

**INSTITUTO DE ESTUDIOS AVANZADOS EN DESARROLLO**



**ANÁLISIS COSTO-EFECTIVIDAD EN EL ALTIPLANO SUR DE  
BOLIVIA: CASO DEL COMPOST PARA LA QUINUA**

**Por:**

**Javier Aliaga Lordemann**

**Liliana Roca**

**Norma Feliciano Carvajal**

Serie Documentos de Trabajo sobre Desarrollo

No. 2/2025

**Febrero, 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.

# ANÁLISIS COSTO-EFECTIVIDAD EN EL ALTIPLANO SUR DE BOLIVIA: CASO DEL COMPOST PARA LA QUINUA\*

Javier Aliaga Lordemann\*\*

Liliana Roca\*\*\*

Norma Feliciano Carvajal\*\*\*\*

## Resumen

En el Altiplano Sur de Bolivia los patrones climáticos alterados han afectado negativamente la producción de cultivos esenciales. Particularmente, han afectado a la quinua, que ha ganado popularidad mundial como un superalimento. El aumento en su demanda ha ejercido una presión considerable sobre los agricultores locales para mejorar sus prácticas de cultivo y adaptarse a condiciones climáticas cada vez más adversas. La implementación de Buenas Prácticas Agrícolas (BPA), específicamente el uso del compost, surge como una estrategia para mejorar la calidad del suelo, reducir la dependencia de fertilizantes químicos perjudiciales y, potencialmente, aumentar los rendimientos de los cultivos y los ingresos de los agricultores.

Esta investigación realiza un análisis costo-efectividad del uso del compost en la producción de quinua del Altiplano Sur. Es aplicado por el Instituto de Estudios Avanzados en Desarrollo (INESAD) en el marco de un proyecto piloto sobre producción sostenible. En él se aplicaron dosis de compost a parcelas de quinua de pequeños productores, lo que ha permitido evaluar su impacto en los rendimientos de los cultivos, en los ingresos y en los costos operativos. La metodología de

---

\* 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*, actualmente desarrollado por la Fundación INESAD bajo el patrocinio del Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (IDRC), Canadá. Los posibles errores son de entera responsabilidad de sus autores.

\*\* Es economista e investigador *senior* asociado de INESAD en temas de economía del cambio climático, agricultura, energía y financiamiento climático. Fue director del Centro de Excelencia para el Clima y la Sostenibilidad, y director del Instituto de Investigaciones Socio Económicas (IISEC). Actualmente es miembro de número de la Academia Boliviana de Ciencias Económicas, ([jaliaga@inesad.edu.bo](mailto:jaliaga@inesad.edu.bo))

\*\*\* Investigadora invitada de INESAD, ([lilicaroca24@gmail.com](mailto:lilicaroca24@gmail.com))

\*\*\*\* Investigadora invitada de INESAD, ([normaarely2015@gmail.com](mailto:normaarely2015@gmail.com))

trabajo incluyó un análisis del costo-beneficio de las BPA, complementado con un análisis de costo-efectividad. Adicionalmente, se realizaron mediciones de la huella de carbono antes y después de la implementación de las prácticas de compostaje con la herramienta *Cool Farm Tool*, lo que permitió evaluar de forma integral los beneficios económicos y ambientales asociados al uso del compost.

Los hallazgos indican que la aplicación del compost mejora significativamente los rendimientos de la quinua. El rendimiento promedio aumentó de 877 kg/ha a 1.109 kg/ha, lo que representa una mejora del 26,66% atribuible al uso del compost. Aunque se observaron pérdidas en los niveles de materia orgánica y nitrógeno del suelo, las parcelas con compost mostraron una menor disminución en comparación con las parcelas de control. La huella de carbono total asociada al uso del compost fue mayor, como era de esperar, pero aumentó en un 15% el secuestro de carbono en suelo, y además generó una mejora en el rendimiento y los beneficios para la salud del suelo, lo que justifica económicamente esta práctica. El análisis de costos reveló que, si bien la inversión inicial en compostaje es considerable, los beneficios a largo plazo en términos de productividad y sostenibilidad son significativos.

El estudio concluye que la adopción de BPA, especialmente el compostaje, es una estrategia eficaz para mejorar la producción de quinua y reducir las huellas de carbono en el Altiplano Sur. Es esencial que los agricultores consideren la recuperación del suelo como una inversión a largo plazo que no solo podría mejorar la productividad inmediata, sino que también puede apoyar en la sostenibilidad agrícola. Se recomienda expandir la implementación del compostaje en más fincas, asegurar el compromiso de los productores a lo largo del estudio y promover el cultivo de plantas nativas de cobertura para mejorar la materia orgánica del suelo y las capacidades de secuestro de carbono. Al optimizar las prácticas agrícolas y gestionar los costos de manera efectiva, los agricultores pueden lograr mejores resultados financieros mientras contribuyen a la sostenibilidad ambiental.

**Código JEL:** Q12, Q13, Q18, Q51, Q54.

**Palabras clave:** costo-efectividad, compost, cambio climático, huella de carbono, quinua.

## Abstract

In the Southern Altiplano of Bolivia, altered climate patterns have negatively impacted the production of essential crops. In particular, quinoa, which has gained global popularity as a superfood, has been affected. The increased demand has placed considerable pressure on local farmers to improve their cultivation practices and adapt to increasingly adverse climatic conditions. The implementation of Good Agricultural Practices (GAP), specifically the use of compost, has emerged as a strategy to enhance soil quality, reduce reliance on harmful chemical fertilizers, and potentially increase crop yields and farmer incomes.

This research conducts a cost-effectiveness analysis of compost use in quinoa production in the Southern Altiplano. It is applied by the Institute for Advanced Development Studies (INESAD) within the framework of a pilot project on sustainable production. Compost doses were applied to quinoa plots of small producers, allowing for the evaluation of their impact on crop yields, incomes, and operational costs. The methodology included a cost-benefit analysis of GAP, complemented by a cost-effectiveness analysis. Additionally, carbon footprint measurements were taken before and after implementing composting practices using the Cool Farm Tool, enabling a comprehensive assessment of the economic and environmental benefits associated with compost use.

The findings indicate that compost application significantly improves quinoa yields. The average yield increased from 877 kg/ha to 1,109 kg/ha, representing a 26.66% improvement attributable to compost use. Although losses in soil organic matter and nitrogen levels were observed, the compost-treated plots showed a smaller decrease compared to the control plots. The total carbon footprint associated with compost use was higher, as expected, but carbon sequestration in the soil increased by 15%, along with improvements in yield and soil health benefits, justifying this practice economically. The cost analysis revealed that while the initial investment in composting is considerable, the long-term benefits in terms of productivity and sustainability are significant.

The study concludes that the adoption of GAP, especially composting, is an effective strategy for improving quinoa production and reducing carbon footprints in the Southern Altiplano. It is essential for farmers to view soil recovery as a long-term investment that could not only enhance immediate productivity but also support agricultural sustainability. Expanding composting implementation on more farms, ensuring producer commitment throughout the study, and promoting the cultivation of native cover crops to improve soil organic matter and carbon sequestration capabilities are recommended. By optimizing agricultural practices and managing costs effectively, farmers can achieve better financial outcomes while contributing to environmental sustainability.

**JEL Code:** Q12, Q13, Q18, Q51, Q54.

**Keywords:** cost-effectiveness, compost, climate change, compost, carbon footprint, quinoa.

## 1. Introducción

El Altiplano Sur de Bolivia, conocido por su rica diversidad cultural y su notable riqueza agrícola, enfrenta desafíos significativos debido a los efectos del cambio climático. Dicho fenómeno ha alterado los patrones climáticos, lo que ha afectado en la producción de cultivos fundamentales de la región. De todos ellos, la quinua es uno de los más impactados. Este cereal andino, aclamado como un superalimento por su alto contenido nutricional y sus propiedades beneficiosas para la salud, ha ganado popularidad a nivel mundial. El incremento en su demanda ha generado una presión considerable sobre los agricultores locales, quienes se ven obligados a mejorar sus prácticas de cultivo y a adaptarse a condiciones climáticas cada vez más adversas (Báez y Lema, 2018).

La implementación de Buenas Prácticas Agrícolas (BPA), como el uso del compost, se presenta como una estrategia crucial para enfrentar estos desafíos. El compostaje no solo mejora la calidad del suelo, sino que también contribuye a la sostenibilidad ambiental porque reduce la dependencia de fertilizantes químicos que pueden resultar perjudiciales para los ecosistemas locales (González y Rojas, 2019). Además, el uso del compost puede aumentar el rendimiento de los cultivos, lo que se traduce en mayores ingresos para los agricultores. Sin embargo, es fundamental llevar a cabo un análisis exhaustivo de los costos asociados a estas prácticas para determinar su viabilidad y sostenibilidad a largo plazo (Maldonado y Pacheco, 2021).

El objetivo de esta investigación consiste en realizar un análisis costo-efectividad del uso del compost en la producción de quinua del Altiplano Sur de Bolivia. De este modo, se busca evaluar cómo la implementación de esta práctica agrícola impacta sobre el rendimiento, los ingresos y las ganancias de los agricultores, así como en los márgenes de beneficio y los costos operativos. Para ello, se analizó un proyecto piloto realizado por la Fundación INESAD en comunidades quinueras del Altiplano Sur. Allí se dotó a los pequeños productores de compost elaborado. Este enfoque permitió identificar no solo los beneficios económicos, sino también los aspectos sociales y ambientales que contribuyen a la resiliencia de las comunidades agrícolas frente al cambio climático (FAO, 2017).

La metodología general de la investigación se fundamenta en un análisis costo-beneficio de la BPA. Este análisis evalúa los costos y beneficios asociados con la implementación de estas prácticas en la producción de la quinua, permitiendo así determinar su viabilidad económica. Además, el estudio se complementa con un análisis de costo-efectividad que compara los costos de las BPA con los resultados obtenidos en términos de rendimiento y secuestro de carbono.

Para el análisis de las BPA, se realizaron mediciones de la huella de carbono antes y después de la implementación de la práctica en comunidades seleccionadas. Para esto se utilizó la herramienta *Cool Farm Tool* (Kumar y Singh, 2020). Dicha metodología es esencial para cuantificar los beneficios económicos del uso del compost y para evaluar su impacto ambiental, lo que proporciona una visión integral para la toma de decisiones informadas.

Además, el análisis de costo-efectividad permite comparar el uso del compost con otras prácticas agrícolas. A partir de ello, se facilita la identificación de la opción más rentable y sostenible para los agricultores. La integración de datos económicos y ambientales es crucial para demostrar la viabilidad de las BPA en el contexto del Altiplano Sur de Bolivia, donde la seguridad alimentaria y la adaptación al cambio climático son prioritarias (González y Rojas, 2019).

La estructura del documento se organiza de la siguiente manera: en la segunda sección se presenta una revisión de la literatura existente, seguida de la metodología empleada en la investigación. Posteriormente, se exponen los resultados obtenidos, se discuten las conclusiones y, finalmente, se ofrecen recomendaciones prácticas para la implementación de buenas prácticas agrícolas en la región.

## **2. Revisión de la literatura**

La agricultura sostenible ha emergido como una respuesta crucial ante los desafíos globales de la seguridad alimentaria y el cambio climático. Las buenas prácticas agrícolas (BPA) se han reconocido como estrategias efectivas para mejorar la productividad de los cultivos y mitigar el impacto ambiental de las actividades agrícolas. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2018), las BPA incluyen técnicas que promueven el uso eficiente de recursos, la conservación del suelo, la biodiversidad y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

El compostaje es una de las BPA más destacadas, ya que transforma los residuos orgánicos en una enmienda rica en nutrientes, lo que mejora la calidad del suelo y promueve un sistema agrícola más sostenible (Hargreaves *et al.*, 2013). Este proceso no solo ayuda a gestionar los residuos, sino que también contribuye a la retención de agua y a la mejora de la fertilidad en el suelo, lo cual es esencial en regiones áridas y semiáridas (Möller y Stinner, 2009). Existen estudios que, mediante la evaluación del impacto, han demostrado que la aplicación del compost puede aumentar significativamente el rendimiento de los cultivos en diversas condiciones agroecológicas (García *et al.*, 2020).

En este sentido, el análisis del costo-efectividad es una herramienta fundamental para evaluar la viabilidad económica de las BPA, incluido el uso del compost. Este tipo de análisis les permite a los investigadores y responsables de políticas comparar los costos de implementar prácticas agrícolas con los beneficios económicos y ambientales generados (Drummond *et al.*, 2015). En particular, se ha encontrado que el uso del compost puede resultar en un ahorro considerable de insumos químicos, lo que a su vez disminuye los costos de producción (Kumar *et al.*, 2021). Así, la interrelación entre el rendimiento de los cultivos y los costos asociados a la implementación de BPA se convierte en un aspecto central en la evaluación de la efectividad de las últimas.

La huella de carbono es otro aspecto crucial en la evaluación de la sostenibilidad agrícola. Se refiere a la cantidad total de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos directa o indirectamente por una actividad (Wiedmann y Minx, 2008). La medición de la huella de carbono asociada al uso

del compost puede hacerse utilizando herramientas como *Cool Farm Tool*, que les permite a los agricultores calcular las emisiones de GEI en función de sus prácticas agrícolas (*Cool Farm Alliance*, 2020). Esta medición no solo proporciona información sobre el impacto ambiental de las BPA, sino que también permite vincularlas con el rendimiento de los cultivos y con el análisis del costo-beneficio.

El análisis del costo-beneficio se complementa con el análisis del costo-efectividad al evaluar no solo los costos y beneficios directos, sino también los impactos sociales y ambientales de las prácticas agrícolas (Boardman *et al.*, 2018). Este enfoque integral es esencial para comprender el verdadero valor de las BPA y su contribución a la sostenibilidad agrícola (Pannell *et al.*, 2006). La implementación de prácticas como el compostaje puede generar beneficios no monetarios: mejoras en la salud del suelo y mitigación del cambio climático, ambas difíciles de cuantificar, pero igualmente importantes (Bennett *et al.*, 2013). De esta manera, el análisis del costo-beneficio es una herramienta clave para evaluar el rendimiento de los cultivos en el contexto de la sostenibilidad.

La robustez de los análisis del costo-efectividad y costo-beneficio es fundamental para garantizar que las políticas agrícolas se basen en evidencia sólida. Además, los estudios de sensibilidad y análisis de escenarios son herramientas clave para evaluar la incertidumbre en los modelos económicos (Hutton *et al.*, 2015). Estos enfoques permiten que los investigadores exploren diferentes supuestos y condiciones, proporcionando una visión más completa de los impactos de las BPA. Al integrar la medición de la huella de carbono con el rendimiento de los cultivos y los análisis económicos, se puede obtener un panorama más claro sobre la efectividad de las BPA en la agricultura sostenible (Brouwer *et al.*, 2018).

En el contexto del Altiplano Sur de Bolivia, la implementación de prácticas como el compostaje puede tener un impacto significativo en la resiliencia de las comunidades agrícolas frente al cambio climático. La investigación ha demostrado que las comunidades que adoptan BPA tienden a ser más resilientes ante eventos climáticos extremos (González *et al.*, 2018). Esto es particularmente relevante en regiones vulnerables, donde la seguridad alimentaria y la sostenibilidad son desafíos críticos (Mastrorillo *et al.*, 2016). En este sentido, el análisis del costo-beneficio y costo-efectividad no solo permite evaluar el rendimiento agrícola, sino que también contribuye a la planificación de políticas que fomenten la resiliencia.

El uso del compost también puede contribuir a la reducción de la pobreza rural al aumentar los ingresos de los agricultores a través de mayores rendimientos y menores costos de insumos (Diogo *et al.*, 2018). La mejora de la productividad agrícola puede generar un efecto multiplicador en las economías locales, promoviendo el desarrollo sostenible en las comunidades rurales (Pretty *et al.*, 2018). Sin embargo, es crucial que las políticas de apoyo a estas prácticas sean inclusivas y que consideren las necesidades de los agricultores más vulnerables (Kassam *et al.*, 2019).

El compostaje, además de sus beneficios agronómicos, contribuye a la mitigación del cambio climático al reducir las emisiones de GEI asociadas a la agricultura convencional. Así, la aplicación

del compost mejora la capacidad del suelo para almacenar carbono (Lal, 2004). Varios estudios han demostrado que la conversión de residuos orgánicos en compost no solo disminuye la cantidad de desechos que van a los vertederos, sino que también minimiza la producción de metano, un potente gas de efecto invernadero (Hargreaves *et al.*, 2013).

Finalmente, el análisis de frontera costo-efectiva es un enfoque que permite identificar la mejor combinación de prácticas agrícolas que maximice los beneficios económicos y ambientales. Este análisis es especialmente relevante en el contexto de la agricultura sostenible, donde los recursos son limitados y la eficiencia es crucial (Brouwer *et al.*, 2018). La frontera costo-efectiva proporciona una guía para la toma de decisiones, pues ayuda a los agricultores a seleccionar prácticas que ofrezcan el mayor retorno sobre la inversión. La integración de la huella de carbono y el rendimiento de los cultivos en este análisis puede revelar oportunidades para optimizar la producción y minimizar el impacto ambiental.

### **3. Diseño del estudio: Datos**

Esta sección describe el diseño y la metodología empleada, que se centra en la implementación de una BPA destinada a mejorar la fertilidad del suelo en comunidades productoras de quinua. Para tal efecto, se seleccionaron comunidades agrícolas bajo criterios específicos, incluyendo características del suelo, rendimiento del cultivo, prácticas agrícolas existentes y condiciones socioeconómicas. Al identificar comunidades que presentan diferentes niveles de fertilidad del suelo y productividad agrícola, podemos evaluar de manera efectiva el impacto de la BPA tanto en el rendimiento como en el secuestro de carbono.

En cada comunidad seleccionada, se realizó una evaluación inicial antes de la implementación de la BPA, lo que permitió establecer las condiciones iniciales respecto a los rendimientos de los cultivos y el almacenamiento de carbono. Tras la aplicación de la BPA, se llevó a cabo una evaluación final para medir los cambios en los parámetros. Este enfoque permite un análisis comparativo de los efectos de la BPA en el rendimiento agrícola y el secuestro de carbono, lo que proporciona un marco robusto para comprender los beneficios de adoptar prácticas mejoradas en la producción de quinua.

Finalmente, para cuantificar la efectividad de la BPA, empleamos un análisis del costo-beneficio y costo-efectividad, comparando los resultados con y sin la implementación de la práctica. La huella de carbono se midió utilizando un método de evaluación del ciclo de vida, que proporcionó información sobre el impacto ambiental de la producción de quinua en ambos escenarios. A través de esta metodología integral, el estudio busca ofrecer valiosos conocimientos sobre la viabilidad económica y ambiental de esta BPA en el cultivo de la quinua.

#### **3.1. Selección de comunidades**

La selección de parcelas para el estudio se llevó a cabo considerando la homogeneidad de la textura del suelo, un factor crucial para garantizar que los resultados obtenidos sean representativos y



aplicables en otras comunidades. Se priorizaron aquellas parcelas que mostraban características edáficas similares, como textura, pH y contenido de materia orgánica, lo que permite una comparación más precisa del impacto de la BPA sobre la fertilidad y el rendimiento. Además, se evaluaron los rendimientos históricos de cada parcela para seleccionar aquellas que reflejaran las condiciones productivas más representativas de la región, incluyendo el municipio de Santiago de Huari, donde se implementó una parcela demostrativa interna para la validación del compost.

En la tabla 1 se detallan las comunidades seleccionadas, así como las parcelas y las dosis de compost aplicadas en cada una. Por ejemplo, en la comunidad de Bella Vista se eligieron dos parcelas: Futurijapata y Capcuchi, donde se aplicaron dosis de compost de 550 g y 525 g, respectivamente. Estas dosis fueron determinadas en función del análisis de suelos previos que indicaron la cantidad óptima de enmienda orgánica necesaria para mejorar la fertilidad del suelo y, a su vez, aumentar el rendimiento de la quinua. El uso del compost contribuye con muchos beneficios al suelo, lo que mejora sus propiedades físicas, químicas y biológicas.

**Tabla 1. Selección de comunidades.**

| Nro. | Departamento | Municipio         | Comunidad         | Parcela HC    | Tratamiento | Dosis<br>compost |
|------|--------------|-------------------|-------------------|---------------|-------------|------------------|
|      |              |                   |                   |               |             | (gr)             |
| 1    | Potosí       | Uyuni             | Bella Vista       | Futurijapata  | Compost     | 550              |
|      |              |                   |                   |               | Testigo     | 0                |
| 2    | Potosí       | Uyuni             | Bella Vista       | Capcuchi      | Compost     | 525              |
|      |              |                   |                   |               | Testigo     | 0                |
| 3    | Oruro        | Salinas           | Capura            | Tranca        | Compost     | 475              |
|      |              |                   |                   |               | Testigo     | 0                |
| 4    | Oruro        | Salinas           | Sigualaca         | Andres Jiwata | Compost     | 500              |
|      |              |                   |                   |               | Testigo     | 0                |
| 5    | Oruro        | Salinas           | Florida           | Jacha Challa  | Compost     | 600              |
|      |              |                   |                   |               | Testigo     | 0                |
| 6    | Oruro        | Santiago de Huari | Santiago de Huari | Demostrativa  | Compost     | 300              |
|      |              |                   |                   |               | Compost     | 600              |
|      |              |                   |                   |               | Compost     | 900              |
|      |              |                   |                   |               | Testigo     | 0                |

Fuente: Elaboración propia con base en información primaria.

Finalmente, la parcela demostrativa en Santiago de Huari fue seleccionada para evaluar tres dosis diferentes de compost. De este modo fue posible efectuar un análisis comparativo para facilitar la evaluación de la efectividad de la BPA en términos de rendimiento y secuestro de carbono. Este enfoque metodológico, que combina la selección cuidadosa de parcelas con el uso de dosis variadas de compost, busca proporcionar datos sólidos que respalden la adopción de prácticas agrícolas sostenibles en las comunidades productoras. La implementación de este tipo de estudios es fundamental para promover la resiliencia agrícola y la sostenibilidad ambiental en la región.

### 3.2. Línea de base y línea final: Materia orgánica y nitrógeno

La BPA tuvo, como punto de partida, un estudio de suelos realizado en octubre de 2022 a 75 parcelas de la zona productora de quinua del Altiplano Sur. Abarcó a 17 comunidades dentro de los departamentos de Oruro y Potosí, de las cuales en 18 parcelas al azar se aplicó la BPA, y de ellas se seleccionaron 5 parcelas representativas para el presente estudio. De allí poseemos datos (línea base) que apuntan a un 0,51% de materia orgánica y 0,035% de nitrógeno, en promedio, lo que es considerado muy bajo.

Durante la intervención de las parcelas, con la aplicación del compost, se realizaron dos tratamientos: tratamiento compost (T1) y tratamiento testigo (T0), para realizar comparaciones posteriores a la intervención. Así, por ejemplo, se buscó analizar los efectos del compost sobre la materia orgánica, el nitrógeno y los efectos sobre el rendimiento.

Al final de la intervención se realizó un segundo análisis de laboratorio de las cinco parcelas seleccionadas. Se obtuvieron muestras de suelo de los dos tratamientos (compost y testigo), los cuales se enviaron a laboratorio (CETABOL) y se obtuvieron los siguientes resultados (Tabla 2): para materia orgánica, 0,40% para (T1), 0,35% para (T0) en promedio y para nitrógeno, 0,031% (T1) y 0,028% (T0), en promedio; todos resultados inferiores a los de la línea base. Esto se debe a: i) La pérdida en diferentes labores culturales, como el barbecho que se realiza en el suelo, que sumada a factores climáticos adversos, genera pérdidas de una gran cantidad de materia orgánica (MO) y nutrientes (tal es el caso del nitrógeno que se volatiliza). ii) La absorción de la planta, que requiere 37 g por kg de quinua. Sin embargo, se puede observar una diferencia a favor del compost que registra una pérdida del 11% de MO en relación con el testigo que tuvo una pérdida del 16% de MO en promedio. De la misma manera, el tratamiento (T1) registra una pérdida de 0,36% y (T0) de 0,70%, en promedio, de pérdida de nitrógeno.

**Tabla 2. Línea de base y línea final de materia orgánica y nitrógeno.**

| Código Parcela | MO             |             |             |             |             | Nitrógeno      |              |               |              |               |
|----------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------------|--------------|---------------|--------------|---------------|
|                | Línea base (%) | Línea final |             |             |             | Línea base (%) | Línea final  |               |              |               |
|                |                | Testigo (%) | Dif (%)     | Compost (%) | Dif (%)     |                | Testigo (%)  | Dif (%)       | Compost (%)  | Dif (%)       |
| 1154           | 0,42           | 0,33        | -9%         | 0,38        | -4%         | 0,032          | 0,026        | -0,60%        | 0,029        | -0,30%        |
| 674            | 0,70           | 0,54        | -21%        | 0,63        | -8%         | 0,055          | 0,04         | -1,50%        | 0,045        | -1,00%        |
| 1163           | 0,50           | 0,39        | -11%        | 0,42        | -8%         | 0,024          | 0,03         | 0,60%         | 0,033        | 0,90%         |
| 1165           | 0,52           | 0,14        | -38%        | 0,21        | -31%        | 0,032          | 0,015        | -1,70%        | 0,020        | -1,20%        |
| 1120           | 0,38           | 0,37        | -1%         | 0,38        | 0%          | 0,031          | 0,028        | -0,30%        | 0,029        | -0,20%        |
| <b>Prom.</b>   | <b>0,51</b>    | <b>0,35</b> | <b>-16%</b> | <b>0,40</b> | <b>-11%</b> | <b>0,035</b>   | <b>0,028</b> | <b>-0,70%</b> | <b>0,031</b> | <b>-0,36%</b> |

Fuente: Elaboración propia con base en estudios de laboratorio.

De la misma manera, se realizaron las comparaciones en la parcela demostrativa de Huari, donde se obtuvieron valores de porcentajes de materia orgánica y nitrógeno antes de la intervención, que fueron de 0,43 y 0,034 % para materia orgánica y nitrógeno.

**Tabla 3. Línea de base y línea final de materia orgánica y nitrógeno en la parcela de Huari.**

| Línea base y línea final parcela Huari |                |                 |         |                |                 |         |
|--|----------------|-----------------|---------|----------------|-----------------|---------|
| Dosis                                  | MO             |                 |         | Nitrógeno      |                 |         |
| (gr)                                   | Línea base (%) | Línea final (%) | Dif (%) | Línea base (%) | Línea final (%) | Dif (%) |
| 0                                      | 0,43           | 0,39            | -4%     | 0,034          | 0,03            | -0,4%   |
| 300                                    | 0,43           | 0,4             | -3%     | 0,034          | 0,031           | -0,3%   |
| 600                                    | 0,43           | 0,46            | 3%      | 0,034          | 0,033           | -0,1%   |
| 900                                    | 0,43           | 0,51            | 8%      | 0,034          | 0,037           | 0,3%    |

Fuente: Elaboración propia con base en estudios de laboratorio.

En el cuadro anterior se presentan los resultados de la línea final, tanto para MO como nitrógeno, donde se observa un incremento que está muy relacionado con la cantidad de compost aplicada en la parcela; es decir, a mayor cantidad de compost aplicado, mayor aporte de materia orgánica y nitrógeno. Sin embargo, estos valores son menores a los datos de línea base, debido a las pérdidas por absorción de la planta y a otros factores como la infiltración y lixiviación, puesto que la parcela tiene un suelo de textura arenosa según. Los suelos de textura gruesa tienen una menor capacidad de retención del agua y, por lo tanto, un mayor potencial de perder nitrato por lixiviación en comparación con los suelos de textura fina.

### 3.3. Costos de implementación de la Buena Práctica Agrícola (BPA)

La BPA abarcó la elaboración de 53 toneladas de abono orgánico debidamente compostado, que comprendió periodos de julio a diciembre de 2023, desde la adquisición de insumos, equipos y materiales hasta la entrega del compost a los productores, para posteriormente aplicarse en 18 parcelas demostrativas de productores de quinua orgánica.

Para realizar los costos de producción del compost se tomaron registros realizados a lo largo de la elaboración del compost con facturas, contratos, recibos e informes de la parte técnica y administrativa. Todo ello se sistematizó, con detalles mensuales acerca de los gastos de adquisiciones, los jornales, la alimentación, los refrigerios, las capacitaciones, etc., desde el mes de junio hasta diciembre. Se realizó la clasificación respectiva de los costos: costos directos (insumos y aditivos, mano de obra, equipos y materiales y algunos costos logísticos como la alimentación de operarios), y costos indirectos (administración, ambientales, logística, etc.). Se calculó la depreciación<sup>1</sup> de las herramientas y los equipos y se estimó el valor residual<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Gastos de depreciación = Precio actual – valor residual \* coeficiente de depreciación.

<sup>2</sup> Valor residual  $\frac{\text{Valor actual}}{(1+\text{coeficiente de depreciación})^{\text{vida útil}}}$

La Tabla 4 contiene los costos. Los directos ascienden a bs 29.185 y los costos indirectos ascienden a bs 59.855, lo que da un total de bs 89.040, el total de los gastos de la elaboración del compost para una cantidad de 53 toneladas destinada a productores quineros del Altiplano Sur de Bolivia.

**Tabla 4. Estructura de costos de producción del compost.**

| Categoría                      | Descripción                        | Unidad         | Cantidad | Costo unitario (Bs) | Total (Bs)    |
|--------------------------------|------------------------------------|----------------|----------|---------------------|---------------|
| <b>Directo</b>                 |                                    |                |          |                     | <b>29.185</b> |
| Insumos                        | Estiércol camélido y ovino         | Camionada      | 6        | 1.600               | 9.600         |
|                                | Paja brava                         | Camionada      | 2        | 1.200               | 2.400         |
|                                | Viruta                             | Sacos          | 40       | 15                  | 600           |
| Aditivos                       | Microorganismos activados          | Bidón de 20 l. | 1        | 2.366               | 2.366         |
|                                | Otros insumos                      | Global         | 1        | 1.460               | 1.460         |
| Mano de obra                   | Salario por día                    | Jornal         | 67       | 110                 | 7.370         |
|                                | Servicio de maquinaria             | Global         | 1        | 270                 | 270           |
| Costos de equipos y materiales | Materiales, herramientas y equipos | Global         | 1        | 2.035               | 2.035         |
| Costos de logística            | Viáticos, almuerzos                | Global         | 1        | 3.084               | 3.084         |
| <b>Indirecto</b>               |                                    |                |          |                     | <b>59.855</b> |
| Costos administrativos         | Salarios área administrativa       | Global         | 1        | 50.820              | 50.820        |
| Costos ambientales             | Análisis del compost               | Análisis       | 3        | 360                 | 1.080         |
| Costos de logística            | Viáticos                           | Global         | 1        | 6.940               | 6.940         |
| Otros                          | Otros                              | Global         | 1        | 1.015               | 1.015         |
| <b>Total, general</b>          |                                    |                |          |                     | <b>89.040</b> |

Fuente: Elaboración propia con base en una revisión del registro de gastos de la BPA.

También se realizó la clasificación de costos en fijos (costos administrativos y equipos) y variables (insumos, mano de obra, logística, materiales y otros), lo que se muestra en la Tabla 5.

**Tabla 5. Costos fijos y variables del compostaje.**

| Descripción                  | Cantidad total (ton) | Costo fijo (Bs) | Costo variable (Bs) | COSTO TOTAL (Bs) |
|------------------------------|----------------------|-----------------|---------------------|------------------|
| Producción total (toneladas) | 53,0                 | 48.775,06       | 40.265,31           | 89.040,36        |

Fuente: Elaboración propia con base en una revisión del registro de gastos de la BPA.

En el marco del proyecto piloto, se calcularon los costos de producción del compost necesarios para fertilizar una hectárea destinada a la producción de quinua, considerando un contenido promedio de materia orgánica del 0,43%. Para alcanzar un 1% de materia orgánica en el suelo de la parcela, se estimó que se requiere una dosis aproximada de 7,7 toneladas de compost por hectárea. Durante la fase inicial del piloto, estos costos están cubiertos; sin embargo, dado que la implementación a gran escala puede resultar costosa, se recomienda que los productores adopten la BPA utilizando y colectando por cuenta propia algunos insumos locales, sin afectar la potencia del compost para reducir significativamente los costos de desarrollo en el futuro. Actualmente, los costos totales se estiman en bs 1.679,98 (ver Tabla 6).

**Tabla 6. Costo de la elaboración del compost para una hectárea de quinua.**

| Insumos                    | Unidad | Cantidad | Costo unitario (Bs) | Costo total (Bs) |
|----------------------------|--------|----------|---------------------|------------------|
| Mano de obra               |        | 1        | 140                 | 140              |
| Estiércol camélido y ovino | m3     | 4        | 133,30              | 533,20           |
| Paja brava                 | m3     | 3        | 100,00              | 300,00           |
| Viruta                     | m3     | 3        | 60,00               | 180,00           |
| Alfalfa molida             | Kg     | 7        | 11,73               | 78,39            |
| Microorganismos activados  | L      | 3        | 68,32               | 198,51           |
| Melaza                     | L      | 6        | 2,75                | 15,98            |
| Otros                      |        | 1        | 233,9               | 233,9            |
| <b>Total</b>               |        |          |                     | <b>1.679,98</b>  |

Fuente: Elaboración propia con base en una revisión del registro de gastos de la BPA.

### 3.3. Evaluación del rendimiento

Durante la intervención, se realizó un monitoreo de las parcelas donde se marcaron 20 muestras por cada tratamiento y cada control. Estas se evaluaron durante todo el ciclo fenológico, y ya cosechadas se calcularon los rendimientos por mata, en cada caso en kg por hectárea.

En la tabla 7 se observan datos de los dos tratamientos: el tratamiento T0 es la línea de base (control) y tiene un rendimiento promedio de 877 kg por hectárea; el tratamiento T1 es la línea final, con un promedio de 1.106,2 kg por hectárea. La diferencia entre T1 y T0 llega al 26,66% en promedio, la cual es atribuible al efecto positivo del compost, e indica que esta BPA tiene efecto a corto plazo.

**Tabla 7. Datos de rendimientos: línea base y línea final.**

| Código Parcela | Rendimiento        |                     |               |
|----------------|--------------------|---------------------|---------------|
|                | Línea Base (Kg/Ha) | Línea final (Kg/Ha) | Dif (%)       |
| 1154           | 593                | 725                 | 22,26%        |
| 674            | 1.028              | 1.105               | 7,49%         |
| 1163           | 1.168              | 1.549               | 32,62%        |
| 1165           | 873                | 1.187               | 35,97%        |
| 1120           | 726                | 980                 | 34,99%        |
| <b>Prom.</b>   | <b>877,6</b>       | <b>1109,2</b>       | <b>26,66%</b> |

Fuente: Elaboración propia con base en registros de parcela en campo.

Además, está la parcela demostrativa de Huari, cultivada de manera paralela a los anteriores casos con el fin de validar el compost en un entorno de mayor control. Allí se aplicaron cinco dosis de compost por el método por hoyo (150 g, 300 g, 600 g, 900 g y un testigo), denominados T1, T2, T3, T4 y T0, respectivamente. El testigo corresponde a la línea base y como línea final están los tratamientos con compost.

En este ensayo se observó que, conforme aumenta la dosis del compost, incrementan los rendimientos, llegando a una diferencia porcentual del 40% con la línea de base y con 600 g de compost. Sin embargo, con el tratamiento de 900 g se observa un valor menor a 600 g, posiblemente debido a una concentración muy alta de abono que incrementó el pH, lo que limita la disponibilidad de nutrientes. Así, la relación entre rendimiento y compost es positiva, pero no lineal.

**Tabla 8. Rendimientos línea base y línea final: parcela Huari.**

| Rendimientos parcela Huari |                    |                     |                |
|----------------------------|--------------------|---------------------|----------------|
| Dosis                      | Línea base (Kg/Ha) | Línea final (Kg/Ha) | Diferencia (%) |
| 150 g                      | 328,2              | 336,72              | 3%             |
| 300 g                      | 328,2              | 371,61              | 13%            |
| 600 g                      | 328,2              | 460,61              | 40%            |
| 900 g                      | 328,2              | 445,83              | 36%            |

Fuente: Elaboración propia con base en registros de parcela en campo.

## 4. Metodología

En esta sección se presenta la metodología empleada para medir la huella de carbono, labor esencial para evaluar el impacto ambiental de la implementación de la BPA en las comunidades productoras de quinua. La huella de carbono se mide utilizando un enfoque de evaluación del ciclo de vida, lo que permite cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a las diferentes etapas de producción. Este método no solo considera las emisiones directas durante el cultivo, sino también las indirectas, como las generadas en la producción y transporte de insumos. De esta manera, se obtiene una visión integral del impacto ambiental, lo que facilita la identificación de oportunidades para reducir la huella de carbono en el proceso agrícola.

Además, se aplica un análisis de costo-beneficio y costo-efectividad para evaluar la viabilidad económica de la BPA. Este análisis permite comparar los costos asociados con la implementación de la práctica frente a los beneficios económicos esperados, tales como un aumento en los rendimientos de la quinua y una mejora en la calidad del suelo. Al combinar estas metodologías, se busca no solo entender el impacto ambiental de la BPA, sino también su rentabilidad económica. La integración de la medición de la huella de carbono con el análisis costo-beneficio proporciona una herramienta robusta para tomar decisiones informadas sobre la adopción de prácticas agrícolas sostenibles, lo que garantiza que las intervenciones sean tanto ambientalmente responsables como económicamente viables.

### 4.1 Medición de la huella de carbono

La metodología *Cool Farm Tool* (CFT) es una herramienta innovadora diseñada para ayudar a los agricultores a medir y gestionar su huella de carbono. Esta plataforma les permite a los usuarios calcular las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas con sus prácticas agrícolas, y de este modo se obtiene un análisis detallado acerca de cómo sus decisiones impactan en la

sostenibilidad (*Cool Farm Alliance*, 2020). La fórmula básica utilizada en la CFT para calcular la huella de carbono es:

$$\text{Huella de Carbono} = \sum (E_i \times F_i) \quad (1)$$

donde  $E_i$  son las emisiones de cada actividad agrícola y  $F_i$  son los factores de emisión correspondientes.

La CFT no solo mide la huella de carbono, sino que también ayuda a los agricultores a explorar oportunidades para reducir sus emisiones y mejorar la sostenibilidad de sus operaciones. Al integrar la medición de la huella de carbono con análisis de costo-beneficio y costo-efectividad, los agricultores pueden tomar decisiones más informadas sobre la implementación de BPA, considerando tanto los aspectos económicos como los ambientales (Wiedmann y Minx, 2008). Esto contribuye a la promoción de prácticas agrícolas que no solo son rentables, sino que también son sostenibles a largo plazo.

## 4.2 Análisis costo-beneficio

La metodología del análisis costo-beneficio (ACB) es una herramienta fundamental en la evaluación de proyectos y políticas. Se centra en comparar los costos totales de una intervención con los beneficios que esta genera, expresados en términos monetarios. La fórmula básica para calcular esta relación es el valor presente neto (VPN):

$$VPN = \sum \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t} \quad (2)$$

donde  $B_t$  son los beneficios en el tiempo,  $C_t$  son los costos en el tiempo,  $r$  es la tasa de descuento y  $t$  es el periodo de tiempo. Se busca determinar si el VPN es positivo, lo que justificaría la implementación de la práctica agrícola evaluada (Boardman *et al.*, 2018).

Para llevar a cabo un análisis costo-beneficio, es crucial identificar y cuantificar todos los costos asociados con la implementación de la BPA, así como los beneficios tangibles e intangibles que se derivan de su uso. Los costos pueden incluir inversiones iniciales, costos de operación y mantenimiento, mientras que los beneficios pueden abarcar aumentos en la productividad, mejoras en la calidad del suelo y beneficios ambientales, como la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (Kumar *et al.*, 2021). La fórmula de la tasa interna de retorno (TIR) se puede utilizar para evaluar la rentabilidad de la inversión:

$$0 = \sum \frac{B_t - C_t}{(1+TIR)^t} \quad (3)$$

Finalmente, el ACB puede ser complementado con un análisis de sensibilidad para evaluar cómo los cambios en los supuestos afectan en los resultados (por ejemplo, un cambio en la tasa de interés o en los plazos). Esto es especialmente relevante en el contexto agrícola, donde las condiciones pueden variar significativamente debido a factores climáticos y de mercado (Pannell *et al.*, 2006).

La robustez del análisis se incrementa al considerar diferentes escenarios, lo que les ayuda a los tomadores de decisiones a entender mejor los riesgos asociados con la implementación de las BPA.

### 4.3. Análisis costo-efectividad

El análisis costo efectividad (ACE) es una ratio que permite evaluar el costo por unidad de resultado (Brouwer *et al.*, 2018). Puede complementarse con un análisis de sensibilidad para explorar cómo las variaciones en los costos o en los resultados impactan en la relación costo-efectividad. Esto es especialmente importante en la agricultura, donde las condiciones pueden ser inciertas y los resultados pueden depender de factores externos como el clima y el mercado (Hutton *et al.*, 2015).

$$ACE = \frac{C}{E} \quad (4)$$

$C$  son los costos totales de la intervención y  $E$  es el resultado obtenido (por ejemplo, toneladas de CO<sub>2</sub> reducidas o incremento en el rendimiento de los cultivos). Adicionalmente, se puede construir la frontera costo-efectividad, que es un método para identificar la combinación óptima entre el costo y la efectividad de una práctica agrícola en relación con una restricción presupuestaria. Este análisis considera múltiples alternativas y sus respectivas relaciones de costo-efectividad, lo que les permite a los responsables de políticas y a los agricultores seleccionar la opción más eficiente (Brouwer *et al.*, 2018). La fórmula para establecer la frontera implica graficar las relaciones costo-efectividad de diferentes prácticas:

$$Frontera = \{(C_i, E_i) \mid i = 1, 2, \dots, n\} \quad (5)$$

donde  $C_i$  son los costos y  $E_i$  son los resultados de cada práctica  $i$ .

## 5. Resultados

En esta sección se lleva a cabo un análisis de la BPA realizada sobre el uso del compost en el Altiplano Sur de Bolivia, específicamente para el cultivo de quinua. El análisis se realiza tanto antes como después de la implementación de las BPA, con el objetivo de evaluar su impacto en la huella de carbono asociada a la producción de la quinua. A través de esta metodología, se busca entender cómo la adopción de prácticas sostenibles puede contribuir a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en una región tan vulnerable a los efectos del cambio climático.

Además, se evalúa el rendimiento de la producción de quinua bajo el enfoque de la BPA, comparando los resultados obtenidos antes y después de su implementación. Este análisis no solo permite identificar mejoras en la productividad agrícola, sino que también ofrece información valiosa sobre la sostenibilidad de las prácticas. La medición del rendimiento se complementa con un estudio detallado de los costos involucrados, proporcionando una visión clara de los beneficios económicos que pueden derivarse de la adopción de técnicas de compostaje en el cultivo.



Finalmente, se lleva a cabo un análisis de costo-beneficio y costo-efectividad de la implementación de la BPA en el cultivo de la quinua. Este permite determinar la viabilidad económica de las prácticas sostenibles en comparación con métodos tradicionales, lo que facilita la toma de decisiones informadas para los agricultores de la región. Al integrar aspectos ambientales y económicos, este estudio busca promover un enfoque holístico hacia la agricultura sostenible, contribuyendo al desarrollo rural y a la conservación del medio ambiente en el Altiplano Sur.

### 5.1 Estimación de la huella de carbono ex post a la aplicación de la BPA

Durante la gestión 2023, como parte del proyecto *Creación de empleos verdes para mujeres indígenas en el sector de la quinua boliviana para una respuesta y una recuperación frente al COVID-19, baja en emisiones de carbono*, ejecutado por INESAD, se aplicó una BPA en seis parcelas productoras de quinua<sup>3</sup> en el departamento de Oruro, municipios Salinas de Garci Mendoza y Huari, incluyendo a las comunidades de Capura, Sighualaca, Florida y Huari. Del departamento de Potosí, se incluyó el municipio de Uyuni en la comunidad de Bella Vista.

Las características de dichas parcelas se muestran a continuación:

**Tabla 9. Datos generales de las parcelas analizadas**

| Parcela       | Comunidad   | Área parcela (ha) | Textura del suelo |
|---------------|-------------|-------------------|-------------------|
| <b>Oruro</b>  |             |                   |                   |
| P1            | Capura      | 1,0               | Franco arenoso    |
| P2            | Sighualaca  | 1,6               | Franco arenoso    |
| P3            | Florida     | 1,4               | Areno francoso    |
| P6            | Huari       | 0,1               | Franco arenoso    |
| <b>Potosí</b> |             |                   |                   |
| P4            | Bella Vista | 5,0               | Franco arenoso    |
| P5            | Bella Vista | 1,5               | Areno francoso    |

Fuente: Elaboración propia con base en reportes de INESAD, 2023.

La aplicación de la BPA se realizó de forma piloto en las parcelas, considerando una parte como testigo (sin aplicación de abonos o fertilizantes). Esta aplicación consistió en la elaboración de un compost orgánico que inició en junio de 2023 y terminó en diciembre del mismo año. El compost se hizo a partir de estiércol de ovinos y camélidos, con paja y viruta de madera en una relación estiércol-viruta-paja de 1:1:1. El compost fue posteriormente incorporado en las parcelas piloto con dosis entre 300 y 900 gramos/mata.

Los resultados obtenidos se resumen en la siguiente tabla:

<sup>3</sup> Anteriormente se realizó la estimación de la huella de carbono en 19 parcelas productoras de quinua, incluyendo adicionalmente a otras comunidades de los departamentos de Oruro y Potosí. Sin embargo, debido a cambios en los acuerdos con algunos productores, se modificaron las parcelas que recibieron el tratamiento con la BPA.

**Tabla 10. Resultados generales obtenidos tras la aplicación de la BPA.**

| Parcela | Dosis aplicada (gramos/mata) |                | Materia orgánica del suelo (%) |                | pH      |                | Rendimiento <sup>4</sup> (kg/ha) |                |
|---------|------------------------------|----------------|--------------------------------|----------------|---------|----------------|----------------------------------|----------------|
|         | Testigo                      | Buena Práctica | Testigo                        | Buena Práctica | Testigo | Buena Práctica | Testigo                          | Buena Práctica |
| P1      | 0                            | 475            | 0,39                           | 0,42           | 8,68    | 8,14           | 1.168                            | 1.549          |
| P2      | 0                            | 500            | 0,14                           | 0,21           | 7,96    | 8,08           | 873                              | 1.325          |
| P3      | 0                            | 600            | 0,37                           | 0,38           | 8,52    | 8,63           | 726                              | 1.227          |
| P4      | 0                            | 525            | 0,33                           | 0,38           | 9,03    | 8,89           | 593                              | 725            |
| P5      | 0                            | 525            | 0,54                           | 0,63           | 8,42    | 8,49           | 1.028                            | 1.105          |
| P6      | 0                            | 300            | 0,39                           | 0,40           | 7,12    | 7,4            | 259                              | 297            |
|         |                              | 600            |                                | 0,46           |         | 7,32           |                                  | 404            |
|         |                              | 900            |                                | 0,51           |         | 7,47           |                                  | 415            |

Fuente: Elaboración propia con base en información primaria.

Considerando la información y los resultados obtenidos en las seis parcelas piloto, se estimó la huella de carbono generada empleando la metodología y las herramientas de cálculo de *Cool Farm Tool*.

Las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) por hectárea para las parcelas testigo se encuentran en un rango entre 71 y 127 kg de CO<sub>2</sub>e, con un promedio de 111 kg de CO<sub>2</sub>e/ha. Para la BPA, las emisiones varían entre 187 y 317 kg de CO<sub>2</sub>e, con un promedio de 248 kg de CO<sub>2</sub>e/ha. En términos de la huella de carbono por producto (kg de quinua cosechada), para las parcelas testigo las emisiones varían entre 0,08 y 0,49 kg CO<sub>2</sub>e/kg de quinua, con un promedio de 0,19 kg CO<sub>2</sub>e/kg de quinua. Para la BPA, las emisiones varían entre 0,15 y 0,63 kg de CO<sub>2</sub>e, con un promedio de 0,30 kg CO<sub>2</sub>e/kg de quinua. El rango de variabilidad depende de las actividades y dosis reportadas del uso de abono.

**Tabla 11. Resultados: huella de carbono por parcela.**

| Parcela         | Huella de carbono                      |            |   |             |
|-----------------|--|------------|---|-------------|
|                 | Por hectárea (kg CO <sub>2</sub> e/ha) |            | Por producto (kg CO <sub>2</sub> e/kg quinua cosechada) |             |
|                 | Testigo                                | BP         | Testigo   | BP          |
| P1              | 110                                    | 230        | 0,09  | 0,15        |
| P2              | 71                                     | 254        | 0,08  | 0,19        |
| P3              | 127                                    | 316        | 0,18  | 0,26        |
| P4              | 119                                    | 262        | 0,20  | 0,36        |
| P5              | 111                                    | 248        | 0,11  | 0,22        |
| P6              | 127                                    | 187        | 0,49  | 0,63        |
| <b>Promedio</b> | <b>111</b>                             | <b>249</b> | <b>0,19</b>   | <b>0,30</b> |

Fuente: Elaboración propia con base en resultados CFT.

En el caso de la parcela demostrativa de Huari, se aplicaron diferentes dosis de compost.

<sup>4</sup> Los rendimientos reportados de las parcelas testigo tras la aplicación de la BPA varían significativamente con respecto a los rendimientos obtenidos previamente para la estimación de la huella de carbono de parcelas de quinua con prácticas tradicionales, en las que se aplicaba estiércol de oveja como principal abono orgánico. El rendimiento promedio de 19 parcelas evaluadas fue de 402 kg/ha vs 775 kg/ha de las parcelas en las que finalmente se aplicó la BPA.

**Tabla 12. Resultados: huella de carbono, diferentes dosis, parcela demostrativa Huari.**

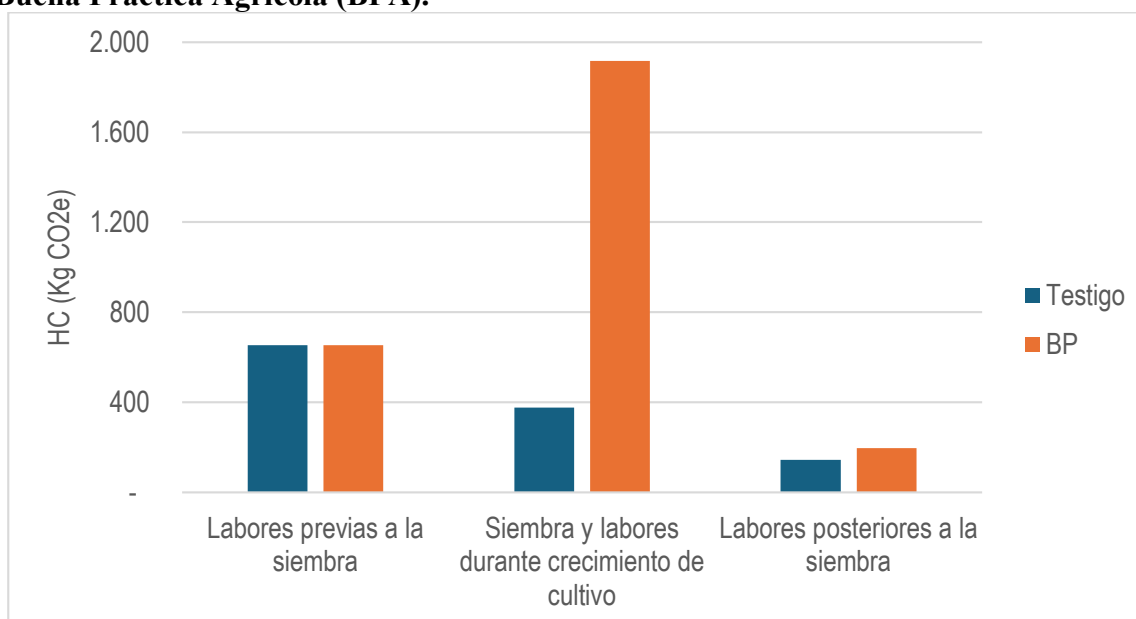
| Parcela | Huella de carbono                         |     |  |      |
|---------|---|-----|--|------|
|         | Por hectárea<br>(kg CO <sub>2</sub> e/ha) |     | Por producto<br>(kg CO <sub>2</sub> e/kg quinua cosechada) |      |
|         | Testigo                                   | BP  | Testigo  | BP   |
| P6      | 127                                       |     | 0,49   |      |
| P61     |   | 187 |  | 0,63 |
| P62     |   | 368 |  | 0,91 |
| P63     |   | 661 |  | 1,59 |

Fuente: Elaboración propia con base en resultados CFT.

Incluyendo a las emisiones generadas por la aplicación de diferentes dosis, el promedio de huella de carbono por hectárea es de 315 kg de CO<sub>2</sub>e/ha, y de 0,54 kg CO<sub>2</sub>e/kg de quinua.

La principal etapa del ciclo de vida que genera emisiones en las parcelas testigo es la de labores previas a la siembra (56%), seguida de la siembra y los labores durante el crecimiento del cultivo (32%); finalmente están los labores posteriores a la siembra (12%). Con la aplicación de la BPA, la etapa con mayor contribución es la de siembra y labores durante el crecimiento del cultivo (69%), luego están las labores previas a la siembra (24%) y, finalmente, las labores posteriores a la siembra (7%).

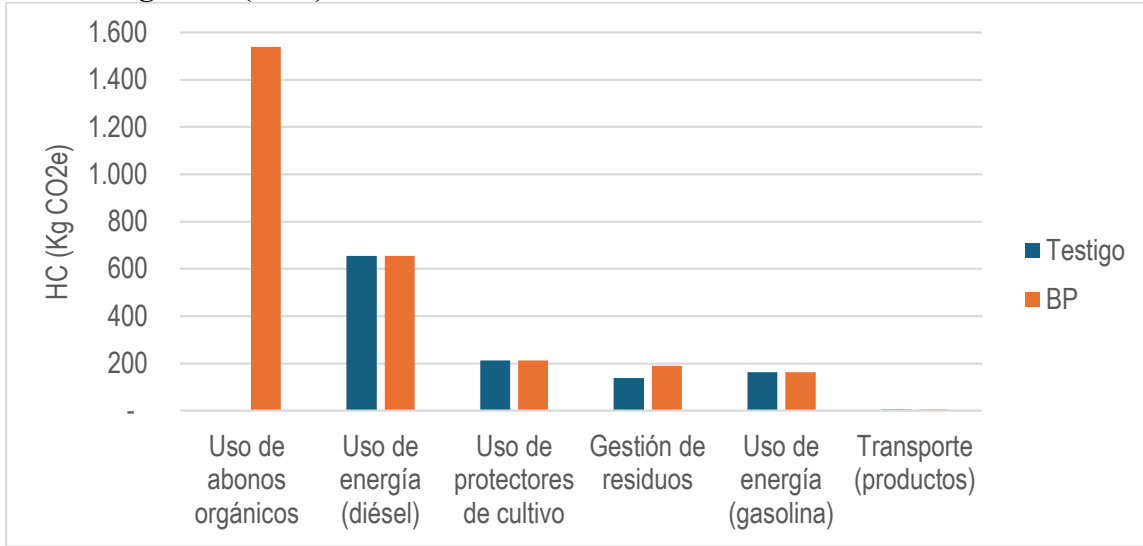
**Figura 1. Huella de carbono por etapa del ciclo de vida para parcelas testigo y con Buena Práctica Agrícola (BPA).**



Fuente: Elaboración propia con base en estimaciones con CFT.

Al realizar un análisis por fuente de emisión para la línea base, se observa que el uso del diésel es la principal fuente de emisión (56%), seguida del uso de protectores de cultivo (18%). Para la BPA, la principal fuente de emisión es el uso del compost (55%), seguido del uso del diésel en tractores para la preparación del suelo (24%).

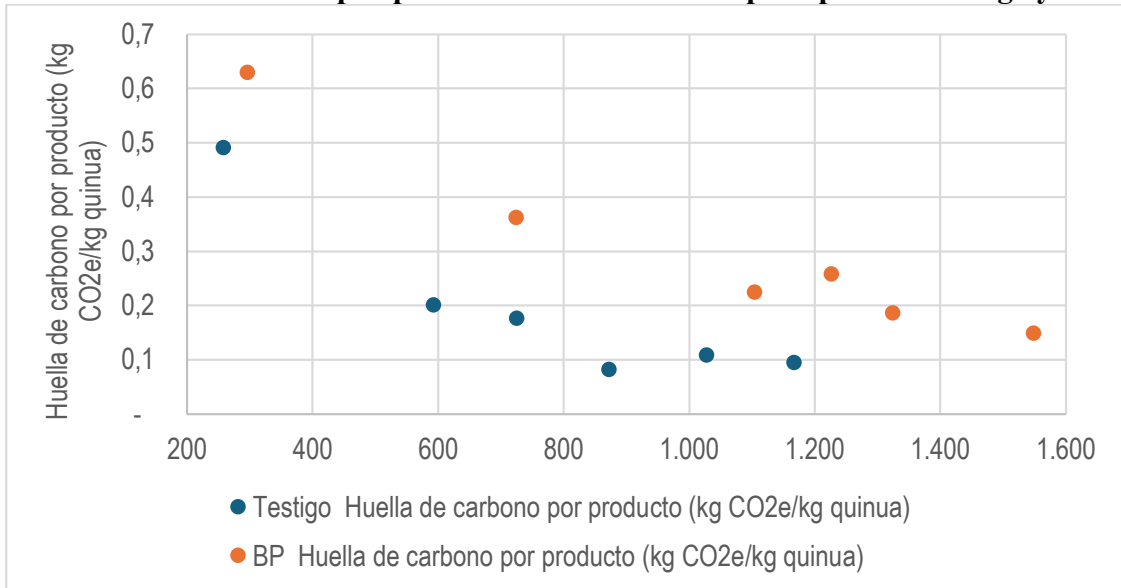
**Figura 2. Huella de carbono por fuente de emisión para parcelas testigo y con Buena Práctica Agrícola (BPA).**



Fuente: Elaboración propia con base en estimaciones con CFT.

En la siguiente figura, tanto para las parcelas testigo como para la BPA, se observa que las parcelas con menor rendimiento generan una mayor huella de carbono (HC). Existen variaciones que dependen del tipo de prácticas, de las actividades realizadas y de los insumos y las cantidades utilizadas.

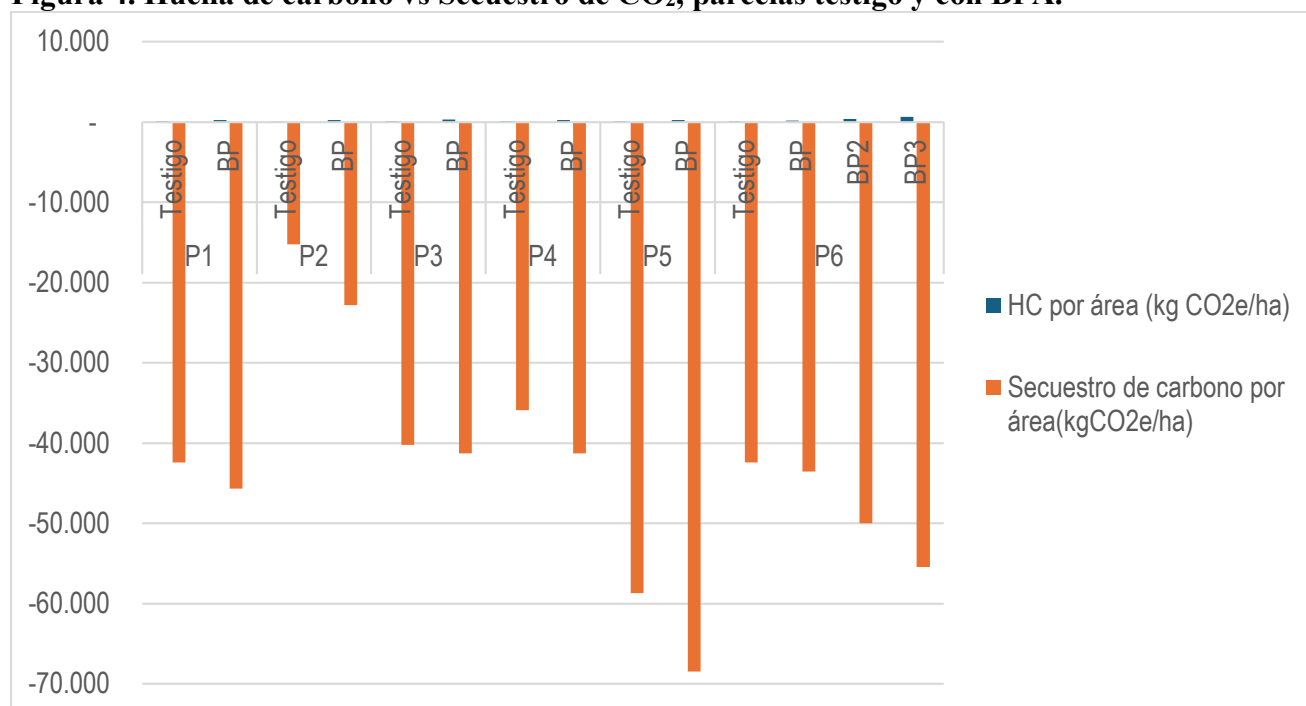
**Figura 3. Huella de carbono por producto vs Rendimiento para parcelas testigo y con BPA.**



Fuente: Elaboración propia con base en estimaciones con CFT.

Finalmente, la plataforma *Cool Farm Tool* entrega valores sobre el secuestro de carbono y la cantidad de CO<sub>2</sub> que se almacena en los suelos por hectárea. Tanto en las parcelas testigo como en la BPA, la cantidad de CO<sub>2</sub> secuestrada es mucho mayor que la HC generada por las actividades de la parcela.

**Figura 4. Huella de carbono vs Secuestro de CO<sub>2</sub>, parcelas testigo y con BPA.**



Fuente: Elaboración propia con base en estimaciones con CFT.

Los suelos evaluados presentaron niveles de materia orgánica considerados deficitarios, con un promedio de 0,36% en las parcelas testigo y 0,42% en aquellas donde se aplicó la BPA. A pesar de estos bajos valores, la implementación de la BPA resultó en un notable aumento del rendimiento, que pasó de 775 kg/ha a 881 kg/ha, lo que representa un incremento del 14%. En algunos casos, se alcanza hasta un incremento del 22%. Esto sugiere que la aplicación del compost y de otras prácticas asociadas a la BPA no solo mejora la productividad, sino que también contribuye a la salud del suelo.

En cuanto a la huella de carbono, se observó que la huella promedio por área con la BPA fue de 248 kgCO<sub>2</sub>e, lo que implica un aumento importante en comparación con las parcelas testigo. Al analizar la huella de carbono por producto, se registró un promedio de 0,3 kg CO<sub>2</sub>e/kg de quinua, lo que representa un incremento del 58% con respecto a las parcelas sin BPA. Este aumento se debe principalmente al uso del compost, que es la principal fuente de emisión de gases de efecto invernadero, especialmente del óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) liberado durante la descomposición de la materia orgánica. Adicionalmente, el uso de combustibles fósiles, como el diésel para la preparación del suelo y la gasolina para el transporte, también contribuye a las emisiones.

Un hallazgo importante resulta en que, tanto en las parcelas testigo como en las que aplicaron la BPA, se evidenció que ante un menor rendimiento se genera una mayor huella de carbono. Esto subraya la necesidad de optimizar las prácticas agrícolas para maximizar la producción y minimizar el impacto ambiental. Sin embargo, la aplicación de **la BPA también demostró mejorar la capacidad de secuestro de carbono en el suelo**. Aumentó el promedio de 65.817 kg

CO<sub>2</sub>/ha en las parcelas testigo a 75.653 kg CO<sub>2</sub>/ha con la BPA, lo que representa un incremento del 15% por hectárea.

## 5.2. Análisis costo-beneficio

En esta sección se realiza el ACB para la BPA propuesta. Se parte por evaluar los rendimientos obtenidos bajo diferentes escenarios de precios de venta, lo que permitirá identificar cómo las BPA pueden influir en el rendimiento y en la rentabilidad de los cultivos.

**Tabla 13. Ingreso incremental de la producción de quinua (Bs./ha).**

|                            |        | Ingreso máximo (bs/Tn) | Ingreso medio (bs/Tn) | Ingreso mínimo (bs/Tn) |
|----------------------------|--------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| <b>Rendimiento</b>         | Tn/ha  | 9.000,00               | 7.250,00              | 5.500,00               |
| <b>Rendimiento BPA</b>     | 1,0835 | <b>9.751,50</b>        | <b>7.855,38</b>       | <b>5.959,25</b>        |
| <b>Rendimiento testigo</b> | 0,888  | <b>7.992,00</b>        | <b>6.438,00</b>       | <b>4.884,00</b>        |
| <b>Dif. Ingreso</b>        | 0,1955 | 1.759,50               | 1.417,38              | 1.075,25               |

Fuente: Elaboración propia con base en información primaria.

La tabla compara los rendimientos de la producción de quinua bajo tres niveles de precio: máximo, medio y mínimo. En el caso del precio máximo (9.000 bs/Tn), el rendimiento bajo de la BPA es de 1.0835 kg/ha, con un ingreso de bs 9.751,50. Por otro lado, el rendimiento del testigo es de 0.888 kg/ha, con un ingreso de bs 7.992. La diferencia de rendimiento de 0,1955 kg/ha refleja el impacto positivo de las BPA en la producción, lo que resulta en un mayor beneficio económico para los productores.

Al analizar el precio medio (7.250 Bs/Tn), el rendimiento de la BPA se sitúa en 1.0835 kg/ha, generando bs 7.855,38, mientras que el rendimiento del testigo se reduce a 0,888 kg/ha, con un ingreso de bs 6.438. La diferencia de rendimiento aquí es de bs 1.417,38, lo que de nuevo resalta la manera en que la implementación de la BPA puede mejorar significativamente los resultados económicos. Finalmente, en el precio mínimo (5.500 Bs/Tn), el rendimiento de la BPA sigue siendo superior, alcanzando los bs 5.959,25, comparados con los bs 4.884 del testigo, con una diferencia de bs 1.075,25. Estos datos subrayan la importancia de adoptar prácticas agrícolas eficientes para maximizar los beneficios en un entorno de precios variables.

**Tabla 14. Costo de la BPA (Bs./ha).**

|                        | LB                   | -10%                 | -20%                 | -35%                 |
|------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| <b>COSTO TOTAL BPA</b> | <b>Costo (bs/Tn)</b> | <b>Costo (bs/Tn)</b> | <b>Costo (bs/Tn)</b> | <b>Costo (bs/Tn)</b> |
| Directo                | 550,66               | 495,59               | 440,53               | 352,42               |
| Indirecto              | 1.129,32             | 1.016,39             | 903,46               | 722,77               |
| <b>Total general</b>   | 1.679,98             | 1.511,98             | 1.343,98             | 1.075,19             |

Fuente: Elaboración propia con base en información primaria.

La tabla detalla los costos totales de producción con BPA para diferentes escenarios de reducción de costos. Se desglosan los costos en dos categorías: costos directos e indirectos, y se muestran los

valores correspondientes a tres niveles de reducción de costos: -10%, -20% y -35%, además del costo base (LB). Este desglose es fundamental para entender cómo las variaciones en los costos impactan en la viabilidad económica de la producción de quinua.

El costo de línea de base es de 550,66 bs/Tn y el costo indirecto es de 1.129,32 bs/Tn, lo que lleva a un costo total general de 1.679,98 bs/Tn. A medida que se aplican reducciones de costos, se observa una disminución progresiva en todas las categorías. Por ejemplo, en el escenario de -10%, el costo directo se reduce a 495,59 bs/Tn y el costo indirecto a 1.016,39 bs/Tn, lo que resulta en un costo total de 1.511,98 bs/Tn. Esto indica que la reducción de costos es efectiva y que mejora la rentabilidad.

Al llegar al escenario de -35%, el costo directo alcanza los 352,42 bs/Tn, y el costo indirecto se sitúa en 722,77 bs/Tn, lo que resulta en un costo total de 1.075,19 bs/Tn. Este último nivel de reducción es significativo, ya que implica que, para que los beneficios igualen los costos en un contexto de precios bajos, es necesario reducir los costos en un 36%. La tabla resalta la importancia de gestionar adecuadamente los costos para maximizar la rentabilidad en la producción agrícola.

**Tabla 15. Análisis beneficio/costo de la BPA.**

|            | Costo BPA (bs/Tn) | Escenario 1 | Escenario 2 | Escenario 3 |
|------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>B/C</b> | LF-LB             | 1,05        | 0,84        | 0,64        |
|            | -10%              | 1,16        | 0,94        | 0,71        |
|            | -20%              | 1,31        | 1,05        | 0,80        |
|            | -35%              | 1,64        | 1,32        | 1,00        |

Fuente: Elaboración propia con base en estimaciones.

### **Escenario 1**

En el primer escenario, donde se utilizan precios máximos de venta de quinua, la ratio B/C se establece en 1,05 bs/Tn. Esto indica que, en este contexto, los beneficios superan ligeramente a los costos, lo que sugiere que la producción es rentable. Sin embargo, a medida que se aplican reducciones de costos, la ratio B/C aumenta, alcanzando 1,16, 1,31 y 1,64 en los escenarios de -10%, -20% y -35% en los costos, respectivamente. Esto demuestra que la disminución de costos mejora significativamente la rentabilidad, lo que resulta en un retorno más atractivo por cada peso boliviano invertido.

La diferencia entre los ingresos con y sin BPA es clave para entender este escenario. Con la implementación de BPA, los productores pueden generar mayores beneficios, lo que se traduce en una ratio B/C favorable. Sin embargo, es importante destacar que, aunque la ratio es positiva, la rentabilidad podría ser optimizada aún más si se logran mayores reducciones en los costos de producción.

## Escenario 2

En el segundo escenario, donde se consideran precios medios de venta, la ratio B/C comienza en 0,84 bs/Tn, lo que significa que los costos superan a los beneficios en este punto. No obstante, al aplicar reducciones de costos, la ratio mejora a 0,94, 1,05 y 1,32 en los escenarios de -10%, -20% y -35%. Esto indica que, con una adecuada gestión de costos, es posible alcanzar un equilibrio y eventualmente superar los costos con los beneficios obtenidos.

La diferencia en este escenario radica en que, aunque inicialmente los costos son mayores que los beneficios, la implementación de BPA les permite a los productores mejorar su rentabilidad. Al reducir los costos en un 35%, se logra una ratio B/C de 1, lo que sugiere que los beneficios son iguales a los costos, y que la producción es viable bajo estas condiciones.

## Escenario 3

El tercer escenario, que utiliza precios bajos de venta, presenta un costo BPA de 0,64 bs/Tn, lo que indica que los beneficios superan considerablemente a los costos desde el inicio. A medida que se aplican reducciones de costos, la ratio B/C se mantiene positiva, alcanzando 0,71, 0,80 y 1,00 en los diferentes niveles de reducción de costos. Esto implica que, incluso con precios bajos, los productores pueden obtener beneficios significativos si logran optimizar sus costos.

Este escenario es especialmente relevante, ya que muestra que, a pesar de los precios más bajos, la implementación de BPA puede garantizar la viabilidad económica de la producción. La necesidad de reducir los costos en un 35% para alcanzar una ratio B/C de 1 destaca la importancia de la gestión eficiente de recursos en la producción agrícola.

### 5.3. Análisis costo-efectividad

La Tabla 15 presenta un análisis comparativo entre los costos totales y los rendimientos de la producción de quinua con y sin la implementación de BPA. En términos de costos, el uso de BPA cuesta bs 10.679,98, mientras que, sin BPA, el costo es de bs 9.000,00. A pesar de que el costo es más alto al aplicar BPA, es fundamental evaluar cómo este gasto se traduce en rendimientos y sostenibilidad ambiental.

**Tabla 16. Análisis costo-efectividad.**

|                                   | Con BPA   | Sin BPA  | DIF  | %   |
|-----------------------------------|-----------|----------|------|-----|
| Costo producción (bs/ha)          | 10.679,98 | 9.000,00 |      |     |
| Rendimiento Tn/ha                 | 1,08      | 0,89     | 0,20 | 22% |
| Secuestro kg CO <sub>2</sub> e/ha | 75,65     | 65,81    | 9,84 | 15% |
| C/E (Rend)                        | 0,99      | 1,01     | 0,03 | 3%  |

Fuente: Elaboración propia con base en estimaciones.

La ratio C/E (Rend) muestra el costo por cada unidad de rendimiento (Tn/ha). Con BPA, esta ratio es de 0,99, mientras que sin BPA es de 1,01. Un valor más bajo en la ratio C/E (Rend) indica una mayor efectividad, lo que sugiere que las BPA son más eficientes en términos de producción. Esto se traduce en un incremento del rendimiento de 1,08 Tn/ha con BPA frente a 0,89 Tn/ha sin BPA.



La diferencia de 0,20 Tn/ha representa un aumento del 22% en la productividad, lo que justifica la inversión adicional en BPA.

En resumen, la ratio C/E analizada indica que la BPA es una buena inversión que no solo mejora el rendimiento de los cultivos, sino que también contribuye a una producción más sostenible al mejorar el secuestro de carbono en suelo. A pesar de un costo inicial más alto, los beneficios a largo plazo en términos de producción y sostenibilidad ambiental justifican la adopción de estas prácticas. Este análisis subraya la importancia de considerar tanto la rentabilidad económica como la responsabilidad ambiental en la toma de decisiones agrícolas.

#### 5.4. Perfil financiero: Recuperación de la fertilidad del suelo

En la Tabla 16 se observa un perfil de recuperación de la fertilidad (materia orgánica) con base en la aplicación del compost. Los resultados financieros se presentan mediante tres escenarios diferentes y consideran una tasa de interés del 10%. En el análisis, se ha supuesto que los ingresos crecen a una tasa del 5% anual, mientras que los costos lo hacen al 2%. Durante los primeros 3 años, los costos son más elevados debido a una mayor dosis de compost – 4 toneladas por hectárea – empleada para recuperar la materia orgánica del suelo. A partir del sexto año, las dosis de compost se reducen a niveles de mantenimiento.

**Tabla 17. Perfil financiero incremental: Recuperación de la fertilidad del suelo.**

| Periodo | Beneficio incremental (bs/ha) |             |             | Costo incremental (bs/ha) |             |             | DIF (bs/ha) |             |             |
|---------|-------------------------------|-------------|-------------|---------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|         | Escenario 1                   | Escenario 2 | Escenario 3 | Escenario 1               | Escenario 2 | Escenario 3 | Escenario 1 | Escenario 2 | Escenario 3 |
| 1       | 1.759,50                      | 1.417,38    | 1.075,25    | 5.375,92                  | 5.375,92    | 5.375,92    | - 3.616,42  | - 3.958,54  | - 4.300,67  |
| 2       | 1.847,48                      | 1.488,25    | 1.129,01    | 5.483,44                  | 5.483,44    | 5.483,44    | - 3.635,96  | - 3.995,19  | - 4.354,43  |
| 3       | 1.939,85                      | 1.562,66    | 1.185,46    | 5.593,11                  | 5.593,11    | 5.593,11    | - 3.653,26  | - 4.030,45  | - 4.407,64  |
| 4       | 2.036,84                      | 1.640,79    | 1.244,74    | 2.850,00                  | 2.850,00    | 2.850,00    | - 813,16    | - 1.209,21  | - 1.605,26  |
| 5       | 2.138,68                      | 1.722,83    | 1.306,97    | 2.907,00                  | 2.907,00    | 2.907,00    | - 768,32    | - 1.184,17  | - 1.600,03  |
| 6       | 2.245,62                      | 1.808,98    | 1.372,32    | 1.477,28                  | 1.477,28    | 1.477,28    | 768,34      | 331,70      | - 104,96    |
| 7       | 2.357,90                      | 1.899,42    | 1.440,94    | 1.506,83                  | 1.506,83    | 1.506,83    | 851,07      | 392,60      | - 65,89     |
| 8       | 2.475,79                      | 1.994,40    | 1.512,98    | 1.536,96                  | 1.536,96    | 1.536,96    | 938,83      | 457,43      | - 23,98     |
| 9       | 2.599,58                      | 2.094,12    | 1.588,63    | 1.567,70                  | 1.567,70    | 1.567,70    | 1.031,88    | 526,41      | 20,93       |
| 10      | 2.729,56                      | 2.198,82    | 1.668,07    | 1.599,06                  | 1.599,06    | 1.599,06    | 1.130,51    | 599,77      | 69,01       |
| 11      | 2.866,04                      | 2.308,76    | 1.751,47    | 1.631,04                  | 1.631,04    | 1.631,04    | 1.235,00    | 677,73      | 120,43      |
| 12      | 3.009,34                      | 2.424,20    | 1.839,04    | 1.663,66                  | 1.663,66    | 1.663,66    | 1.345,68    | 760,54      | 175,39      |
| 13      | 3.159,81                      | 2.545,41    | 1.930,99    | 1.696,93                  | 1.696,93    | 1.696,93    | 1.462,88    | 848,48      | 234,06      |
| 14      | 3.317,80                      | 2.672,68    | 2.027,54    | 1.730,87                  | 1.730,87    | 1.730,87    | 1.586,93    | 941,81      | 296,68      |
| 15      | 3.483,69                      | 2.806,32    | 2.128,92    | 1.765,49                  | 1.765,49    | 1.765,49    | 1.718,20    | 1.040,83    | 363,44      |
| 16      | 3.657,87                      | 2.946,63    | 2.235,37    | 1.800,80                  | 1.800,80    | 1.800,80    | 1.857,08    | 1.145,84    | 434,57      |
| 17      | 3.840,77                      | 3.093,96    | 2.347,14    | 1.836,81                  | 1.836,81    | 1.836,81    | 2.003,96    | 1.257,15    | 510,32      |
| 18      | 4.032,81                      | 3.248,66    | 2.464,49    | 1.873,55                  | 1.873,55    | 1.873,55    | 2.159,26    | 1.375,11    | 590,94      |
| 19      | 4.234,45                      | 3.411,09    | 2.587,72    | 1.911,02                  | 1.911,02    | 1.911,02    | 2.323,43    | 1.500,07    | 676,70      |
| 20      | 4.446,17                      | 3.581,65    | 2.717,10    | 1.949,24                  | 1.949,24    | 1.949,24    | 2.496,93    | 1.632,41    | 767,86      |

Fuente: Elaboración propia con base en estimaciones.

En el escenario 1 se observa el mejor desempeño financiero, con un Beneficio Incremental (BI) que alcanza los bs 4.446,17 por hectárea en el año 20. Los Costos Incrementales (CI) se mantienen en bs 1.949,24 por hectárea durante este mismo periodo. La Diferencia (DIF) entre el BI y el CI es de bs 2.496,93 por hectárea, lo que indica una alta rentabilidad.

En contraste, el escenario 2 muestra un BI de bs 3.581,65 por hectárea y un CI de bs 1.949,24 por hectárea en el año 20, resultando en una DIF de bs 1.632,41 por hectárea. Esto representa una rentabilidad menor en comparación con el escenario 1. El escenario 3 presenta los peores resultados, con un BI de bs 2.717,10 por hectárea y un CI de bs 1.949,24 por hectárea en el año 20. La DIF es de bs 767,86 por hectárea, lo que indica que este escenario no es tan rentable como los anteriores. Es importante destacar que el escenario 1 es el más favorable, ya que genera un mayor beneficio incremental y una mayor diferencia entre el beneficio y el costo, lo que se traduce en una mayor rentabilidad para la empresa.

**Tabla 18. Análisis de rentabilidad financiera.**

|  | <b>Escenario 1</b> | <b>Escenario 2</b> | <b>Escenario 3</b> |
|--|--------------------|--------------------|--------------------|
| VAN (10%)  | 10.288,55          | 6.435,65           | 2.582,74           |
| TIR  | 21,8%              | 17,3%              | 12,1%              |
| Análisis de Sensibilidad (5% variación en ingresos y costos) |                    |                    |                    |
| VAN Optimista  | 11.302,40          | 7.057,22           | 3.064,88           |
| VAN Pesimista  | 9.274,70           | 5.814,08           | 2.100,60           |
| Periodo de recuperación                                      | 6 - 7 años         | 9 años             | 13 años            |

Fuente: Elaboración propia con base en estimaciones.

Considerando los resultados de la tabla, el escenario 1 presenta el mejor desempeño financiero. Tiene un VAN de bs 10.288,55 y una TIR del 21,8%, lo que indica una alta rentabilidad del proyecto. Además, el periodo de recuperación es de 7 años, lo cual es relativamente corto.

El escenario 2 muestra resultados intermedios, con un VAN de bs 6.435,65 y una TIR del 17,3%. El periodo de recuperación es de 9 años, lo que implica una menor rentabilidad en comparación con el escenario 1.

Por otro lado, el escenario 3 presenta los peores resultados financieros. Tiene un VAN de bs 2.582,74 y una TIR del 12,1%, lo que indica una menor rentabilidad. Además, el periodo de recuperación es de 13 años, lo cual es más prolongado.

El análisis de sensibilidad muestra que, ante una variación del 5% en ingresos y costos, el escenario 1 sigue siendo el más rentable, con un VAN optimista de bs 11.302,40 y un VAN pesimista de bs 9.274,70. En contraste, el escenario 3 es el más vulnerable a estos cambios, con un VAN optimista de bs 3.064,88 y un VAN pesimista de bs 2.100,60.

En resumen, el escenario 1 se presenta como la opción más favorable desde el punto de vista financiero, con un mayor VAN, una TIR más alta y un periodo de recuperación más corto. Esto lo convierte en la alternativa más atractiva para la empresa. Los escenarios 2 y 3 muestran resultados menos favorables; el escenario 3 es el menos rentable de todos.

Es importante tener en cuenta que estos resultados deben analizarse en el contexto más amplio del proyecto de regeneración de suelos, considerando factores como la mejora de la fertilidad, la sostenibilidad a largo plazo y los beneficios ambientales que se puedan generar.

## **6. Conclusiones**

El análisis de las ratios B/C en los diferentes escenarios resalta la importancia de la gestión de costos en la producción de quinua. Los escenarios muestran que, aunque los precios máximos permiten una rentabilidad positiva, es crucial optimizar los costos para maximizar los beneficios. La implementación de BPA no solo mejora los rendimientos, sino que también les permite a los productores alcanzar un equilibrio financiero más favorable.

La recuperación del suelo es un proceso crítico para asegurar la sostenibilidad y rentabilidad de la producción de quinua. A pesar de que la BPA requiere una inversión significativa, los análisis de las ratios B/C demuestran que, en los escenarios evaluados, los beneficios no superan a los costos. Esto sugiere que, aunque la recuperación del suelo es esencial, es necesario optimizar las prácticas y buscar métodos más efectivos que generen un retorno económico positivo.

Asimismo, es fundamental que los productores consideren la recuperación del suelo como una inversión a largo plazo. La salud del suelo no solo impacta en la productividad inmediata, sino que también influye en la sostenibilidad del ecosistema agrícola. La adopción de prácticas más eficientes es crucial para maximizar los beneficios de estas inversiones y asegurar la viabilidad futura de la producción de quinua.

La implementación de BPA en la producción de la quinua demuestra que es una estrategia eficaz para aumentar el rendimiento de los cultivos y reducir la huella de carbono. Las ratios C/E analizadas revelan que, aunque el costo de las BPA es superior, su impacto positivo en la productividad y sostenibilidad ambiental justifica la inversión. Un aumento del 22% en el rendimiento y una mejora en el secuestro de carbono del 15% en la huella de carbono son indicadores claros de que las BPA no solo benefician a los productores, sino que también contribuyen al bienestar del medio ambiente.

Además, el análisis sugiere que las BPA ofrecen una ventaja competitiva en un mercado agrícola cada vez más enfocado en la sostenibilidad. La capacidad de producir más con menos impacto ambiental puede ser un factor decisivo para los consumidores y los mercados, lo que significa que adoptar estas prácticas no solo es beneficioso desde el punto de vista económico, sino que también puede mejorar la imagen y la aceptación del producto en el mercado.

## 7. Recomendaciones

Se recomienda a los productores que implementen estrategias para reducir costos, especialmente en escenarios donde los precios son medios o bajos. Esto puede incluir la adopción de tecnologías más eficientes, la optimización de recursos y la mejora de las prácticas agrícolas. Al hacerlo, los productores pueden aumentar sus márgenes de beneficio y asegurar la sostenibilidad de sus operaciones.

Se recomienda a los productores evaluar y ajustar las cantidades de compost aplicadas, comenzando con dosis más bajas y aumentando progresivamente según la respuesta del suelo. Además, es esencial realizar un seguimiento constante de los resultados para ajustar las prácticas según lo que sea necesario. La implementación de un programa de monitoreo permitirá evaluar la efectividad de las BPA y hacer ajustes en tiempo real para maximizar los beneficios.

Se sugiere fomentar la colaboración entre los productores para compartir experiencias y resultados en la recuperación del suelo. La creación de redes de apoyo y la difusión de información sobre prácticas exitosas pueden contribuir a una adopción más amplia de las BPA, beneficiando a toda la comunidad agrícola involucrada en la producción de quinua. Además, se podrían explorar financiamientos o subsidios que ayuden a mitigar los costos iniciales, facilitando así la implementación de prácticas sostenibles que mejoren la rentabilidad a largo plazo.

Se recomienda a los productores de quinua considerar la incorporación de Buenas Prácticas Agrícolas como una inversión a largo plazo. Es fundamental realizar un análisis de costos y beneficios que contemple no solo el rendimiento inmediato, sino también el impacto ambiental y la sostenibilidad a largo plazo. La educación y capacitación en BPA deben ser una prioridad para que los agricultores comprendan por completo los beneficios y la implementación de las prácticas en sus sistemas de producción.

Asimismo, se sugiere fomentar la colaboración entre productores para compartir experiencias y resultados en la adopción de BPA. La creación de redes de apoyo y el intercambio de información sobre prácticas exitosas pueden facilitar la transición hacia métodos más sostenibles. Además, se podrían explorar incentivos gubernamentales o subsidios que ayuden a mitigar los costos iniciales de implementación, asegurando que más agricultores tengan acceso a estas prácticas beneficiosas.

## Bibliografía

- Báez, S. y Lema, J. (2018). Sustainable Agricultural Practices in the Andean Region: Impacts on Food Security and Climate Resilience. *Journal of Agricultural Science*, 10(6), 123-135. DOI: <https://doi.org/10.5539/jas.v10n6p123>
- Bennett, E. M., Peterson, G. D. y Gordon, L. J. (2013). Understanding Relationships Among Multiple Ecosystem Services. *Ecological Applications*, 23(6), 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1890/12-1252.1>
- Boardman, A. E., Greenberg, D. H., Vining, A. R. y Weimer, D. L. (2018). *Cost-Benefit Analysis: Concepts and Practice*. Cambridge University Press.

- Brouwer, R., van Ek, R. y van der Meer, T. (2018). Cost-Effectiveness Analysis for Environmental Policy: A Review. *Environmental Science & Policy*, 89, 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.07.012>
- Cool Farm Alliance (2020). Cool Farm Tool. <https://coolfarmtool.org/>
- Diogo, J. M., Silva, A. L., & Costa, A. C. (2018). Impact of organic amendments on crop yield and soil properties. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 252, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.10.004>
- Drummond, M. F., Sculpher, M. J., Claxton, K., Stoddart, G. L. y Torrance, G. W. (2015). *Methods for the Economic Evaluation of Health Care Programmes*. Oxford University Press.
- García, A. M., Martínez, J. R., & López, P. (2020). Effects of compost application on crop yield and soil quality. *Soil & Tillage Research*, 199, 104569. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104569>
- González, A. y Rojas, M. (2019). Effect of Compost on Quinoa Yield and Soil Quality in the Bolivian Altiplano. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 43(4), 400-415. DOI: <https://doi.org/10.1080/21683565.2018.1566839>
- González, C., Cárdenas, E., & López, M. (2018). Resilience of smallholder farmers to climate change in the Andes. *Global Environmental Change*, 52, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.06.004>
- Hargreaves, J. C. et al. (2013). The Role of Compost in Sustainable Agriculture. *Agricultural Systems*, 118, 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2013.03.001>
- Hutton, G. et al. (2015). The Cost-Effectiveness of Interventions to Prevent and Control Diseases. *Health Policy and Planning*, 30(3), 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1093/heapol/czv063>
- Kassam, A. et al. (2019). The Role of Sustainable Agricultural Practices in Food Security. *Food Security*, 11(1), 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12571-018-0905-0>
- Kumar, S. et al. (2021). Economic Analysis of Organic Farming: A review. *Agricultural Economics Research Review*, 34(1), 1-12. DOI: <https://doi.org/10.5958/0974-0279.2021.00001.0>
- Kumar, S. y Singh, R. (2020). Carbon Footprint Assessment of Agricultural Practices in the Andean Region Using Cool Farm Tool. *Environmental Science & Policy*, 112, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.06.004>
- Lal, R. (2004). Carbon Sequestration in Dryland Ecosystems. *Environmental Management*, 33(4), 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00267-003-1939-6>
- Maldonado, M. y Pacheco, J. (2021). Economic Analysis of Quinoa Production in the Context of Climate Change. *Journal of Environmental Management*, 278, 111516. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111516>
- Mastorillo, M. et al. (2016). The Role of Sustainable Agricultural Practices in Improving Food Security in the Andes. *Food Security*, 8(3), 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12571-016-0567-9>

- Möller, K. y Stinner, W. (2009). Composting and its Role in Sustainable Agriculture. *Waste Management*, 29(2), 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.04.013>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura -FAO- (2018). *The State of Food and Agriculture 2018*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Pannell, D. J. et al. (2006). The Role of Economic Analysis in the Assessment of Agricultural Policies. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 50(3), 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1467-8489.2006.00325.x>
- Pretty, J. et al. (2018). Global Assessment of Agricultural Systems. *Nature Sustainability*, 1(1), 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0024-2>
- Wiedmann, T. y Minx, J. (2008). A Definition of 'Carbon Footprint'. *Ecological Economics Research Trends*, 1, 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.04.001>
- Zhao, X. et al. (2019). The Role of Compost in Sustainable Agriculture. *Agricultural Systems*, 176, 102-112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102112>