a lo largo de los 29 años analizados se muestra en la Figura 5b.

La principal contribución de este estudio no radica únicamente en la comparación entre cultivos, sino en la integración de información nutricional y económica mediante indicadores de eficiencia que permiten evaluar la accesibilidad de los nutrientes desde la perspectiva del consumidor.

Tradicionalmente, el precio agrícola se utiliza para estudiar: rentabilidad, inflación, mercados, ingresos, etc. En este estudio ocurrió algo diferente, el

precio se convierte en un indicador nutricional indirecto, es decir, el precio deja de representar únicamente dinero, ahora representa la capacidad de adquirir nutrientes.

Clúster funcional

Cada serie histórica anual fue tratada como un dato funcional, para lo cual se utilizó la función `fdahclust` en el agrupamiento jerárquico. De este modo, se obtuvieron grupos de productos con patrones de evolución semejantes a lo largo de una serie histórica de más de 20 años, logrando así una clasificación de productos según su eficiencia proteica y energética. Con el propósito de identificar patrones temporales similares en la evolución de la eficiencia proteica y energética entre productos agrícolas, se aplicó un análisis de clúster funcional sobre las series históricas correspondientes al periodo 2001-2023 (Figura 5), para ello, se siguió este procedimiento:

1. Se calcularon los indicadores de eficiencia proteica y energética.
2. Se construyó una serie temporal para cada producto.
3. Cada serie temporal se representó como un dato funcional (curva continua).
4. Las curvas funcionales se agruparon mediante un algoritmo de clúster funcional.

Este enfoque permitió agrupar los productos que presentan trayectorias temporales semejantes, independientemente de sus niveles absolutos de eficiencia. La visualización de las curvas mediante este procedimiento permitió identificar las agrupaciones, que en ambos casos (eficiencia proteica y energética), el dato funcional evidencia un comportamiento decreciente a lo largo del tiempo para cada uno de los grupos identificados.

El dato funcional se construyó con las series completas, en el periodo 2001 al 2023. Para la clasificación de las curvas se resumió a 4 grupos de 17 productos considerados en el estudio

Grupos de eficiencia proteica

En el siguiente análisis se encontraron 4 grupos de productos con diferencias sustantivas en la eficiencia energética (Figura 6).

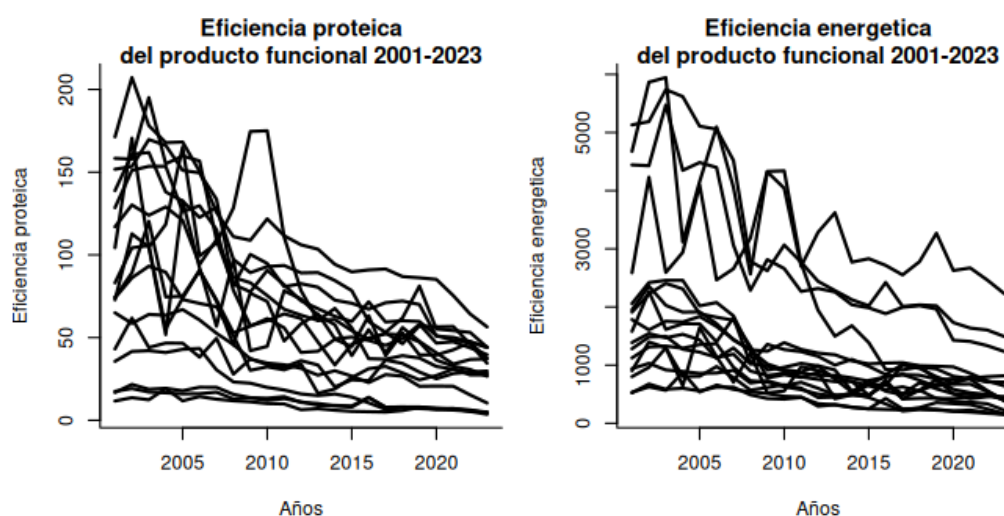


Figura 5. Dato funcional de la eficiencia nutricional proteica y energética.

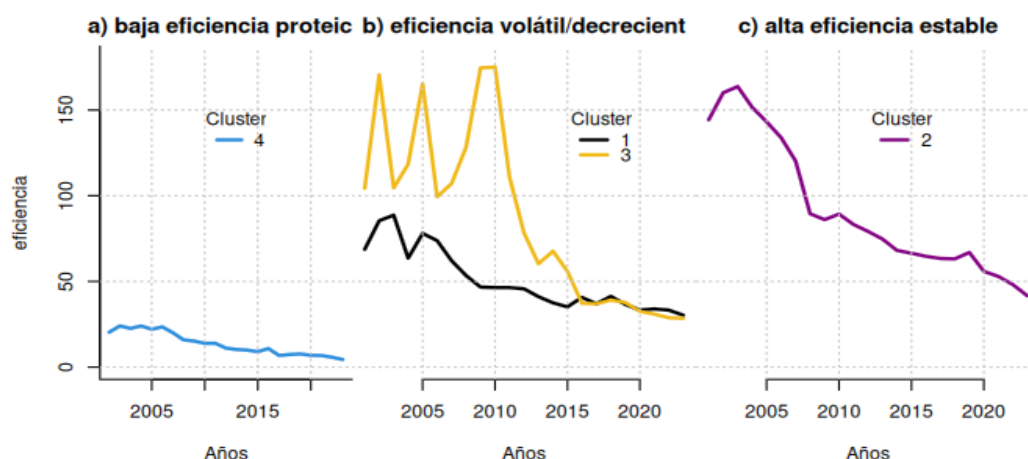


Figura 6. Curvas medias de los grupos funcionales de la eficiencia proteica a) baja, volátil/decreciente y c) alta.

1) Grupo de baja en eficiencia proteica. Este grupo reúne productos que mantienen niveles de eficiencia relativamente bajos y estables para la obtención de proteína durante todo el periodo analizado, lo que evidencia una menor capacidad de aporte proteico por unidad monetaria. Está conformado por la clase 4 con los siguientes productos:

Clase 4: choclo, mashua, oca y olluco

2) Grupo volátil decreciente en eficiente proteica. Comprende productos cuya evolución temporal presenta fluctuaciones moderadas y una posición intermedia respecto a los demás grupos, con una clara tendencia decreciente:

Clase 1: kiwicha, arroz, frejol, pallar, papa y quinua

Clase 3: cañihua

3) Grupo de alta eficiencia proteica. Los productos de este grupo presentan consistentes y elevados niveles de eficiencia para la obtención de proteína a lo largo del tiempo, evidenciando una mayor capacidad para suministrar nutrientes por unidad monetaria, por lo que se recomendaría su inclusión en los planes de alimentación y seguridad alimentaria:

Clase 2: arveja, cebada, haba, lenteja, trigo, tarwi.

Grupos de eficiencia energética

En el siguiente análisis se encontraron 8 grupos de productos con diferencias sustantivas en la eficiencia energética (Figura 7).

1) Grupo de baja eficiencia energética: Muestra fuertes cambios en la eficiencia hasta el año 2015; a partir de dicho año, esta se mantiene en niveles relativamente bajos y constantes en el tiempo. Este grupo (Figura 7a) reúne productos con una eficiencia energética baja y volátil durante el periodo analizado. Agrupa a 14 de los 17 productos estudiados, lo que indica que la mayoría de los alimentos evaluados presentan una menor capacidad para aportar energía por unidad monetaria. Dichos productos se distribuyen en las siguientes clases:

Clase 1: kiwicha, arveja, papa

Clase 3: frejol, pallar, haba, lenteja, choclo, olluco

Clase 4: cañihua

Clase 6: mashua y oca

Clase 7: quinua y tarwi

2) Grupo de eficiencia media/decreciente:

Comprende productos cuyas disminuciones en la eficiencia energética son moderadas, ocupando una posición intermedia en comparación con los demás grupos (Figura 7b). Estos productos ofrecen una mejor eficiencia energética que los pertenecientes al grupo anterior.

Clase 5: cebada

Clase 8: trigo

Estos productos proponen una mejor eficiencia energética que el grupo anterior.

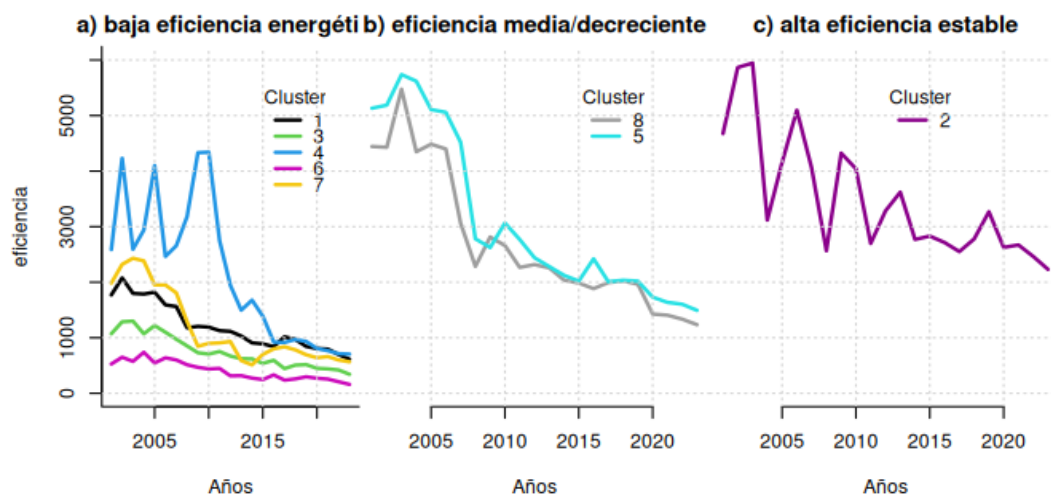


Figura 7. Curvas medias de los grupos funcionales de la eficiencia energética a) baja, b) media y c) alta.

3. Grupo de alta eficiencia energética: Este grupo presenta de manera consistente los mayores niveles de eficiencia energética a lo largo del tiempo, lo que evidencia una mayor accesibilidad económica a este componente nutricional. Está compuesto por un único producto que se consolida como un alimento de alta eficiencia energética y como un elemento complementario clave en la dieta alimentaria (Figura 7c).

Clase 2: arroz

El análisis funcional permitió hacer un agrupamiento según su comportamiento histórico, esto se entiende que a pesar tener la misma eficiencia promedio, su evolución es distinta.

Matriz de Eficiencia Cruzada

La clasificación por cuadrantes permite identificar productos con ventajas simultáneas en eficiencia proteica y energética, proporcionando una herramienta práctica para priorizar cultivos en programas de alimentación y estrategias de seguridad alimentaria.

Para comparar el balance entre proteína y energía de los productos, se presenta un plano cartesiano dividido en cuatro cuadrantes (Figura 8).

- Eje X: Eficiencia Energética (kcal/S/)
- Eje Y: Eficiencia Proteica (g de proteína/S/)

Cuadrante Superior Derecho (Alta eficiencia proteica y energética - Cultivos estrella): Agrupa a productos que ofrecen un alto rendimiento tanto en proteína como en energía por cada sol invertido. Destacan la cañihua, el trigo y la cebada. Estos cultivos son estratégicos para la seguridad alimentaria, ya que proporcionan una nutrición integral y altamente eficiente desde el punto de vista económico.

Cuadrante Superior Izquierdo (Alta eficiencia proteica y baja eficiencia energética): Incluye productos con un sobresaliente aporte de proteína por unidad monetaria, aunque con un menor rendimiento energético. Destacan las leguminosas como arveja, lenteja, haba, pallar, tarwi y frejol. Son alimentos ideales para priorizar el consumo de proteínas de origen vegetal a bajo costo.

Cuadrante Inferior Derecho (Baja eficiencia proteica y alta eficiencia energética): Representado principalmente por el arroz, producto que destaca por su elevado aporte energético por sol, aunque

con un nivel moderado a bajo de eficiencia proteica. Es un cultivo clave como fuente accesible de energía en la canasta familiar.

Cuadrante Inferior Izquierdo (Baja eficiencia proteica y energética): Reúne a productos que presentan un rendimiento inferior al promedio en ambos indicadores por unidad monetaria, tales como quinua, kiwicha, papa, choclo, olluco, oca y mashua. Aunque varios de estos cultivos tienen un alto valor nutricional intrínseco o cultural, su costo por gramo de proteína o kilocaloría resulta menos eficiente en comparación con otros alimentos.

En consecuencia, los productos ubicados en el cuadrante superior derecho son eficientes.

Finalmente se afirma que una matriz de cuadrantes que resume simultáneamente la proteína y energía, eficiencia permite clasificar productos, y puede ser útil como herramienta para el nutricionista, en los programas sociales, las compras públicas, alimentación escolar entre otros.

Estudios similares sobre los precios de origen y sus implicancias en la región (Tabla 12)

La falta de precios de chacra en otras regiones y la predominancia de precios mayoristas reflejan el fenómeno de industrialización y agregación de valor, donde el beneficio económico de la eficiencia nutricional migra del agricultor al intermediario o al industrial. Estudios en Bolivia Bellemare (2018), en la cuenca andina los granos andinos (quinua, tarwi, cañihua) tienen una gran densidad de aminoácidos esenciales y micronutrientes por unidad monetaria en origen, pero sufren de fluctuaciones de precio debido al mercado de exportación o industrialización.

Evaluar la eficiencia nutricional a precio de chacra facilita el diseño de políticas de compras públicas directas (ej. alimentación escolar), aprovechando el alto valor nutritivo en origen antes del sobre costo por intermediación. Sin embargo, la escasez de registros continuos de precios en chacra en otras regiones asociada a la informalidad, la dispersión comercial, el autoconsumo y la industrialización directa constituye la principal limitación del estudio. Sobre la paradoja de la quinua y granos nativos en Bolivia y Ecuador analizan cómo el costo de origen/finca (farmgate price) impacta en la seguridad alimentaria y la ingesta de nutrientes de las familias rurales (Bellemare, 2018; Jacobsen, 2003)

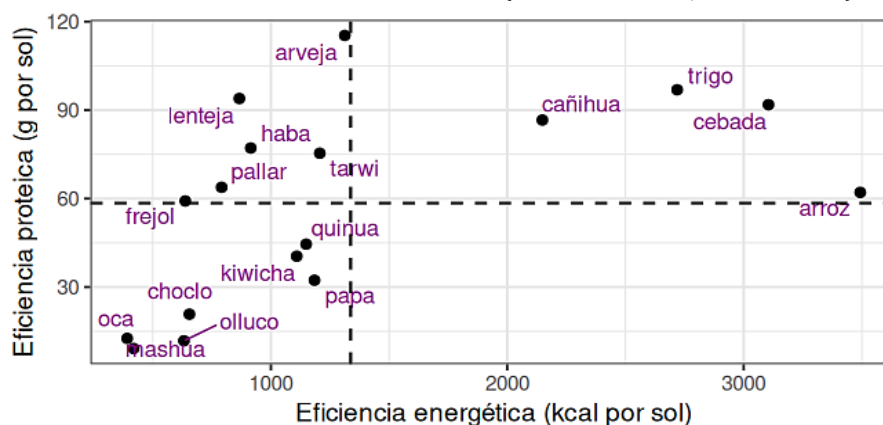


Figura 8. Eficiencia cruzada energética y proteica.

Tabla 12
Comparación de indicadores de eficiencia nutricional y precios en origen de cultivos andinos y tradicionales frente a la literatura internacional

Estudio	Ámbito Geográfico	Productos	Nivel de la Cadena de Precios	Indicador Evaluado	Principales Hallazgos vs. El Estudio
Presente	Perú (Arequipa y La Libertad)	Cultivos andinos (Quinua, kiwicha, tarwi, etc.)	Precio en chacra (Origen)	Aporte de nutrientes por unidad monetaria en chacra (s./g de proteína/kcal)	Muestra alta eficiencia nutricional a bajo costo de origen, reduciendo la brecha de malnutrición local.
Bellemare (2018)	Bolivia y Perú	Granos andinos (Quinua, Tarwi, Cañihua)	Precio al productor / Chacra	Retorno nutricional del precio en origen	Coincide en que el precio en origen determina la accesibilidad de micronutrientes en zonas de producción.
Drewnowski (2010)	Global / EE.UU.	Alimentos frescos vs. procesados	Precio al consumidor final	Relación entre densidad de nutrientes y precio	Demuestra que los alimentos no procesados de origen vegetal ofrecen mayor densidad nutricional por unidad monetaria.
FAO et al. (2024)	América Latina y el Caribe	Canasta de alimentos no procesados	Precios de mercado local y origen.	Costo de la nutrición adecuada (USD/día)	Confirma que los precios de origen sin intermediación representan el menor costo para cumplir requerimientos nutricionales.

Tabla 13
Comparación de indicadores de eficiencia nutricional y precios en origen de cultivos andinos y tradicionales frente a la literatura internacional

ODS y Meta	Hallazgo del estudio	Aplicación/Impacto
ODS 2 (Meta 2.1 y 2.2) Acceso a alimentos y fin de la malnutrición.	Los granos andinos tienen una eficiencia proteica por costo equivalente a los cultivos tradicionales.	Promoción de súper alimentos locales para mejorar el perfil proteico a bajo costo en programas de seguridad alimentaria.
ODS 2 (Meta 2.c) Mercados transparentes e información de precios.	Uso de series temporales de precios corrientes en chacra para medir accesibilidad económica.	Insumo técnico de planificación agrícola para mitigar la volatilidad de precios en origen y orientar subsidios o siembras.
ODS 3 (Meta 3.4) Prevención de enfermedades y fomento de la salud.	Caracterización de la eficiencia energética y proteica (kcal y g de proteína por unidad monetaria).	Diseño de recomendaciones dietéticas de alto valor nutricional y accesible costo para la prevención de estados de malnutrición.

Vinculación del estudio con los principales resultados con las ODS 2 y 3 (Tabla 13)

Los hallazgos de este estudio contribuyen directamente al ODS 2 (Hambre Cero), en particular a la Meta 2.1 (garantizar el acceso de todas las personas a alimentos sanos, nutritivos y suficientes) y la Meta 2.2 (poner fin a todas las

formas de malnutrición). De igual forma, la investigación se alinea con el ODS 3 (Salud y Bienestar), específicamente con la Meta 3.4 (reducir las enfermedades no transmisibles y promover la salud mental y el bienestar), en la Tabla 13 se presenta un resumen estratégico de esta vinculación.

CONCLUSIONES

La eficiencia nutricional de los cultivos agrícolas del Perú presentó diferencias significativas entre grupos de productos y variaciones temporales durante el período 1997–2025. Los modelos lineales mixtos permitieron demostrar que el tipo de cultivo, el período y su interacción influyeron significativamente en la eficiencia proteica y energética evidenciando que la evolución temporal no fue homogénea entre los grupos analizados. Los granos andinos mostraron una eficiencia proteica comparable a la de los cultivos tradicionales, mientras que los tubérculos andinos presentaron una menor eficiencia para la obtención de proteína. En contraste, los cultivos tradicionales alcanzaron la mayor eficiencia energética, seguidos por los granos andinos y los tubérculos andinos. El análisis de tendencias temporales evidenció una disminución progresiva de la eficiencia nutricional durante el período de estudio, asociada al incremento sostenido de los precios agrícolas en chacra. Sin embargo, la magnitud de esta

disminución difirió entre grupos de cultivos, indicando que la pérdida de accesibilidad económica a los nutrientes no ocurrió de manera uniforme. El análisis de clúster funcional permitió identificar grupos de cultivos con trayectorias temporales similares de eficiencia nutricional, mientras que la clasificación conjunta de la eficiencia proteica y energética facilitó la identificación de productos con mayor potencial nutricional y económico. Estas herramientas complementan el análisis estadístico tradicional y ofrecen una representación integral del comportamiento de los cultivos. Los resultados demuestran que los cultivos andinos no constituyen un grupo homogéneo desde la perspectiva de la eficiencia nutricional. El porcentaje de caída en eficiencia proteica y energética de los diferentes productos son similares como se muestran en las Tablas 2 y 3. En otro aspecto, los granos andinos representan una alternativa competitiva para el suministro

económico de proteína vegetal, mientras que los tubérculos andinos destacan principalmente como fuentes de energía, pero con menor eficiencia económica.

Finalmente, el estudio demuestra que las series históricas de precios en chacra constituyen una fuente de información valiosa para evaluar la accesibilidad económica de nutrientes y generar indicadores útiles para el seguimiento de la seguridad alimentaria. La integración de información económica y nutricional proporciona una herramienta objetiva para orientar políticas públicas, estrategias de producción agrícola y recomendaciones dirigidas a mejorar la calidad de la alimentación de la población.

Para consolidar el potencial nutricional y económico de los cultivos andinos frente a los

desafíos institucionales y sociales del Perú, es fundamental implementar políticas públicas integrales que incluyan la incorporación de quinua y kiwicha en programas como Qali Warma y comedores populares, así como brindar apoyo técnico y financiero a los agricultores de la región. Asimismo, se requiere fomentar el consumo consciente mediante campañas de educación alimentaria y un etiquetado nutricional claro que destaque las ventajas de estos productos frente a los comerciales. De este modo, al mejorar la articulación institucional, el acceso a mercados y promover la adaptación al cambio climático, se potenciará el rol estratégico de estos alimentos en la reducción de la desnutrición durante las próximas décadas

AGRADECIMIENTOS

El presente estudio utilizó datos de acceso público provistos por la Gerencia Regional de Agricultura de Arequipa, la Gerencia Regional de Agricultura de La Libertad, el Instituto Nacional de Salud (Ministerio de

Salud del Perú) y el INEI (Instituto Nacional de Estadística e Informática). Los autores expresan su gratitud a dichas entidades por promover la transparencia y la disponibilidad pública de la información.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allotey, D. K., Kwofie, E. M., & Ramachandran, R. P. (2026). Evaluación de la ecoeficiencia de la extracción de proteína de guisante mediante el método de fraccionamiento híbrido a través de un análisis tecno-ecoambiental integral. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5660070>
- Ayala, G. (2004). Aporte de los cultivos andinos a la nutrición humana. En J. Seminario (Ed.), *Raíces andinas: Contribuciones al conocimiento y a la capacitación* (pp. 101-112). Centro Internacional de la Papa.
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2015). Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1), 1-48. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>.
- Bellemare, M. F., Fajardo-Gonzalez, J., & Gitter, S. R. (2018). Foods and fads: The welfare impacts of rising quinoa prices in Peru. *World Development*, 112, 163-179. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2018.07.012>
- Darmon, N., & Drewnowski, A. (2015). Contribution of food prices and diet cost to socioeconomic disparities in diet quality and health: A systematic review and analysis. *Nutrition Reviews*, 73(10), 643-660. <https://doi.org/10.1093/nutrit/nuv027>.
- Devkota, H. P., Gaire, B. P., Hori, K., Subedi, L., Adhikari-Devkota, A., Belwal, T., ... & Kurauchi, Y. (2021). The science of matcha: Bioactive compounds, analytical techniques and biological properties. *Trends in Food Science & Technology*, 118, 735-743. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.10.005>.
- Drewnowski, A. (2010). The Nutrient Rich Foods Index helps to identify healthy, affordable foods. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 91(4), 1095S-1101S. <https://doi.org/10.3945/ajcn.2010.28450D>.
- FAO, FIDA, UNICEF, PMA, & OMS. (2020). El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo 2020: Transformación de los sistemas alimentarios para que las dietas saludables sean asequibles. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://doi.org/10.4060/ca9692es>.
- Febrero-Bande, M., & Oviedo de la Fuente, M. (2012). Statistical computing in functional data analysis: The R package fda.usc. *Journal of Statistical Software*, 51(4), 1-28. <https://doi.org/10.18637/jss.v051.i04>
- Gerencia Regional de Agricultura del Gobierno Regional de Arequipa. (2026). Estadística, campaña agrícola. <https://www.agroarequipa.gob.pe/index.php/campana-agricola>.
- Gerencia Regional de Agricultura del Gobierno Regional de La Libertad. (2026). Estadísticas agropecuarias, agrícola. <https://agrolalibertad.gob.pe/estadisticas-agropecuarias-agricola/>.
- Guacho, L. N., Atehortua, M. K., Curruchich, W. A., & Hernández, A. (2023). Consecuencias de la reducción de cultivos andinos: Situación nutricional de tres comunidades kichwa de Ecuador. *Innovare: Revista de Ciencia y Tecnología*, 12(1), 16-22.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2022). Desnutrición crónica afectó al 11,7% de la población menor de cinco años en el año 2022 [Nota de prensa]. <https://www.gob.pe/institucion/inei/noticias/759081-desnutricion-cronica-afecto-al-11-7-de-la-poblacion-menor-de-cinco-anos-en-el-ano-2022>.
- Instituto Nacional de Salud. (2017). Tablas peruanas de composición de alimentos (10.^a ed.). Centro Nacional de Alimentación y Nutrición.
- Jacobsen, S. E., Mujica, Á., & Ortiz, R. (2003). La importancia de los cultivos andinos. *Fermentum: Revista Venezolana de Sociología y Antropología*, 13(36), 14-24.
- Lenth, R. V., & Piaskowski, J. (2026). emmeans: Estimated marginal means, aka least-squares means (R package version 2.0.4) [Software informático]. Comprehensive R Archive Network (CRAN). <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.emmeans>
- Masters, W. A., Bai, Y., Herforth, A., Sarpong, D. B., Mishili, F., Kinabo, J., & Coates, J. C. (2018). Measuring the cost of nutritive diets in Africa leading to better food security policy. *Food Security*, 10(4), 1095-1104. <https://doi.org/10.1007/s12571-018-0821-3>
- Ordinola, M., Fonseca, C., Maldonado, L., Suárez, V., Pradel, W., Devaux, A., & Hareau, G. (2022). Sistemas alimentarios y productivos en la zona andina: Agricultura, nutrición y generación de ingresos. Centro Internacional de la Papa. <https://cgspace.cgiar.org/items/2b6737e3-7541-4fae-bee8-fa661c4c080a>
- Ramírez, R. F., Vargas, P. L., & Cárdenas, O. (2020). La seguridad alimentaria: Una revisión sistemática con análisis no convencional. *Espacios*, 41(45), 319-328. <https://doi.org/10.48082/espacios-a20v41n45p25>
- Ramsay, J. O. (2005). Functional data analysis. En *Encyclopedia of Statistics in Behavioral Science*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/0470013192.bsa239>.
- Semba, R. D., Ramsing, R., Rahman, N., Kraemer, K., & Bloem, M. W. (2021). Legumes as a sustainable source of protein in human diets. *Global Food Security*, 28, 100520. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2021.100520>.