

INSTITUTO DE ESTUDIOS AVANZADOS EN DESARROLLO



EFICIENCIA EN LA PRODUCCIÓN DE QUINUA EN
BOLIVIA: UN ANÁLISIS DE FRONTERAS
ESTOCÁSTICAS

Por:

Javier Aliaga Lordemann

Ignacio Garrón Vedia

Beatriz Muriel Hernández

Serie Documentos de Trabajo sobre Desarrollo

No. 8/2025

La Paz, octubre 2025

Las opiniones expresadas en este documento les pertenecen a sus autores y no necesariamente reflejan la posición oficial de las instituciones auspiciadoras ni de la Fundación INESAD (Instituto de Estudios Avanzados en Desarrollo). Los derechos de autor le pertenecen al autor y/o a las instituciones auspiciadoras, si las hubiere. El documento solamente puede ser descargado para uso personal.

Eficiencia en la producción de quinua en Bolivia: Un análisis de Fronteras Estocásticas*

Javier Aliaga Lordemann**

Ignacio Garrón Vedia***

Beatriz Muriel Hernández****

Resumen

El presente documento tiene como objetivo evaluar la eficiencia en la producción de quinua en Bolivia, identificando factores que influyen en la variabilidad de la producción y en la sostenibilidad del cultivo. La metodología empleada incluye un análisis de fronteras estocásticas para medir la eficiencia técnica de los productores, así como la relación entre insumos y producción en diferentes condiciones climáticas.

Las conclusiones del estudio destacan la heterogeneidad en los niveles de producción asociados a la capacidad de inversión de capital y operativo de los productores y de acceso a tecnologías agrícolas sostenibles. Además, la mano de obra no siempre resulta en un incremento proporcional de la producción, lo que sugiere la necesidad de mejorar la gestión del trabajo. Los niveles de ineficiencia identificados se asocian con variables aproximadas de sistemas de producción sostenibles, lo cual requiere políticas que promuevan tecnologías agrícolas más modernas. Finalmente, se identifica un amplio margen para mejorar la eficiencia, lo que subraya la importancia de invertir en capacitación y tecnología. Estas recomendaciones buscan no solo beneficiar a los productores, sino también, mejorar la resiliencia del cultivo y asegurar la viabilidad a largo plazo de la producción de quinua en Bolivia.

Palabras clave: Quinua, Análisis de Fronteras Estocásticas, Producción, Eficiencia.

Código JEL: Q12, Q15, C23, D24

* La investigación forma parte del proyecto *Creating Indigenous Women's Green Jobs Under Low-Carbon COVID-19 Responses and Recovery in the Bolivian Quinoa Sector*, desarrollado por la Fundación INESAD bajo el patrocinio del Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (IDRC), Canadá. Los autores desean expresar su sincero agradecimiento a los productores de quinua del Altiplano Sur de Bolivia afiliados a la RED-QUINUA que respondieron a la encuesta. Los posibles errores son de entera responsabilidad de sus autores.

** Es economista e Investigador Senior Asociado de INESAD (jaliaga@inesad.edu.bo).

*** Es economista e Investigador Asociado de INESAD (ignaciogarron@gmail.com).

**** Es economista, Directora Ejecutiva e Investigadora Principal de INESAD (bmuriel@inesad.edu.bo).

Abstract

The article aims to evaluate the efficiency of quinoa production in Bolivia, identifying factors that influence production variability and the sustainability of the crop. The methodology employed includes a stochastic frontier analysis to measure producers' technical efficiency, as well as the relationship between inputs and production under different climatic conditions.

The study's conclusions highlight the heterogeneity in production levels associated with producers' capacity for capital and operating investment, as well as their access to sustainable agricultural technologies. Moreover, labor does not always result in a proportional increase in production, suggesting the need to improve labor management. The identified levels of inefficiency are linked to proxy variables of sustainable production systems, which calls for policies that promote more modern agricultural technologies. Finally, a wide margin for efficiency improvement is identified, underscoring the importance of investing in training and technology. These recommendations aim not only to benefit producers but also to strengthen the crop's resilience and ensure the long-term viability of quinoa production in Bolivia.

Key words: Quinoa, Stochastic Frontier Analysis, Production, Efficiency.

JEL code: Q12, Q15, C23, D24

1. Introducción

La quinua ha sido producida por las poblaciones indígenas del Altiplano de Bolivia desde épocas ancestrales, siendo el principal cultivo de la región. La superficie cultivada del grano aumentó desde la década de los setenta, acelerándose significativamente a partir de los años 2000; debido al crecimiento de su consumo a nivel mundial, impulsado por el reconocimiento y la apreciación de su alto valor nutritivo. Con todo, el rápido aumento de la superficie cultivada vino acompañado de prácticas agrícolas poco amigables, como la disminución de la diversificación y la reducción del ganado camélido y de las barreras vivas (Collao y Muriel, 2024).

Desde los últimos años, el sector quinuero boliviano viene enfrentando no solamente problemas de sostenibilidad, sino también de una mayor competencia a nivel mundial, con la consecuente reducción de precios y afectaciones a la economía de los pequeños agricultores (Aliaga *et al.*, 2024b). Alandía *et al.* (2020) muestran que el número de países productores del grano ha aumentado dramáticamente de 11 en 1990 a 123 países en 2018. Bazile y Baudron (2015), Bazile *et al.* (2016) y González *et al.* (2015) discuten cómo la creciente competencia global ha ejercido presión sobre los precios, tanto a nivel local como internacional.

La quinua boliviana, sobre todo la quinua real, todavía mantiene un lugar único en la demanda global, ya que es producida de manera orgánica, a elevadas altitudes, con propiedades especiales; sin embargo, las prácticas poco amigables suscitadas han llevado a una caída en el promedio de los rendimientos, acompañados de un bajo uso de tecnologías sostenibles.

Bajo este contexto, el presente documento realiza un Análisis de Fronteras Estocásticas (SFA por sus siglas en inglés) para estimar la función de producción del grano y el nivel de eficiencia técnica asociada, tomando en cuenta una muestra representativa de pequeños productores de tres comunidades del Altiplano Sur de Bolivia. La finalidad última es conocer mecanismos más eficientes y rentables, asociados con una agricultura sostenible, en un escenario de mayor competencia y menores precios.

La metodología de SFA se basa en aplicaciones recientes de Ferrara (2020), Freitas *et al.* (2021), Trindade y Fulginiti (2015), Bravo-Ureta *et al.* (2007), entre otros. La producción es explicada por sus factores de producción: capital, trabajo, tierra y consumo intermedio y la ineficiencia es modelada con variables relacionadas con una agricultura sostenible: huella hídrica (Hoekstra y Mekonnen, 2012), productividad del agua (Molden, 1997), tecnología el uso del agua (Zhang *et al.*, 2011), buenas prácticas agrícolas (Pretty, 2008), y adaptación al cambio climático (Nelson *et al.*, 2009).

El modelo SFA utilizado sienta sus bases en los documentos seminales de Aigner *et al.* (1977) y Meeusen van Den Broeck (1977), con aplicaciones relevantes al sector agrícola. Una revisión reciente del uso de esta metodología se encuentra en Ferrara (2020). No obstante, los estudios que estiman la producción de quinua basados en la SFA son escasos en la literatura tanto en Bolivia como en otras regiones. Algunas excepciones son: la medición de la eficiencia técnica para pequeños productores de quinua en Puno, Perú, donde se obtienen niveles de eficiencia entre 0,47 y 0,68 (Ataucusi *et al.*, 2023; Mercado *et al.*, 2020); y la medición de eco-eficiencia, donde se incluye el daño ambiental y se obtienen estimaciones de eficiencia aún más bajas (Gamboa *et al.*, 2020).

Otros trabajos relacionados con el presente estudio analizan la productividad y la eficiencia de productos agrícolas en los países de Sudamérica. Trindade y Fulginiti (2015) estiman el crecimiento de la productividad agrícola en 10 países sudamericanos durante 1969-2009 y encuentran que dicho crecimiento explica la mitad del aumento de la producción agrícola, siendo sensible a las inversiones en investigación y desarrollo (I+D). Freitas *et al.* (2021) estiman modelos SFA para Bolivia, Ecuador, Colombia y Perú para investigar el impacto de la infraestructura vial en la ineficiencia técnica agrícola. Los autores observan que la irrigación aumenta el valor de la producción y que la red vial disminuye la ineficiencia técnica de las explotaciones agrícolas. Con todo, los trabajos mencionados no toman en cuenta las características específicas de la quinua ni la información a nivel productor.

El presente estudio permite capturar la eficiencia técnica de la producción de quinua a partir de una función de tipo Cobb-Douglas, la cual es estimada en 72,34%, mostrando que todavía existen oportunidades de mejora en las zonas bajo análisis. Respecto a las variables que explican la ineficiencia, se encuentran aquellas relacionadas con una agricultura sostenible; las que mejoran la productividad y aumentan la resiliencia del cultivo frente a condiciones adversas.

El resto del documento se estructura de la siguiente manera. En la Sección 2 se presenta la metodología. En la Sección 3 se detallan los datos utilizados y en la siguiente los resultados obtenidos del análisis de la SFA. Finalmente, la Sección 5 narra las conclusiones y recomendaciones de política más importantes.

2. Metodología econométrica

Para la medición de la eficiencia técnica, se utiliza la metodología de Análisis de la Frontera Estocástica de Aigner *et al.* (1977) y Meeusen y van den Broeck (1977), adaptado para incorporar determinantes de la eficiencia, como en Battese y Coelli (1995) en el contexto de datos de panel. El modelo de Análisis de Frontera Estocástica (SFA por sus siglas en inglés) supone que existe una frontera de producción que refleja el máximo nivel de producto posible dados los niveles insumos y tecnología, en el cual no necesariamente

se encuentran todas las unidades productivas –ya que por diversos motivos no optimizan su producción en el sentido microeconómico–. En el SFA se especifica una forma funcional de la función de producción, donde los errores se convierten en términos compuestos por efectos aleatorios como por efectos asociados a la ineficiencia. Alternativamente, la literatura presenta técnicas semiparamétricas que llevan a cierta flexibilidad en la función de producción (ver, *e.g.*, Vidoli y Ferrara, 2015); sin embargo, en esta aplicación se aprecia que la metodología de Battese y Coelli (1995) se ajusta bien a los datos bajo análisis.

Utilizando datos de corte transversal, el modelo general de frontera estocástica de Aigner *et al.* (1977) y Meeusen y van den Broeck (1977) puede ser formulado como:

$$y_i = f(x_i; \beta) + v_i - u_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (1)$$

donde y_i es el logaritmo neperiano de la producción del pequeño agricultor i que cultiva quinua, x_i es el vector de insumos (especificados en logaritmos neperianos), $f(\cdot)$ representa la función característica de la relación entre el producto y los insumos, v_i es un error simétrico y aleatorio y $u_i > 0$ es un término de error que representa la ineficiencia técnica. La frontera estocástica es capturada por $y_i = f(X_i; \beta) + v_i$. Siguiendo a Battese y Coelli (1995), se asume que v_i es un error aleatorio que sigue una distribución $N(0, \sigma_v^2)$ y u_i es un error no negativo $N^+(z' \delta, \sigma_u^2)$, donde z' es un vector $(1 \times k)$, de variables que están relacionadas con la ineficiencia técnica de los productores de quinua y δ es un vector $(k \times 1)$ de parámetros.

Como se observa en la ecuación (1), un componente importante en esta metodología es la forma funcional que toma $f(\cdot)$. En este caso, se asume una función de producción de tipo Cobb–Douglas homogénea de grado 1:

$$y_i = a_1 + b_1 k_i + b_2 l_i + b_3 h_i + b_4 ci_i + v_i - u_i, \quad (2)$$

donde y_i es el logaritmo de la producción de quinua, k_i , l_i , h_i , ci_i corresponden a los logaritmos del capital, trabajo, tierra y consumo intermedio, respectivamente, y $b_1 + b_2 + b_3 + b_4 = 1$. El error puede descomponerse en dos términos $v_i \sim N(0, \sigma_v^2)$ y $u_i \sim N^+(z' \delta, \sigma_u^2)$, donde el ratio $\gamma = \sigma_u^2 / (\sigma_v^2 + \sigma_u^2)$ refleja la proporción del término de error que se debe a los efectos de la ineficiencia.

La forma de producción Cobb–Douglas es escogida debido al elevado nivel de multicolinealidad que se observa al usar alternativamente una función translogarítmica. Este problema econométrico se presenta también en la ecuación (2), por lo que se la redefine como:

$$y_{hi} = a_1 + b_1 k_{hi} + b_2 l_{hi} + b_4 ci_{hi} + v_i - u_i, \quad (2')$$

Donde y_{hi} es la producción por unidad de tierra, k_{hi} el capital por unidad de tierra, l_{hi} el trabajo por unidad de tierra y ci_{hi} el consumo intermedio por unidad de tierra

La ineficiencia técnica es capturada por u_i y está dada por la siguiente ecuación:

$$u_i = \sum_j^J \delta_j z_{ji} + w_i, \quad j = 1, \dots, J \quad (3)$$

donde w_i es un error aleatorio y las variables z_{ji} están asociadas a factores de ineficiencia que provienen de la forma de producir: Un dado coeficiente δ_j captura la relación entre z_{ji} y la ineficiencia. Así, la eficiencia técnica de la producción para el i -ésimo productor puede ser definida como:

$$TE_i = \exp\{-u_i\} = \exp\{-\sum_j^J \delta_j z_{ji} - w_i\}, \quad (4)$$

3. Producción, insumos y tecnología

Datos

La información utilizada proviene de una encuesta realizada por la Fundación INESAD¹ en el año 2024 a los pequeños productores de quinua de las comunidades de Capura, Florida, Vintuta y Bella Vista, que se encuentran en el Altiplano Sur de Bolivia y forman parte de la región más tradicional de producción del grano en el mundo. Los datos primarios ascienden a un total de 56 observaciones y se encuentran a nivel de productor y parcela.

La encuesta de la Fundación INESAD fue diseñada de manera aleatoria y estratificada, asegurando la inclusión de diversos subgrupos de productores y productoras. Este enfoque permite obtener una representación más precisa de las condiciones de producción y las características socioeconómicas de los encuestados, capturando así la diversidad en las prácticas agrícolas y las variaciones en la eficiencia de producción entre diferentes grupos.

La construcción de las variables utilizadas se basa en trabajos previos sobre la medición de eficiencia y productividad en actividades agrícolas en la región latinoamericana (ver, *e.g.*, Trindade y Fulginiti 2015; y Freitas *et al.*, 2021). Estas son:

- **Producción:** La variable representa la cantidad de quinua cosechada, la cual es medida en toneladas métricas (ton). Es importante señalar que algunos autores, por ejemplo, Battesse y Coelli (1995) y Freitas *et al.* (2021), utilizan el valor de la producción como variable dependiente de la función de producción.
- **Capital:** Considera el alquiler de la maquinaria agrícola y los costos de mantenimientos de instrumentos agrícolas que son utilizados en el ciclo

¹ La encuesta se realizó en el marco del proyecto “Creating Indigenous Women’s Green Jobs Under Low-Carbon COVID-19 Responses and Recovery in the Bolivian Quinoa Sector” desarrollado por la Fundación INESAD bajo el patrocinio del Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (IDRC), Canadá.

productivo, y es medido en bolivianos. Algunos autores incluyen a este capital también el costo del consumo intermedio, y obtienen los recursos financieros invertidos en insumos y tecnología (ver, *e.g.*, Feder *et al.*, 1985).

- **Trabajo:** La variable mide la mano de obra utilizada en jornales durante el ciclo productivo –preparación del terreno, siembra, abonamiento, labores culturales, control fitosanitario y cosecha–, e incluye la asalariada y la no-asalariada –*i.e.* el trabajo del responsable principal de la producción de quinua en la familia–. Los jornales corresponden a ocho horas de trabajo por día. Dinar *et al.* (2007) apuntan a que esta variable influye de manera importante a la eficiencia y la productividad en la agricultura.
- **Tierra:** La variable mide la superficie cultivada, un factor clave en la productividad agrícola (Pender *et al.*, 2004).
- **Consumo intermedio:** La variable mide el costo en semillas, fertilizantes y otros costos operativos en bolivianos. La encuesta cuenta con la variable “costo total en bolivianos”, por lo que el costo intermedio ha sido obtenido descontando de esta variable el costo de mano de obra y el costo del capital. A su vez, el costo de mano de obra es igual al trabajo asalariado por el costo del jornal -120 bolivianos en promedio, de acuerdo a las declaraciones de los productores-.

Las variables relacionadas con la eficiencia técnica son asociadas con aquellas relativas a una producción sostenible, siendo las candidatas:

- **Huella verde (z_1):** La variable corresponde al volumen de agua de lluvia almacenada en el suelo (agua verde) que es utilizada durante el ciclo fenológico de la quinua, y es medida en litros por tonelada (lt/ton). Hoekstra y Mekonnen (2012) señala que la variable es crucial para evaluar la sostenibilidad y eficiencia del uso del agua, especialmente en regiones donde este recurso es escaso. Además, la variable afecta la eficiencia técnica al asociarse con la capacidad de los productores de minimizar el uso de los insumos sin afectar la producción (Kumbhakar y Lovell, 2000).
- **Productividad del agua (z_2):** La variable indica cuántas toneladas de quinua se producen por metro cúbico de agua utilizado, y es medida como ton/m³. De acuerdo a Molden (1997) y Kumbhakar y Lovell (2000), la métrica es esencial para evaluar la eficiencia en la producción agrícola por unidad de uso de agua.
- **Tecnología de uso del agua (z_3):** La variable es dicotómica y mide el tipo de tecnología utilizada, la cual puede ser: i) seco (=0), cuando el cultivo depende solamente del agua de la lluvia; ii) riego (=1), cuando, además del agua de la lluvia, el cultivo recibe agua adicional de ríos, pozos o represas, entre otros. La

identificación del tipo de tecnología permite analizar su efecto en la productividad (Zhang *et al.*, 2011).

- **Buenas prácticas agrícolas (z_4):** La variable es dicotómica e indica si el productor está implementado (=1) o no (=0) una buena práctica agrícola (suelo, agua o ambas). Estas buenas prácticas agrícolas (BPA) son esenciales para promover la sostenibilidad y para la regeneración de suelos y, por lo tanto, impactan en la eficiencia y la salud del suelo (Pretty, 2008).
- **Adaptación al cambio climático (z_5):** La variable es dicotómica y toma el valor de 1 cuando el productor señala que realizó alguna acción de adaptación al cambio climático –planes de contingencia, gestión de riesgos climáticos, diversificación de cultivos- y 0 en caso contrario. Las medidas en esta línea son cruciales para mantener el cultivo quinua en un contexto de variabilidad climática, incidiendo sobre la eficiencia de producción (Nelson *et al.*, 2009).

Las medidas asociadas con una producción sostenibles –tecnologías de manejo del agua, buenas prácticas agrícolas y adaptación al cambio climático– no solamente contribuyen a mejorar los ecosistemas sino también pueden mejorar la productividad y reducir las pérdidas, lo que se traduce en una mayor eficiencia. Cabe notar que los efectos se manifiestan en la capacidad de los productores para operar de manera más eficiente dentro de la función existente (Fried *et al.*, 1993). Al integrar estos factores, la metodología SFA se alinea con enfoques contemporáneos que reconocen la interconexión entre la eficiencia productiva y la sostenibilidad ambiental (Coelli *et al.*, 2005).

La Tabla 1 presenta las estadísticas descriptivas de las variables bajo análisis, antes de ser modificadas –estimadas a partir de la encuesta de INESAD–, y la Tabla 2 muestra las correlaciones con las variables principales medidas en logaritmos neperianos.

La producción y la producción por parcela presentan una alta variabilidad, lo que se asocia con diferencias significativas en las inversiones realizadas por los productores; que se reflejan en la alta correlación con las variables de capital y consumo intermedio. La producción por parcela promedio llega a 1,15 ton, con una desviación estándar de 0,91 ton, lo que indica que, aunque algunos productores realizan inversiones adicionales significativas, como en buenas prácticas agrícolas, muchos operan con costos más bajos. Este fenómeno puede reflejar cierta heterogeneidad en la capacidad y preferencias de los productores para invertir en tecnologías agrícolas.

En relación al trabajo por parcela, se observa un promedio de 28,49 jornales, con un mínimo de 21,77 y un máximo de 38,85 jornales. Esta variable presenta también una alta correlación con las variables categóricas de tecnología del uso del agua (z_3), buenas prácticas agrícolas (z_4) y adaptación al cambio climático (z_5); lo que sugiere que las

prácticas sostenibles para el cultivo, acompañadas de una mayor complejidad en el proceso productivo, influyen en la cantidad de mano de obra requerida.

Tabla 1: Estadísticas descriptivas

Variables	Sigla	Min	Max	Promedio	Desviación Estándar
Producción (ton)	Y	0,09	9,31	1,29	1,64
Trabajo (jornal)	L	2,82	162,88	38,64	38,87
Capital (bs)	K	42,96	2944,00	468,64	515,69
Superficie cultivada (ha)	H	0,11	6,40	1,33	1,34
Costo intermedio (Bs/ha)	CI	101,69	19845,05	2264,37	3466,36
Producción por parcela (ton/ha)	Y/H	0,36	3,23	1,15	0,91
Trabajo por parcela (jornal/ha)	L/H	21,77	38,85	28,49	3,84
Capital (Bs/ha)	K/H	170,00	560,00	376,00	122,90
Costo intermedio (Bs/ha)	CI/H	424,06	6678,78	1790,64	1748,01
Huella verde (ton)	z_1	945000,00	2204714,81	1457586,15	246792,84
Productividad del agua (ton/m ³)	z_2	0,000004	0,000250	0,000131	0,000065
Tecnología (0=Secano,1=Riego)	z_3	0,00	1,00	0,29	0,46
Buena práctica (1=sí,0=no)	z_4	0,00	1,00	0,27	0,45
Adaptación cambio climático (1=sí, 0=no)	z_5	0,00	1,00	0,09	0,29

Fuente: Elaboración propia con base en la encuesta de INESAD a 56 productores.

Por otro lado, la superficie cultivada es baja, con un promedio de 1,33 has por productor; aunque la volatilidad es algo alta –con una desviación estándar de 1,34-. Con todo, la correlación entre el nivel de rendimiento (producción por parcela) y superficie cultivada es negativa, lo que se asocia con el hecho de que algunos productores han utilizado tierras marginales para la producción, menos aptas para el cultivo. Esto muestra la dificultad de producir desde una perspectiva de economías de escala. En contraste, la correlación entre el trabajo por parcela y la superficie cultivada es positiva, lo que muestra que el aumento de las tierras requiere cada vez más trabajo –ceteris paribus-.

Por último, cabe destacar la alta correlación entre la superficie cultivada y el trabajo, que llega a 0,994. Como se mencionó anteriormente, este resultado ha limitado la forma funcional del proceso productivo por fuertes problemas de multicolinealidad.

En relación con la huella verde (z_1), el promedio se sitúa en $1.457,59 \cdot 10^3$ lt/ton. Estos valores reflejan el grado de dependencia del recurso hídrico para el cultivo de la quinua, que usualmente es bajo; aunque en las comunidades analizadas el agua es también muy escasa. La productividad del agua (z_2) tiene un promedio de solo $0,13 \cdot 10^{-3}$ Kg/m³, lo cual es más baja que en Ecuador y Bolivia (Aliaga, 2024a). Este dato sugiere que, a pesar de que la necesidad del recurso para la producción de quinua es baja comparada con otros cultivos, la eficiencia también es baja.

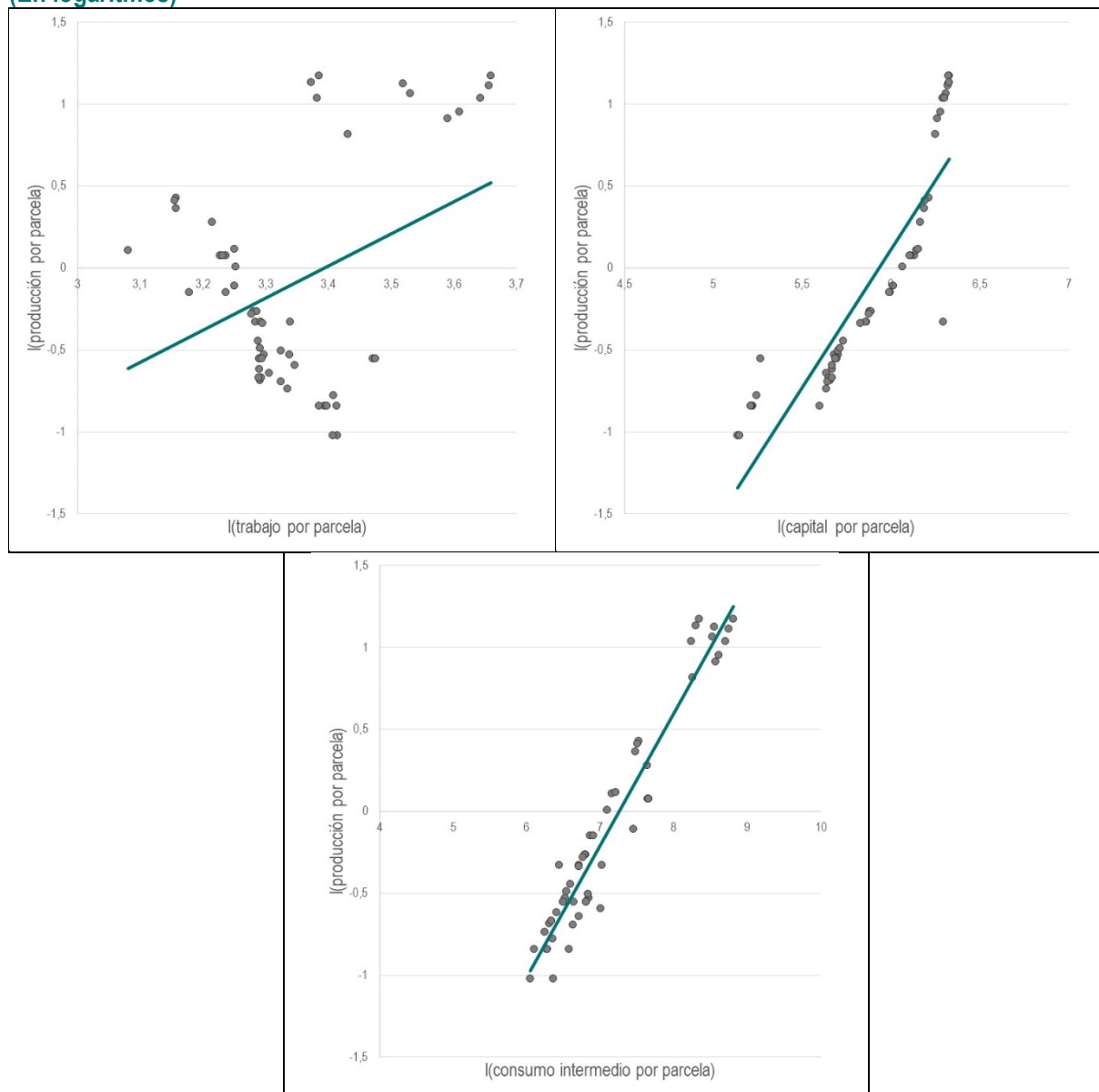
Tabla 2: Correlaciones de Pearson

	<i>y</i>	<i>L</i>	<i>k</i>	<i>H</i>	<i>Ci</i>	<i>y_h</i>	<i>l_h</i>	<i>k_h</i>	<i>ci_h</i>	<i>z₁</i>	<i>z₂</i>	<i>z₃</i>	<i>z₄</i>
<i>y</i>	1,000												
<i>l</i>	0,838	1,000											
<i>k</i>	0,936	0,944	1,000										
<i>h</i>	0,813	0,994	0,945	1,000									
<i>ci</i>	0,995	0,820	0,916	0,791	1,000								
<i>y_h</i>	0,359	-0,201	0,041	-0,251	0,386	1,000							
<i>l_h</i>	0,426	0,319	0,244	0,210	0,461	0,372	1,000						
<i>k_h</i>	0,279	-0,246	0,067	-0,263	0,288	0,887	0,080	1,000					
<i>ci_h</i>	0,538	0,011	0,233	-0,045	0,576	0,967	0,472	0,823	1,000				
<i>z₁</i>	-0,265	0,105	-0,101	0,100	-0,281	-0,602	0,065	-0,603	-0,593	1,000			
<i>z₂</i>	0,124	-0,309	-0,112	-0,342	0,135	0,755	0,200	0,713	0,678	-0,134	1,000		
<i>z₃</i>	0,308	-0,147	0,015	-0,200	0,324	0,833	0,404	0,651	0,795	-0,424	0,643	1,000	
<i>z₄</i>	0,331	-0,152	0,019	-0,208	0,351	0,884	0,428	0,689	0,852	-0,460	0,674	0,956	1,000
<i>z₅</i>	0,149	-0,155	-0,082	-0,212	0,168	0,587	0,438	0,404	0,557	-0,277	0,477	0,495	0,518

Fuente: Elaboración propia con base en la encuesta de INESAD a 56 productores.

Por otro lado, las variables categóricas relacionadas con una producción sostenible - z_3 , z_4 y z_5 - evidencian una baja implementación de tecnologías y prácticas sostenibles, con promedios de 29%, 27% y 9%, respectivamente. La adopción de estas medidas no solo puede optimizar el uso de recursos, sino también aumentar la resiliencia del cultivo frente a las variaciones climáticas.

Figura 1: Relación entre la producción por parcela y los insumos utilizados por parcela (En logaritmos)



Fuente: Elaboración propia con base en la encuesta de INESAD a 56 productores.

Nota: La línea azul representa la regresión lineal entre las variables.

Las correlaciones entre la producción por parcela y las variables potenciales que explican la eficiencia son altas en todos los casos, con los signos esperados. Destacan los valores positivos relacionados con la tecnología del uso del agua (z_3) y las buenas prácticas

agrícolas (z_4); mostrando que las medidas relacionadas con una producción sostenible aumentan el rendimiento del cultivo. Sin embargo, el capital y el consumo intermedio también presentan correlaciones altas con estas variables; lo que sugiere que estas prácticas sostenibles aumentan la producción, pero también los costos.

Finalmente, la Figura 1 presenta la relación entre la producción por parcela con los insumos utilizados –también a nivel de parcela- en logaritmos. Las variables de producción y trabajo tienen una alta dispersión, lo cual puede estar asociado con la necesidad de contar con mano de obra fija –como es aquella del dueño de la parcela- con cierta independencia del tamaño de la parcela. En contraste, la producción con el capital y con el consumo intermedio tienen una baja dispersión.

4. Resultados

La Tabla 3 presenta los resultados de la estimación del modelo SFA con la metodología propuesta por Battese y Coelli (1995). La estimación se realiza por el método de Máxima Verosimilitud, utilizando el paquete “sfa” de R que está basado en el código de Frontier 4.1 (Coelli, 1996). Los coeficientes estimados corresponden a las elasticidades de la producción por parcela en relación a los insumos por parcela.

Tabla 3. Estimación de la Función de Producción (ecuación (2'))

Variables	Coficiente	P-valor
Constante	-5,722***	0,000
k_h (log del capital Bs/ha)	0,517***	0,000
l_h (log del trabajo jornales/ha)	-0,050	0,754
ci_h (log del consumo intermedio Bs/ha)	0,432***	0,000
z_1 (huella verde)	0,021	0,198
z_2 (productividad del agua)	-0,013	0,563
z_3 (tecnología uso del agua)	-0,021	0,891
z_4 (buenas prácticas agrícolas)	-0,247	0,175
z_5 (adaptación cambio climático)	-4,278***	0,000
ΣSq	0,009***	0,000
Γ	1,000***	0,000
LL (Log likelihood)	50,060	
Observaciones	56	
Eficiencia	0,723	

Fuente: Elaboración propia con base en la encuesta de INESAD.

Nota: Errores estándar y nivel de significación de 1% (*), 5% (**), y 10% (*).

La elasticidad del **capital** (Bs/ha) es positiva y significativa al nivel del 1% (p-valor de 0.000) y muestra que un aumento del 1% en estos gastos conduce a un incremento en la producción (ton/ha) del 0,517%.

El coeficiente del **trabajo** (jornal/ha) es negativo, -0,050; pero no significativo (p-valor de 0,754). Esto refleja una alta dispersión entre las variables; pero también la alta correlación de este factor de producción con los restantes insumos (ver Tabla 2 y Figura 1): la relevancia del trabajo se explica por el capital y el consumo intermedio, pero no de manera independiente. Como se señaló anteriormente, este resultado puede ser explicado por el hecho de que una parte del trabajo de los productores es fija; sin embargo, también puede estar asociado con la necesidad de contar con mano de obra adicional en los casos donde las condiciones climáticas o de enfermedades, entre otros, sean particularmente adversas –afectando negativamente a la producción–. Estos fenómenos fueron documentados por Battese y Coelli (1995), quienes observaron que la relación entre la producción agrícola y el trabajo puede incluso volverse negativa y significativa.

El **consumo intermedio** (Bs/ha) presenta un coeficiente positivo y significativo al nivel del 1% (p-valor de 0.000) y muestra que un aumento del 1% en estos gastos aumenta la producción (ton/ha) en 0,432%.

Finalmente, la **constante** tiene un valor significativo de -5.722, que implica que la producción es 0,003 ($\exp(-5.722)$) cuando todos los insumos son cero.

En relación a la ecuación de ineficiencia, solamente la variable de **adaptación al cambio climático** (z_5) es estadísticamente significativa al 5% de probabilidad, con un coeficiente de -4,278, y signo esperado; disminuyendo la ineficiencia. Este resultado parece reflejar tanto la alta correlación con la eficiencia técnica como la especial relevancia de la implementación de estrategias adaptativas frente a eventos climáticos adversos, mitigando las pérdidas del cultivo.

El parámetro **SigmaSq** (que corresponde a la sumatoria de las varianzas de los errores v_i y u_i) muestra un valor de 0,009 al nivel de confianza del 1%, lo cual muestra que la varianza es estadísticamente diferente de cero. Además, **Gamma** (igual a la varianza de u_i sobre **SigmaSq**) es igual a 1, significativa al 1%, y muestra que la variabilidad del error se explica esencialmente por el componente de la ineficiencia técnica, lo que refuerza la necesidad de mejorar las prácticas de producción.

Por último, la **eficiencia media** estimada es de 0,7234, lo que indica que los productores de quinua están operando al 72.34% de su potencial. Esto muestra un amplio margen para mejorar la eficiencia en la producción de quinua, asociado principalmente a una producción más sostenible –incluyendo especialmente medidas de adaptación al cambio climático–, lo que puede traducirse en mayores rendimientos y beneficios económicos para los productores.

Por otro lado, la Tabla 4 muestra el contraste de la prueba de Wald que compara el modelo SFA frente a MCO (Mínimos Cuadrados Ordinarios) en la estimación de (2'). Esta se basa en una prueba de razón de verosimilitudes para comprobar si la estimación bajo MCO –sin ineficiencia y sin error unidireccional– es estadísticamente mejor que aquella basada en SFA. El resultado de la prueba da una estadística Chi-cuadrado (χ^2) de 32,846 con un p-valor de 0,000; lo que es evidencia robusta a favor de la metodología SFA, evidenciando ineficiencias en la producción de quinua.

Tabla 4. Contrastes de metodologías de estimación para la especificación correcta

Contrastes	χ^2	Pr(> χ^2)	Decisión (5%)
Cobb-Douglas (MCO) vs Cobb-Douglas (SFA)	32,846	0,000	Cobb-Douglas (SFA)

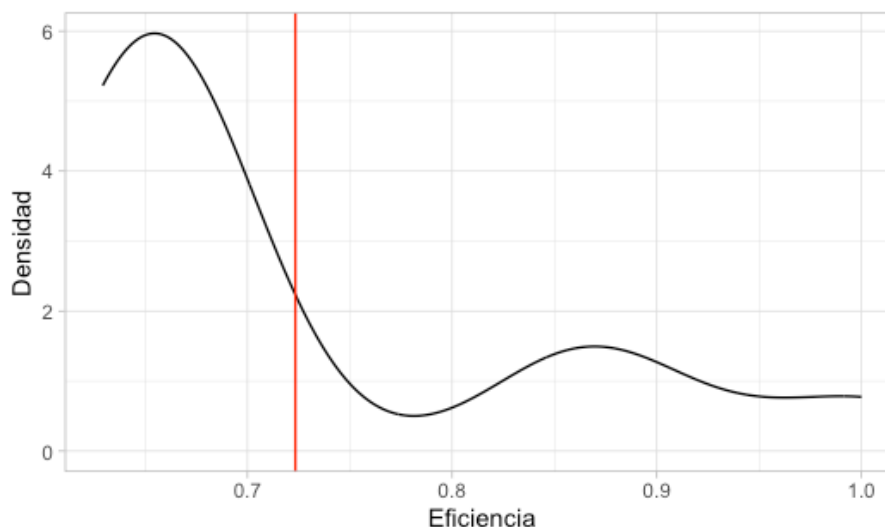
Fuente: Elaboración propia con base en la encuesta de INESAD.

Finalmente, la Figura 2 muestra la distribución de la eficiencia (sobre 1) de la producción de quinua a nivel productor. Como se mencionó anteriormente, la media se sitúa en 0,7234 (línea roja); pero la distribución presenta una asimetría positiva. La forma de la curva indica que hay una concentración significativa de productores que operan con niveles de eficiencia bajos, entre 0,4 y 0,7, lo que sugiere que varios productores están operando por debajo de su potencial óptimo; aunque existen prácticas o condiciones específicas que permiten a otros productores alcanzar niveles óptimos de eficiencia, cercanos a 1.

En general, la función de distribución muestra que muchos productores pueden mejorar el rendimiento de la quinua haciendo más eficiente su producción, mediante prácticas agrícolas sostenibles, donde resalta en particular las medidas de adaptación al cambio climático. Estas intervenciones pueden ir acompañadas con programas de capacitación que se enfoquen en las técnicas utilizadas por los productores más eficientes, así como con el acceso a insumos de calidad y tecnología apropiada. Además, la identificación de los productores más eficientes puede facilitar la creación de redes de aprendizaje y

colaboración entre agricultores. Esto no solo fortalecería la comunidad agrícola, sino que también podría resultar en un aumento general de la productividad en la región.

Figura 2. Distribución de la eficiencia de los productores de quinua



Fuente: Elaboración propia con base en la encuesta de INESAD a 56 productores.
Nota: La línea roja representa la media de la eficiencia (0,7234).

Adicionalmente, en el Apéndice, Tabla 5 detalla la eficiencia estimada a nivel de productor y su *ranking* en la muestra. Este ejercicio es de gran utilidad, ya que permite a los productores compararse con sus pares, identificando las mejores prácticas que podrían ser replicadas. Por ejemplo, aquellos productores que logran una eficiencia cercana a 1 pueden estar utilizando tecnologías avanzadas, prácticas de manejo agronómico más efectivas o acceso a recursos que optimizan su producción.

Desde una perspectiva económica, el análisis de eficiencia también puede servir como base para la formulación de políticas públicas dirigidas a fomentar la capacitación y el acceso a recursos. Las instituciones agrícolas pueden diseñar programas de formación que aborden las brechas de eficiencia identificadas, enfocándose en técnicas de cultivo, manejo de insumos y uso eficiente del agua.

En relación con otros estudios, la eficiencia estimada guarda cierta consistencia con otros trabajos realizados en Perú con similares metodologías, como se aprecia en la Tabla 5.

Tabla 5. Eficiencias obtenidas por otros estudios

País/muestra	Eficiencia	Metodología	Autor
421 productores provenientes de Puno, Perú	0,68 de eficiencia técnica promedio	SFA, Cobb-Douglas	Ataucusi <i>et al.</i> (2023)
409 productores provenientes de Puno, Perú	0,474 de eficiencia técnica promedio	SFA, Cobb-Douglas	Mercado <i>et al.</i> (2022)
367 productores provenientes de Junín, Perú	0,182 de eco-eficiencia promedio, considerando daño ambiental	DEA, no paramétrico	Gamboa <i>et al.</i> (2020)

Fuente: Elaboración propia.

Ataucusi *et al.* (2023) concluyen que la zona Suni presenta una mayor eficiencia técnica en la producción de quinua (0,74) en comparación con otras zonas (promedio de 0,68). Con una muestra similar, Mercado *et al.* (2020) hallan que la eficiencia técnica general de los productores es baja (0,474) y que entre los grupos la diferencia no es sustancial. Estos niveles de eficiencia pueden explicarse por las prácticas tradicionales, centradas en una agricultura predominantemente de subsistencia y en pequeñas zonas de cultivo.

Por otra parte, Gamboa *et al.* (2020), utilizando un enfoque de Análisis de Datos Envolvente (DEA), miden la ecoeficiencia, considerando los daños ambientales ocasionados por la producción de quinua. Los autores muestran que la ecoeficiencia de los pequeños productores de quinua es baja, en promedio 18,2%, debido al uso excesivo de fertilizantes minerales y la trilla mecánica. En este sentido, sugieren que, si bien la quinua puede contribuir a una producción de alimentos más sostenible, es necesario mejorar las prácticas de manejo del suelo de los agricultores andinos para reducir el impacto ambiental y aumentar la eficiencia.

5. Conclusiones

Las conclusiones derivadas del análisis de la producción de quinua resaltan varios aspectos críticos que afectan tanto la sostenibilidad como la eficiencia del sector. Estas conclusiones ofrecen un marco para el desarrollo de estrategias que no solo beneficien a los productores, sino que también aseguren la viabilidad a largo plazo de la producción de quinua. Los principales hallazgos del trabajo son los siguientes:

Heterogeneidad en la capacidad de inversión:

La variabilidad en la producción de quinua revela diferencias significativas en las inversiones realizadas por los productores. Esto se traduce en una heterogeneidad en la capacidad de los productores para invertir en tecnologías, lo que puede influir en su competitividad y sostenibilidad. Aquellos que tienen menor producción pueden estar limitados en su acceso a recursos y tecnologías que optimicen su producción, lo que a su vez afecta la calidad y el rendimiento de sus cultivos.

Para abordar esta desigualdad, es fundamental implementar políticas que fomenten la inversión en tecnologías y capacitación para los productores de menor capacidad. Esto podría incluir subsidios para la adquisición de maquinaria, acceso a créditos blandos o programas de formación que les permitan mejorar sus técnicas de cultivo. De esta manera, se busca nivelar el campo de juego y promover una producción más eficiente y sostenible.

Inadecuada gestión de la mano de obra:

La relación no significativa entre trabajo y producción destaca un desafío significativo para los productores de quinua. En épocas de escasez de precipitaciones, el aumento en la mano de obra no se traduce en un incremento proporcional de la producción (factor fijo tierra), lo que sugiere que la gestión del trabajo debe ser reevaluada. Esto puede llevar a una sobrecarga de trabajo sin los resultados esperados, afectando la rentabilidad y la moral de los trabajadores.

Para mitigar este problema, es recomendable desarrollar políticas que integren tecnologías de riego y gestión del agua que alivien la carga de trabajo en condiciones climáticas desfavorables. La promoción de prácticas agrícolas resilientes, como la rotación de cultivos y el uso de variedades de quinua más resistentes a la sequía, también puede ser beneficiosa. Estas estrategias no solo optimizarían la producción, sino que también pueden mejorar la calidad de vida de los productores.

Inadecuado manejo del recurso agua:

La huella hídrica promedio de quinua indica un uso insostenible del recurso hídrico. Este alto consumo de agua plantea serias preocupaciones sobre la sostenibilidad de la producción, especialmente en regiones donde el agua es un recurso limitado. La dependencia de una huella hídrica tan elevada puede comprometer tanto la viabilidad del cultivo como la salud de los ecosistemas locales.

Para abordar esta problemática, es crucial implementar políticas que promuevan prácticas de manejo sostenible del agua. Esto incluye la adopción de sistemas de riego más eficientes, como el riego por goteo, y la recolección de agua de lluvia. Además, se debe fomentar la investigación en técnicas agronómicas que reduzcan la huella hídrica, garantizando así la sostenibilidad a largo plazo de la producción de quinua.

Baja inversión en capacitación y tecnología:

La adopción de buenas prácticas agrícolas está directamente relacionada con la reducción de la ineficiencia en la producción. La implementación de técnicas agronómicas adecuadas no solo mejora la eficiencia productiva, sino que también contribuye a una mayor rentabilidad para los productores. Sin embargo, muchos agricultores carecen de acceso a la información y capacitación necesaria para aplicar estas prácticas.

Por lo tanto, es fundamental que las políticas públicas se centren en la capacitación y el acceso a tecnología moderna para los productores de quinua. Esto podría incluir programas de formación continua, talleres prácticos y asesoramiento técnico. Invertir en la educación y en la transferencia de tecnología es esencial para mejorar la producción de quinua y asegurar la competitividad en el mercado.

Bajo nivel de eficiencia en la producción de quinua:

La eficiencia media estimada del 54.75% revela que los productores de quinua están operando a menos de la mitad de su potencial. Este dato indica un amplio margen para mejorar la eficiencia en la producción, lo que podría traducirse en mayores rendimientos y beneficios económicos. La identificación de las mejores prácticas y la optimización de los recursos son pasos clave para aprovechar este potencial.

Para capitalizar esta oportunidad, se deben desarrollar políticas que incentiven la investigación y el desarrollo en técnicas de producción más eficientes. Esto puede incluir la creación de redes de colaboración entre productores, investigadores y técnicos agrónomos para compartir conocimientos y experiencias. Al fomentar un entorno de aprendizaje y mejora continua, se puede aumentar significativamente la eficiencia en la producción de quinua, beneficiando a toda la comunidad agrícola.

Bibliografía

Aliaga Lordemann, J., Capriles, A, y Antezana, N. (2024a). *Evaluación de perfiles de huella hídrica: Análisis del ciclo de vida de la quinua en Bolivia*. Development Research Working Paper Series No 14/2024, Institute for Advanced Development Studies.

Aliaga Lordemann, J., Garrón Vedia, I., y Lenis Abastoflor, M. C. (2024b). *Rastreado la trayectoria de los precios de la quinua en Bolivia: Quiebres estructurales y persistencia de choques*. Development Research Working Paper Series No. 08/2024. Institute for Advanced Development Studies.

Aigner, D., Lovell, C. K., y Schmidt, P. (1977). *Formulation and estimation of stochastic frontier production function models*. Journal of econometrics, 6(1), 21-37.

Alandia, G., Rodriguez, J. P., Jacobsen, S. E., Bazile, D., y Condori, B. (2020). *Global expansion of quinoa and challenges for the Andean region*. Global Food Security, 26, 100429.

Andreotti, F., Bazile, D., Biaggi, C., Callo-Concha, D., Jacquet, J., Jemal, O. M., King, O. I., Mbosso, C., Padulosi, S., Speelman, E. N., y van Noordwijk, M. (2022). *When neglected species gain global interest: Lessons learned from quinoa's boom and bust for teff and minor millet*. Global Food Security, 32, 100613.

Ataucusi, Y., Mercado, W., Ponce, R., Orihuela, C., Luna, H., Ortiz, H., y Mogollon, R. (2023). *La Eficiencia de la producción de quinua en zonas altoandinas: el caso de Puno-Perú*. Revista Iberoamericana de Estudios Municipales, 1–21. Internet Archive. Recuperado de <https://doi.org/10.32457/riem27.2047>.

Battese, G. E., y Coelli, T. J. (1995). *A model for technical inefficiency effects in a stochastic frontier production function for panel data*. Empirical economics, 20, 325-332.

Bazile, D., y Baudrom, F. (2015). *The dynamics of the global expansion of quinoa growing in view of its high biodiversity* (C. N. Didier Bazile, Daniel Bertero, Ed.). State of the art report on quinoa around the world in 2013, 478-491.

Bazile, D., Jacobsen, S. E., y Verniau, A. (2016). *The Global Expansion of Quinoa: Trends and Limits*. Frontiers in Plant Science, 7, 184730. www.frontiersin.org

Bravo-Ureta, B. E., y Evenson, R. E. (2007). *The efficiency of agricultural production: A review of the literature*. Agricultural Economics, 36(2), 115-127.

Collao, R., y Muriel, B. (2024). *Situación actual y perspectivas del sector quinuero en Bolivia*. Development Research Working Paper Series No. 06/2024. Institute for Advanced Development Studies.

Coelli, T.J. (1996), *A Guide to FRONTIER Version 4.1: A Computer Program for Stochastic Frontier Production and Cost Function Estimation*, Working Paper No. 7/96, Centre for Efficiency and Productivity Analysis (CEPA), Department of Econometrics, University of New England, Armidale, Australia.

Coelli, T. J., Rao, D. S. P., O'Donnell, C. J., y Battese, G. E. (2005). *An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis*. Springer.

Dinar, A., y Zilberman, D. (2007). *The role of labor in agricultural production: A review of the literature*. *Agricultural Economics*, 36(3), 267-280.

Feder, G., Just, R. E., y Zilberman, D. (1985). *Adoption of agricultural innovation in developing countries: A survey*. *Economic Development and Cultural Change*, 33(2), 255-298.

Ferrara, G. (2020). *Stochastic frontier models using R*. In *Handbook of Statistics* (Vol. 42, pp. 299-326). Elsevier.

Freitas, C. O., de Figueiredo Silva, F., y Neves, M. C. (2021). *A Stochastic Frontier Approach Applied to Farms to Selected Andean Countries*. IDB Technical Note 2220.

Fried, H. O., Lovell, C. A. K., y Schmidt, S. S. (1993). *The Measurement of Productive Efficiency: Techniques and Applications*. Oxford University Press.

Freitas, H. M., et al. (2021). *Productivity and efficiency in Latin American agriculture*. *Agricultural Systems*, 185, 102952.

Gamboa, C., Bojacá, C. R., Schrevers, E., y Maertens, M. (2020). *Sustainability of smallholder quinoa production in the Peruvian Andes*. *Journal of Cleaner Production*, 264, 121657.

González, J. A., Eisa, S. S., Hussin, S. A. E. S., y Prado, F. E. (2015). *Quinoa: An Incan Crop to Face Global Changes in Agriculture. Quinoa: Improvement and Sustainable Production*, 1-18.

Garnett, T., et al. (2013). *Sustainable Intensification in Agriculture: Premises and Policies*. Food and Agriculture Organization.

Grafton, R. Q., Land, D. M., y Ward, M. B. (2018). *The Role of Water Markets in Improving Agricultural Productivity*. Australian Journal of Agricultural and Resource Economics.

Hoekstra, A. Y., y Mekonnen, M. M. (2012). *The water footprint of humanity*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(9), 3232-3237.

Howell, T. A. (2001). *Enhancing Water Use Efficiency in Irrigated Agriculture*. Agronomy Journal.

Jacobsen, S. E. (2011). *The Situation for Quinoa and Its Production in Southern Bolivia: From Economic Success to Environmental Disaster*. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 197(5), 390-399.

Kumbhakar, S. C., y Lovell, C. A. K. (2000). *Stochastic Frontier Analysis*. Cambridge University Press.

Laguna, P., Cáceres, Z., Carimetrán, A. (2006). *Del Altiplano Sur boliviano hasta el mercado global: coordinación, regulación y calidad en el mercado en la cadena de valor de la quinua*. In: Agroindustria Rural y Territorio (tomo1): Los desafíos de los sistemas agroalimentarios localizados. Universidad Autónoma del Estado.

Mercado, W., Ortega, R. ., y Minaya, C. . (2022). *Classification, technical efficiency, and economic performance of producers in the main productive region of quinoa in Peru*. *Scientia Agropecuaria*, 13(2), 175-184. Recuperado de <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2022.016>

Molden, D. (1997). *Accounting for water use and productivity*. SWIM Paper 1. International Water Management Institute.

Meeusen, W., y van Den Broeck, J. (1977). *Efficiency estimation from Cobb-Douglas production functions with composed error*. *International economic review*, 435-444.

Nelson, G. C., et al. (2009). *Climate change: Impact on agriculture and costs of adaptation*. International Food Policy Research Institute.

Núñez de Arco, S. (2015). Chapter 12: *quinoa's calling*. In: Murphy, K., Matanguihan, J. (Eds.), *Quinoa: Improvement and Sustainable Production*. Wiley Blackwell, New Jersey, pp. 211–226. Recuperado de <https://doi.org/10.1002/9781118628041.ch12>.

Pender, J., y Kerr, J. (2004). *The role of land management in agricultural productivity: Evidence from Ethiopia*. *Agricultural Economics*, 30(3), 189-200.

Pretty, J. (2008). *Agricultural sustainability: Concepts, principles and evidence*. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1491), 447-465.

Trindade, E. S., y Fulginiti, L. E. (2015). *Efficiency and productivity in Latin American agriculture: A review*. *Journal of Agricultural Economics*, 66(3), 657-675.

Zhang, H., y Wang, J. (2011). *Water-saving irrigation technologies and their impact on agricultural productivity*. *Agricultural Water Management*, 98(11), 1761-1770.

Apéndice

Tabla 5. Eficiencia y ranking por productor

Productor	Eficiencia	Ranking
1	0.654	43
2	0.871	7
3	0.659	28
4	0.666	17
5	0.656	36
6	0.659	26
7	0.661	21
8	0.651	50
9	0.864	15
10	0.655	42
11	0.653	44
12	0.652	48
13	0.651	49
14	0.657	34
15	0.657	33
16	0.655	41
17	0.652	47
18	0.652	46
19	0.868	10
20	0.641	52
21	0.647	51
22	0.631	55
23	0.634	54
24	0.640	53
25	0.629	56
26	0.872	6
27	0.659	25

28	0.661	22
29	0.867	12
30	1.000	4
31	1.000	1
32	0.866	13
33	0.869	9
34	0.653	45
35	0.655	40
36	0.659	27
37	0.663	18
38	0.661	20
39	0.660	24
40	0.866	14
41	0.662	19
42	1.000	1
43	0.868	11
44	0.669	16
45	0.659	30
46	0.656	38
47	0.656	37
48	0.658	32
49	0.660	23
50	1.000	3
51	1.000	5
52	0.870	8
53	0.659	29
54	0.657	35
55	0.655	39
56	0.658	31

Nota: Resultados del SFA Cobb Douglas.