

INSTITUTO DE ESTUDIOS AVANZADOS EN DESARROLLO



Evaluación de perfiles de huella hídrica: Análisis del ciclo de vida de la quinua en Bolivia

Por:

Javier Aliaga Lordemann

Alejandro Capriles

Nayra Antezana

Serie Documentos de Trabajo sobre Desarrollo

No. 14/2024

Septiembre, 2024

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.

Evaluación de perfiles de huella hídrica: Análisis del ciclo de vida de la quinua en Bolivia *

Javier Aliaga Lordemann **

Alejandro Capriles ***

Nayra Antezana ****

Resumen

Este estudio analiza los perfiles de huellas hídricas en la producción de la quinua en Bolivia, un cultivo emblemático que enfrenta desafíos significativos en términos de rendimiento y sostenibilidad. La Huella Hídrica Total (HH) de la quinua estimada para la región del Altiplano Sur de Bolivia es de aproximadamente 1.728 litros por kilogramo, con rendimientos promedio de 1,15 toneladas por hectárea. Este resultado muestra un nivel preocupante de ineficiencia en la relación de la HH y el rendimiento del cultivo, especialmente en comparación con países como Perú y Ecuador.

Los resultados muestran una alta HH y bajos rendimientos; por lo tanto, la producción de quinua en Bolivia en la zona de estudio no está optimizando el uso del agua. Esta situación puede ser explicada en gran medida por el bajo nivel de materia orgánica en el suelo de la zona (verificado mediante estudios de suelo). Así, un suelo con bajo contenido de materia orgánica carece de nutrientes esenciales, lo que perjudica el crecimiento de la quinua y afecta negativamente su desarrollo radicular debido a la compactación del suelo. Además, la falta de materia orgánica disminuye la capacidad de retención del agua, lo que es crítico en períodos de sequía como resultado del aumento en la frecuencia e intensidad de eventos climáticos en la zona. Asimismo, la falta de materia orgánica hace que las plantas sean más vulnerables a plagas y enfermedades, pero también reduce la biodiversidad microbiana, lo que afecta a procesos clave como la descomposición y los ciclos de nutrientes, que comprometen la fertilidad del suelo.

* Esta investigación forma parte del proyecto *Creating Indigenous Women's Green Jobs Under Low-Carbon COVID-19 Responses and Recovery in the Bolivian Quinoa Sector*, que es auspiciado por el Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (IDRC) de Canadá.

** 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)

*** Es economista ambiental, especialista en medición de la huella hídrica y en gestión de recursos naturales. (ale32532gmail.com)

**** Es licenciada en Biología con experiencia en recursos hídricos.

En resumen, este tipo de suelos son menos eficientes en el uso del agua, lo que puede incrementar la huella hídrica del cultivo al requerirse riegos más frecuentes. A partir de estas conclusiones, se proponen varias recomendaciones. Primero, es crucial optimizar el rendimiento y reducir la HH mediante la implementación de sistemas de riego eficientes. Esto incluye capacitar a los agricultores en estas tecnologías. También se sugiere el uso de coberturas vegetales que mejoren la retención de humedad. Además, se deben adoptar tecnologías avanzadas de riego -como sensores de humedad del suelo- y promover sistemas de captación de agua de lluvia. La formación en manejo integrado de recursos hídricos es esencial, así como el desarrollo de estrategias de adaptación climática.

Palabras clave: HH, ciclo de vida, productividad del agua, análisis econométrico, sostenibilidad agrícola.

Códigos JEL: Q57, Q56, Q15, Q25, C21.

Abstract

This study analyzes the water footprint profiles of quinoa production in Bolivia, an emblematic crop that faces significant challenges in terms of yield and sustainability. The Total Water Footprint (WH) of quinoa estimated for the Southern Altiplano region of Bolivia is approximately 1,728 liters per kilogram, with average yields of 1.15 tons per hectare. This result shows a worrying level of inefficiency in the relationship of HH and crop yield, especially in comparison with countries such as Peru and Ecuador.

The results show high HH and low yields; therefore, quinoa production in Bolivia in the study area is not optimizing water use. This situation can be explained to a large extent by the low level of organic matter in the soil of the area (verified by soil studies). Thus, a soil with low organic matter content lacks essential nutrients, which impairs quinoa growth and negatively affects its root development due to soil compaction. In addition, the lack of organic matter decreases water retention capacity, which is critical in periods of drought as a result of the increased frequency and intensity of climatic events in the area. Likewise, the lack of organic matter makes plants more vulnerable to pests and diseases, but also reduces microbial biodiversity, which affects key processes such as decomposition and nutrient cycling, compromising soil fertility.

In summary, this type of soil is less efficient in water use, which can increase the water footprint of the crop by requiring more frequent irrigation. Based on these conclusions, several recommendations are proposed. First, it is crucial to optimize yield and reduce WH by implementing efficient irrigation systems. This includes training farmers in these technologies. The use of vegetative covers that improve moisture retention is also suggested. In addition, advanced irrigation technologies -such as soil moisture sensors- should be adopted and rainwater harvesting systems should be promoted. Training in integrated water resources management is essential, as well as the development of climate adaptation strategies.

Key words: WH, life cycle, water productivity, econometric analysis, agricultural sustainability.

JEL codes: Q57, Q56, Q15, Q25, C21.

Introducción

La quinua ha ganado reconocimiento global en las últimas décadas debido a sus propiedades nutricionales y su adaptabilidad a diversas condiciones climáticas. En Bolivia, este cultivo es de vital importancia cultural y económica, especialmente para las comunidades indígenas que lo han cultivado durante siglos (Jacobsen, 2012). Sin embargo, el incremento en la demanda de la quinua en los mercados internacionales ha llevado a un aumento en la producción, lo que plantea desafíos significativos en términos de sostenibilidad y uso eficiente de recursos; particularmente, en el uso del agua y el suelo.

La Huella Hídrica Total (HH), definida como el volumen de agua dulce utilizada para producir bienes y servicios, se ha convertido en un indicador esencial para evaluar el impacto ambiental de los sistemas agrícolas (Hoekstra, 2017). En el contexto de la producción de la quinua, es crucial entender cómo las prácticas agrícolas afectan la HH y, por ende, la sostenibilidad del cultivo. Este análisis se vuelve aún más relevante en regiones como Bolivia, donde el acceso al agua es limitado y donde la variabilidad climática puede afectar la disponibilidad de este recurso.

La HH también está influenciada por las decisiones de consumo, ya que los consumidores pueden optar por alimentos que requieran de menos agua para su producción, promoviendo así dietas sostenibles y reduciendo el desperdicio de alimentos, lo cual contribuiría a disminuir la HH a nivel global (Mason *et al.*, 2020). Además, la colaboración internacional es crucial para la gestión sostenible del agua, ya que los recursos hídricos son compartidos entre países y regiones. Esto requiere de acuerdos de cooperación para la investigación y el desarrollo de tecnologías que mejoren la eficiencia del uso del agua en la agricultura (Schwarz *et al.*, 2021). Es importante destacar que la HH es un indicador dinámico que puede cambiar con el tiempo, debido a factores como las prácticas agrícolas, el cambio climático y las políticas de gestión del agua. Por ello, se deben realizar evaluaciones periódicas para adaptar las estrategias y asegurar un uso hídrico sostenible (Rosa *et al.*, 2021).

Para estimar la HH, se suele aplicar el enfoque del ciclo de vida (*LCA*, por sus siglas en inglés), una metodología robusta que permite evaluar los impactos ambientales de un producto desde su producción hasta su disposición final. En este estudio, se utilizará la herramienta *Cool Farm Tool (CFT)*¹, que facilita la evaluación de la HH a lo largo del ciclo de vida de la quinua, pues identifica las etapas del proceso productivo que más contribuyen a la HH.

El objetivo de este documento de trabajo es contribuir al entendimiento de la HH en la producción de la quinua en la zona del Altiplano Sur de Bolivia y, proporcionar

¹ *CFT* es una herramienta en línea diseñada para ayudar a medir y gestionar la huella de carbono y la HH de los cultivos agrícolas. Para medir la HH, la herramienta se basa en un modelo que evalúa el consumo del agua en cada etapa del proceso agrícola, desde la siembra hasta la cosecha. Esto incluye la cantidad de agua utilizada para el riego, así como la lluvia que contribuye al crecimiento de los cultivos. Al proporcionar información precisa sobre su impacto ambiental, *CFT* permite tomar decisiones informadas para mejorar la sostenibilidad de las prácticas agrícolas.

herramientas prácticas para la gestión sostenible del agua en este sector. A través de un análisis exhaustivo y un enfoque basado en el ciclo de vida, los hallazgos de este estudio pueden permitir la construcción de perfiles de HH a nivel agregado y por clústeres. Tal información, a su vez, puede resultar muy útil para dar recomendaciones específicas a los productores y a los responsables de la formulación de políticas en el ámbito agrícola.

La revisión de la literatura en la sección 2 abordará estudios previos que han analizado la HH en diferentes contextos agrícolas y metodologías, así como investigaciones específicas sobre la quinua. La metodología se describirá en la sección 3, donde se detallarán los criterios de selección de las comunidades productoras de quinua, así como el proceso de recolección de datos y la aplicación de la *CFT*. Los resultados de este análisis se presentarán en la sección 4, donde se mostrarán los diferentes perfiles de HH obtenidos. Se discutirán las sensibilidades que muestran los perfiles de HH en función de las prácticas agrícolas, las condiciones climáticas y otros factores contextuales. En la sección 5, se ofrecerán conclusiones basadas en los resultados obtenidos, donde se destacará la importancia de la HH en la gestión del agua para la producción de la quinua. Se reflexionará sobre cómo los hallazgos pueden contribuir a la formulación de políticas y estrategias que promuevan un uso más sostenible del agua en la agricultura boliviana. Finalmente, se presentarán recomendaciones prácticas para los agricultores y responsables de políticas en la sección 6.

I. Revisión de la literatura

La medición de la HH se ha convertido en una herramienta clave para evaluar el uso del agua en la agricultura, un sector que consume aproximadamente el 70% del agua dulce en el mundo (Mekonnen y Hoekstra, 2016). Este concepto, que abarca tanto al agua consumida como la contaminada durante la producción de bienes, es esencial para entender el impacto ambiental de las prácticas agrícolas y la sostenibilidad de los recursos hídricos (Hoekstra, 2017).

Una de las principales preocupaciones sobre la HH radica en la creciente demanda de alimentos, debida al aumento de la población global. Se estima que la población alcanzará los 9.7 mil millones para 2050, lo que requerirá un incremento significativo en la producción agrícola (FAO, 2017). Este aumento en la demanda de alimentos plantea desafíos críticos para la gestión del agua, especialmente en regiones donde los recursos hídricos son limitados o más vulnerables al cambio climático.

Uno de los estudios relevantes sobre la HH en el cultivo de la quinua se encuentra en el trabajo realizado en 2012 por la Autoridad Nacional del Agua (ANA), en Perú. Este estudio evaluó la cantidad de agua utilizada en el cultivo de la quinua, que se lleva a cabo principalmente en condiciones de secano en la sierra peruana. La investigación mostró que la huella hídrica promedio nacional del cultivo durante el período 2001-2012 fue de 3.841,47 m³ por tonelada, con un rendimiento promedio de 1,19 toneladas por hectárea. De los componentes de la huella hídrica, el verde, que representa el agua de lluvia, abarcó el 80%; la huella gris, que mide el agua necesaria para diluir contaminantes, el 14%; y la huella azul, que corresponde al agua de fuentes superficiales y subterráneas, el

6%. Estos resultados destacan la importancia del agua de lluvia almacenada en el suelo para satisfacer las necesidades hídricas del cultivo de quinua, especialmente en altitudes entre 2,500 y 4,100 metros sobre el nivel del mar. Este estudio subraya la vulnerabilidad del cultivo de la quinua a las variaciones en la precipitación, lo que podría afectar la producción en el contexto del cambio climático (Schneir, 2015).

La eficiencia en el uso del agua es un factor crucial para reducir la HH en la agricultura. Las tecnologías de riego han demostrado ser más efectivas que los métodos tradicionales, como el riego por inundación (Keller y Bliesner, 1990). Estas tecnologías no solo mejoran la eficiencia del riego, sino que también minimizan la evaporación y el escurrimiento, lo que contribuye a una menor HH. Además, para optimizar el cultivo de quinua en condiciones de secano, se pueden implementar prácticas específicas que maximicen el uso del agua disponible. Esto incluye plantar al inicio de la temporada de lluvias, ajustar la densidad de siembra para minimizar la competencia entre las plantas, y mantener un número adecuado de plantas para asegurar que se coseche un porcentaje óptimo con respecto a la densidad inicial, como un 60%, 70%, o 80%. También es importante seleccionar variedades más tolerantes a la sequía, mantener el control de malezas para reducir la competencia por agua y nutrientes, y aplicar técnicas como el uso de surcos o zanjas para dirigir el agua hacia las raíces, lo que podría favorecer un cultivo más sostenible y eficiente.

Además de las tecnologías de riego, la implementación de prácticas de conservación del agua es fundamental. La agricultura de conservación, que incluye técnicas como la siembra directa y la rotación de cultivos, puede ayudar a mejorar la retención de agua en el suelo y reducir la necesidad de riego (González *et al.*, 2019). Estas prácticas no solo benefician la HH, sino que también promueven la salud del suelo y la biodiversidad.

El cambio climático representa otro aspecto crítico que influye en la HH de la agricultura. Las variaciones en los patrones de precipitación y el aumento de las temperaturas pueden afectar la disponibilidad del agua y, por lo tanto, la producción agrícola (Bates *et al.*, 2008). Adaptar las prácticas agrícolas a estas nuevas realidades climáticas es esencial para garantizar la sostenibilidad en el uso del agua en el Altiplano Sur.

La educación y la sensibilización de los agricultores son componentes clave para la gestión eficiente del agua. Algunos programas de capacitación que enseñan técnicas de riego eficiente y manejo sostenible de recursos hídricos han mostrado resultados positivos en diversas regiones (Mastrorillo *et al.*, 2016). Así, la transferencia de conocimientos es fundamental para fomentar prácticas agrícolas que reduzcan la HH.

Las políticas públicas también juegan un papel crucial en la gestión de la HH en la agricultura. La creación de marcos regulatorios que promuevan el uso sostenible del agua puede incentivar a los agricultores a adoptar prácticas más responsables (Pérez *et al.*, 2019). Estas políticas deben ir acompañadas de incentivos económicos que faciliten la transición hacia métodos más sostenibles.

La HH no solo tiene implicaciones ambientales, sino también sociales y económicas. La competencia por los recursos hídricos puede generar conflictos entre diferentes sectores, como la agricultura, la industria y el consumo urbano (García *et al.*, 2020). Por lo tanto, es fundamental abordar la HH desde un enfoque integrado que considere las necesidades de todos los usuarios del agua.

Asimismo, la investigación continua es esencial para mejorar nuestra comprensión de la HH en la agricultura. La recopilación de datos precisos y la realización de estudios de caso ayudarán a desarrollar mejores prácticas y políticas que aborden los desafíos asociados con el uso del agua en la producción agrícola (Rosa *et al.*, 2021). La colaboración entre investigadores, gobiernos y agricultores será clave para lograr un uso más eficiente del agua.

El uso de herramientas tecnológicas, como modelos de simulación y sistemas de información geográfica (SIG), puede facilitar la evaluación de la HH en diferentes contextos agrícolas. En este estudio, se utilizó específicamente la metodología *CFT* para analizar la disponibilidad de recursos hídricos y optimizar las prácticas de manejo del agua (López *et al.*, 2022). La integración de estas tecnologías en la toma de decisiones es fundamental para mejorar la gestión del agua.

Mejía *et al.* (2020) destacan que existen dos métodos principales para calcular la HH: el Análisis del Ciclo de Vida (*LCA*, por sus siglas en inglés) y la Evaluación de la Huella Hídrica (*WFA*, por sus siglas en inglés). Mientras que el *LCA* evalúa los impactos ambientales asociados a la producción de lo largo en todo el ciclo de vida del producto, la *WFA* se centra en cuantificar el volumen de agua utilizado de manera directa e indirecta en las cadenas de suministro. La principal diferencia entre ambos métodos radica en que la *WFA* mide específicamente el uso del agua, mientras que el *LCA* considera los impactos más amplios del uso. Estos métodos son complementarios y se rigen por las normas ISO 14046 e ISO 14044, que proporcionan directrices para asegurar la coherencia y comparabilidad en los análisis. Esta distinción es fundamental para entender cómo se mide la sostenibilidad del agua en diferentes contextos agrícolas y cómo se pueden aplicar estas metodologías para mejorar la gestión del recurso hídrico.

La Huella Hídrica (HH) varía significativamente entre los diferentes cultivos agrícolas. Para la quinua, la HH total oscila entre 1.200 y 2.500 m³ por kg, lo que refleja un uso moderado de agua en comparación con otros cultivos (Hoekstra *et al.*, 2012). La alfalfa, sin embargo, tiene una HH considerablemente mayor, entre 3.000 y 4.000 m³ por kg, (Allen *et al.*, 1998). La papa presenta una HH de entre 1.500 y 2.000 m³ por kg, lo que sugiere un consumo de agua similar al de la quinua, pero ligeramente más alto (Castañeda y Cañizares, 2018). El maíz, por su parte, tiene una HH de 1.200 a 1.800 m³ por kg, lo que indica un uso eficiente del agua en comparación con otros cultivos como la alfalfa (Gutiérrez y Rojas, 2017). Finalmente, la cebada muestra una HH de 1.500 a 2.200 m³ por kg, lo que la destaca como un cultivo con un consumo de agua intermedio (Tovar y García, 2019). (Véase la Tabla 1.)

Tabla 1. HH normalizada entre países productores de quinua

Cultivo	Huella Hídrica Total (m ³ por kg)
Quinua	1.200 – 2.500
Alfalfa	3.000 – 4.000
Papa	1.500 – 2.000
Maíz	1.200 – 1.800
Cebada	1.500 – 2.200

Fuente: Elaboración propia con base en consultas bibliográficas.

II. Metodología

En esta sección se describe la metodología utilizada para medir la HH con un enfoque en el ciclo de vida, desde la recolección de los datos hasta el análisis de los perfiles de consumo de agua para los productores quinueros del Altiplano Sur de Bolivia. La sección de los métodos explica, de manera detallada, los procedimientos específicos aplicados para analizar esta información (*i.e.* medición de la HH y métodos econométricos).

III.1. Recolección de datos

La recolección de datos se llevó a cabo mediante una encuesta realizada en el primer trimestre de 2024 en tres comunidades productoras de quinua del altiplano boliviano (*i.e.* Capura, Vintuta y Bella Vista). Dado que allí las condiciones climáticas, como las temperaturas extremas y la escasez de agua, influyen en las prácticas agrícolas y en el uso de recursos hídricos, el enfoque de la encuesta se orientó hacia la identificación de patrones de consumo y del requerimiento de agua en la producción quinuera. El parámetro poblacional está vinculado al consumo hídrico de los productores, el cual incluye las siguientes dimensiones específicas:

- **Cantidad de agua utilizada para el riego.** Se mide en litros por hectárea y por ciclo de cultivo.
- **Fuentes de agua disponibles.** Incluyen, principalmente, al agua de lluvia y otras fuentes, en caso de existir (*i.e.*, fuentes superficiales y subterráneas, así como sistemas de riego).
- **Impacto percibido en la producción agrícola.** Se evalúa a través de preguntas sobre cómo el uso del agua afecta el rendimiento de la quinua y la sostenibilidad de sus prácticas agrícolas.

En este contexto, se diseñó una muestra aleatoria dentro de las comunidades que mostraron características similares en términos de producción de quinua y condiciones socioeconómicas. Al elegir aleatoriamente a los productores, se minimiza el riesgo de sesgos en la selección, lo que permite que cada productor tenga una probabilidad igual de ser elegido. De este modo también se garantiza la representatividad, lo que

incrementa la probabilidad de que la muestra refleje la diversidad de la población. Esto, a su vez, hace que los hallazgos sean más generalizables a otras comunidades productoras de quinua en el altiplano.

Se optó por realizar encuestas a un total de 137 productores, elegidos en función de su disponibilidad para participar en el estudio. Aunque esto introduce un componente de conveniencia, la aleatoriedad en la selección dentro de comunidades homogéneas aseguró que la muestra fuera representativa. En otras palabras, se usó un muestreo sistemático, donde se seleccionaron unidades de una población de manera regular y predefinida. En general, este enfoque se utiliza para obtener una muestra representativa sin necesidad de realizar un muestreo aleatorio completo.

La elección de un diseño sistemático dentro de comunidades homogéneas fue la opción más adecuada por varias razones. En primer lugar, la homogeneidad en las características aseguró que las variaciones observadas en el consumo hídrico se debieran a factores relevantes, y no a diferencias estructurales entre las comunidades. Además, este enfoque proporcionó flexibilidad y agilidad en la recolección de datos, permitiendo una recopilación más eficiente, facilitando el acceso a los productores y optimizando el tiempo de recolección. Finalmente, la representatividad de la muestra garantiza la validez externa de los resultados, pues permite que estos sean aplicables a otras comunidades productoras de quinua en el Altiplano Sur y contribuye así a una comprensión más amplia de los patrones de consumo hídrico.

Dentro de cada comunidad se establecieron criterios de inclusión para seleccionar a los productores de quinua. Se priorizó a aquellos que tenían al menos tres años de experiencia en la producción y que utilizaban agua de riego como fuente principal. No obstante, también es importante mencionar que existen muchos productores que no realizan el riego en sus parcelas, lo que afecta la comparabilidad de los datos. De todas formas, este criterio aseguró que los encuestados tuvieran conocimientos relevantes sobre el consumo hídrico y sobre su impacto en la producción agrícola, lo que permitió la obtención de datos más precisos y significativos.

El cuestionario estructurado abarcó diversas dimensiones del consumo hídrico, incluidas la cantidad de agua utilizada, las fuentes de agua disponibles y la percepción de los productores sobre los efectos ambientales. El cuestionario fue validado en un grupo piloto de productores antes de su implementación en el campo, lo que permitió ajustar las preguntas y asegurar su claridad y relevancia.

La recolección de datos se llevó a cabo entre enero y marzo de 2024. Un equipo de encuestadores, que al mismo tiempo son productores de la zona, fue capacitado y luego visitó cada comunidad para realizar entrevistas cara a cara con los productores seleccionados. Este método facilitó la obtención de información detallada y permitió aclarar dudas en tiempo real, lo que mejoró la calidad de los datos recopilados. Se registraron las respuestas en dispositivos móviles para asegurar una rápida digitalización y un análisis posterior.

De las 137 encuestas iniciales, se identificaron y eliminaron observaciones atípicas que podrían distorsionar los resultados, pues incluían respuestas que se desviaban significativamente de la media en variables clave como el consumo de agua. Para identificar observaciones atípicas, se implementó un enfoque basado en el análisis estadístico: se calcularon las medias y desviaciones estándar de las variables clave (como la cantidad de agua utilizada); luego, se definió un umbral para considerar una observación como atípica -generalmente con un límite de más de 2 desviaciones estándar por encima o por debajo de la media-.

El estudio se llevó a cabo respetando principios éticos, incluido el consentimiento informado de los participantes. Se les explicó a todos el objetivo del estudio y se garantizó la confidencialidad de la información proporcionada. Los encuestados tuvieron la opción de retirarse del estudio en cualquier momento y sin repercusiones. Se aseguraron prácticas transparentes y respetuosas durante todo el proceso de recolección de datos.

III.2. Método

Para evaluar la HH, se ha seguido la metodología del Manual de Evaluación de la Huella Hídrica de (Hoekstra *et al.*, 2011), así como los métodos propuestos por Garrido *et al.* (2010), adaptados a los criterios de evaluación del *software Cool Farm Tool* (Kayatz *et al.*, 2019). Partimos por definir el requerimiento hídrico como la cantidad de agua necesaria para satisfacer la evapotranspiración (ETc) de los cultivos siguiendo la ecuación (1) de Allen *et al.* (2006):

$$ET_c = ET_0 * k_c \quad (1)$$

Donde:

ETc (mm/mes): agua necesaria para la evapotranspiración durante el crecimiento del cultivo.

ETo (mm/mes): evapotranspiración de referencia a partir de datos climatológicos de la zona de cada cultivo.

Kc: coeficiente del cultivo en distintas fases del periodo vegetativo.

Otro parámetro para los requerimientos hídricos del cultivo es la precipitación efectiva (PrEfec), que es la precipitación acumulada en el suelo.

Según varios autores (Angulo *et al.*, 2024; Benique, 2021; Chavarría-Solera *et al.*, 2020; Becerra *et al.*, 2013), la ecuación (2), adaptada para nuestro estudio, se expresa como:

$$HH = HH_{\text{azul}} + HH_{\text{verde}} \quad (2)$$

Donde:

HH: HH total.

HH_{azul} : definida como el volumen de agua superficial y subterránea evaporada, incorporada al producto o devuelta a otra cuenca o al mar, como resultado de la producción.

HH_{verde} : definida como el volumen de agua de lluvia evaporada o incorporada al producto durante el proceso de producción.

La medición de la HH implica cuantificar el volumen total de agua dulce utilizada en el proceso de producción de un bien, considerando tanto el agua de lluvia como el agua de riego. Esto incluye el agua consumida por las plantas y el agua que se evapora o que se pierde en el proceso. Al calcular la HH y relacionarla con el rendimiento del cultivo, se puede obtener una visión clara de la eficiencia en el uso del agua.

Una vez calculada la HH, se deriva la productividad del agua, medida como la cantidad de producción agrícola que se obtiene por unidad de agua utilizada. Esta métrica es crucial para evaluar la eficiencia en el uso del agua y para identificar oportunidades de mejora en la gestión de recursos hídricos. La ecuación para calcular la productividad del agua, a partir de González *et al.* (2014), es:

$$\text{Prod. Agua} = \frac{\text{Rendimiento} \left(\frac{kg}{ha} \right)}{HH \left(\frac{m^3}{ha} \right)} \quad (3)$$

Para esta investigación, realizamos un análisis del ciclo de vida (LCA) utilizando la plataforma CFT en las comunidades objeto de estudio. La información ingresada en la herramienta contiene información sobre: el tamaño del cultivo, la cantidad de producto sembrado, la cantidad cosechada, el volumen destinado a la venta, así como las fechas de siembra y cosecha. Además, se registraron las características del suelo, clasificadas en dos categorías. La primera consiste en el tipo de suelo (fino: arcillo-arenoso, arcilloso, arcillo-limoso, franco-arcillo-limoso, arenoso, medio franco-arcilloso, franco-arcillo-limoso; y grueso: arenoso-franco, franco, franco-limoso y limoso). La segunda categoría consiste en la humedad del suelo, que se categorizó en tres niveles: húmedo, mojado y seco.

En cuanto al uso del agua, se incluyó información sobre el periodo de riego, la tecnología utilizada (secano), la fuente de agua para el riego (en caso de existir), la superficie de riego del cultivo, la tasa máxima de infiltración de la precipitación (mm/día), el agotamiento inicial de la humedad del suelo (%), y la ETo, que se representa en la ecuación (4) según Mejía *et al.* (2020):

$$ET_c * ST \quad (4)$$

Donde:

ETc (mm/mes): agua necesaria para evapotranspiración durante el crecimiento del cultivo.

ST (m³/ha): tamaño del cultivo.

También se incluyen los requerimientos del agua del cultivo: RAC verde (m/ton) y RAC azul (m/ton). Los RAC son necesarios para determinar las huellas hídricas. Las ecuaciones (5) y (6) a partir de Renderos (2016) se expresan a continuación:

$$HHA = \frac{RAC_{\text{azul}}}{Y} \quad (5)$$

$$HHV = \frac{RAC_{\text{verde}}}{Y} \quad (6)$$

Donde:

RAC_{azul} : requerimiento de agua azul del cultivo.

RAC_{verde} : requerimiento de agua verde del cultivo.

Y (m³/ton): volumen de agua para el cultivo.

Finalmente, se incluyó información sobre el precio de la quinua y sus tipos de producción para estimar el valor del cultivo (E_j) desde la ecuación (7) (Mejía *et al.*, 2020):

$$E_j = f \quad (7)$$

Donde:

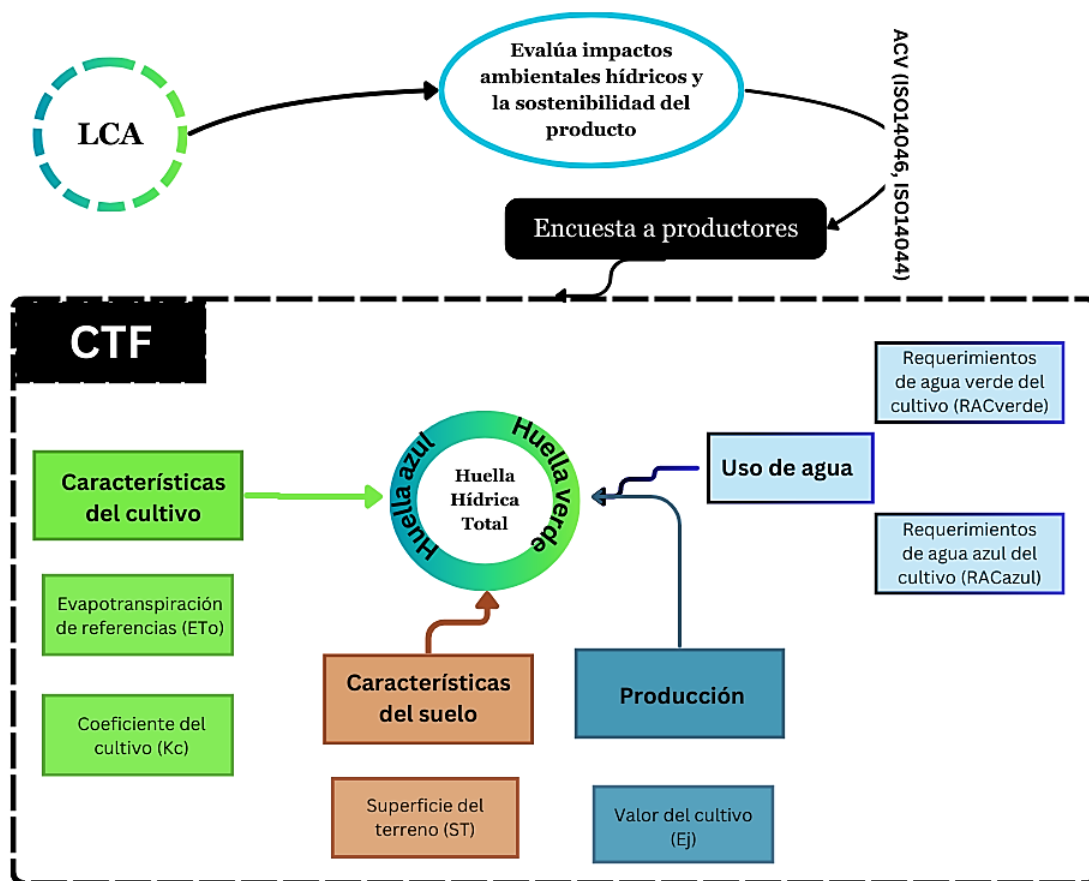
E_j : valor del cultivo.

f (kg): comercialización de los productos agrícolas a una determinada zona.

En la Figura 1, se observa la aplicación del *LCA* para el cultivo de la quinua. Se evaluaron cinco parámetros de la HH: total, verde y azul, así como el rendimiento y la productividad del agua, tanto a nivel de comunidad como en conjunto. Luego, se realizaron análisis estadísticos de tendencia central y dispersión. A partir de las métricas obtenidas, se identificaron clústers (*i.e.*, A, B, C) que se ajustaron mediante regresiones (Carrasquilla-Batista *et al.*, 2016). Posteriormente, se estimaron las elasticidades y diversas regresiones² para analizar las relaciones y la robustez de los resultados (Gallego *et al.*, 2011; Cedeño Plaza, 2020).

² Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO), Mínimos Cuadrados Ordinarios Robustos para evaluar el impacto de valores atípicos en la muestra, Modelo Lineal Generalizado (GLM) y una regresión sobre el cuartil 50 (Q50).

Figura 1. Aplicación del LCA-CFT para el cultivo de la quinua



Fuente: Elaboración propia en base a guía CFT.

III. Resultados

Los resultados normalizados para el Altiplano Sur boliviano indican que los parámetros de HH, HHV y HHA son superiores en términos de eficiencia hídrica, y junto con el rendimiento y la productividad del agua, muestran mejores resultados en comparación con los resultados para el cultivo de quinua en Ecuador y Perú (Hoekstra y Chapagain, 2008; Vizcarra, 2022; Schneir, 2015). Este hallazgo se atribuye a una mayor eficiencia en el uso del agua en la agricultura de estos países, lo que incrementa la producción y los rendimientos agrícolas (FAO, 2017; Roncagliolo y Pierrend 2017; Geerts *et al.*, 2008, 2009). En estos países se evidencia la implementación frecuente de prácticas como el descanso de tierras, la rotación de cultivos, y el uso complementario del riego, que contribuyen a una mayor productividad con un menor impacto hídrico (Barco-Gamarra, 2019) (véase la Tabla 2).

Tabla 2. HH Normalizada entre países productores de quinua

País	Huella hídrica total (m³)	Huella verde (m³/kg)	Huella azul (m³/kg)	Media huella hídrica total (m³/kg)
Bolivia	1.500-2.000	1.200-1.800	300-400	1.750
Perú	1.600-2.200	1.100-1.600	500-600	1.680
Ecuador	1.400-1.900	1.000-1.500	400-500	1.715

Fuente: Elaboración propia con base en FAO (2011), Mekonnen y Hoekstra (2011) y Paredes (2016).

Como era de esperar, los resultados confirman que un mayor rendimiento del cultivo se asocia con una disminución en la Huella Hídrica Total (HHT), particularmente en la HHV. Un rendimiento más elevado implica un uso más eficiente de los recursos hídricos, lo que reduce la cantidad de agua necesaria por unidad de producción (Cando *et al.* 2017). De manera similar, un aumento en la productividad del agua se vincula con un mejor rendimiento en los cultivos de la quinua, ya que una mayor productividad del agua resulta en un mayor rendimiento por cada litro de agua utilizado.

La HH total promedio de toda la muestra estudiada en el Altiplano Sur es de 1.727 (l/kg). Esta es la cantidad total de agua utilizada en todo el proceso de producción, incluyendo tanto el agua verde (precipitación) como el agua azul (agua de riego), que es muy baja (Aldaya y Hoekstra 2010; Lovarelli *et al.*, 2016). Se estimó una HHV de 1.457,59 (l/kg) y una HH Azul de 270,69 (l/kg), que es consistente con la tecnología de secano utilizada en el altiplano de Bolivia. Estas diferencias, además de la tecnología utilizada, podrían deberse a factores como el tipo de cultivo, las prácticas de manejo del agua, y las condiciones climáticas en la zona de estudio (Figuerola y Rodríguez, 2020; Banco Mundial, 2020; IPCC, 2019). En la Tabla 3, se presenta la descripción estadística de la muestra estudiada. Esta información puede ser útil para la planificación y gestión sostenible de los recursos hídricos (Canavire-Bacarreza *et al.*, 2021).

Tabla 3. Medidas de tendencia central y dispersión (Rend, HHT, HHV, HHA, Prod.)

Tendencia	Rend (ton/ha)	HHT (l/kg)	HHV (l/kg)	HHA (l/kg)	Prod (kg/m³)
Media	1,15	1.728,28	1.457,59	270,69	0,13
Desviación	0,91	292,63	246,79	45,83	0,06

Fuente: Elaboración propia con base en la encuesta INESAD-2024 y estimaciones con *Cool Farm Tool*.

IV.1. Huella Hídrica Total por comunidades

La Tabla 4 presenta la descripción estadística de la muestra estudiada a nivel comunitario. La HHT media más baja se registró en la comunidad de Vintuta, con 1.584,82 litros por kilogramo (l/kg); mientras que la más alta se observó en Capura, con 1.833,66 l/kg. Esto significa que en Vintuta y Capura se requieren 1.584,82 y 1.833,66 litros de agua, respectivamente, para producir 1 kilogramo de quinua.

La HHV en Vintuta fue de 1.336,59 l/kg; es decir, fue la más baja. Capura presentó la más alta, con 1.546,46 l/kg. En cuanto a la HHA, Vintuta también tuvo el valor más bajo,

con 248,22 l/kg; Capura obtuvo el más alto, con 287,20 l/kg. La HHV indica que la producción de quinua en Vintuta depende de menores precipitaciones que en Capura.

Ambos valores se encuentran por debajo del rango mínimo reportado para la producción de quinua (Schneir, 2015; Roncagliolo y Pierrend, 2017). Esto sugiere que los factores ambientales, como el cambio climático (Liuhto *et al.*, 2016) o el tipo de producción (Jacobsen, 2012, podrían estar influyendo. La HHA muestra una baja dependencia de fuentes externas de agua (Liuhto *et al.*, 2016), principalmente por los altos costos asociados al riego en el altiplano de Bolivia. Entre 248,22 y 287,20 litros de agua provienen de fuentes superficiales o subterráneas para producir 1 kilogramo de quinua, lo cual puede ser muy problemático en un escenario de sequía (ya que entonces aumenta el estrés hídrico).

Tabla 4. Estadísticos descriptivos por comunidad

Comunidad	Tendencia	Rend (ton/ha)	HHT (l/ kg)	HHV (l/ kg)	HHA (l/ kg)	Prod (kg/m3)
Capura	Media	0,79	1.833,66	1.546,46	287,20	0,13
	Desviación	0,36	377,33	318,23	59,10	0,04
Bella Vista	Media	0,43	2.451,25	2.067,32	383,93	0,11
	Desviación	1,27	1.815,11	1.530,82	284,29	0,16
Vintuta	Media	1,22	1.584,82	1.336,59	248,22	0,10
	Desviación	0,95	227,02	191,46	35,56	0,08

Fuente: Elaboración propia con base en la encuesta INESAD-2024 y *Cool Farm Tool*.

Los rendimientos máximos de la quinua varían entre 1,44 y 3,23 toneladas por hectárea (ton/ha), mientras que la HHT oscila entre 1.958,01 y 2.614,16 litros por kilogramo (lt/kg). En cuanto a la HHV, los valores varían entre 1.651,33 y 2.067,32 l/kg, y para la HHA, entre 306,68 y 409,45 l/kg. Por otro lado, los valores mínimos de rendimiento fluctúan entre 0,36 y 0,43 ton/ha, con una HHT entre 1.120,50 y 1.400,68 l/kg, una HHV de 945,00 a 1.181,30 l/kg, y una HHA entre 175,50 y 219,38 l/kg. Este análisis de variabilidad nos permite entender que existen grupos o clústers de productores dentro de cada comunidad que utilizan el recurso hídrico de manera diferente (véase la Tabla 5).

Tabla 5. Tabla comparativa de los valores máximos y mínimos de las variables evaluadas

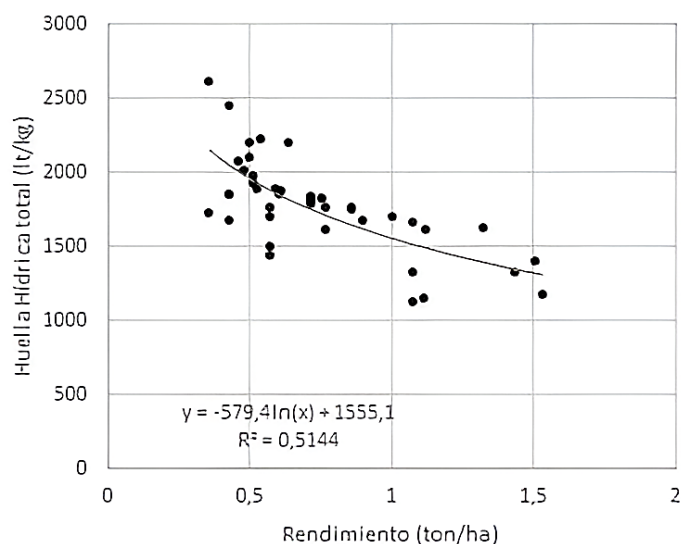
Comunidad	Rend Máx (ton/ha)	Rend Mín (ton/ha)	HHT Máx (l/kg)	HHT Mín (l/kg)	HHV Máx (l/kg)	HHV Mín (lt/Kg)	HHA Máx (l/kg)	HHA Mín (l/kg)
Capura	1,44	0,36	2.614,16	1.321,78	2.067,32	1.181,3	409,45	207,03
Vintuta	3,23	0,36	1.958,01	1.120,50	1.651,33	945	306,68	175,5
Bella Vista	3,23	0,43	2.451,25	1.400,68	2.067,32	1.181,3	383,93	219,38
Agregado	3,23	0,36	2.204,715	1.120,5	2.204,71	945	409,45	175,5

Fuente: Elaboración propia con base en la encuesta INESAD-2024 y estimaciones con *Cool Farm Tool*.

Como era de esperar, a medida que aumenta el rendimiento, la HHT tiende a disminuir. Esta relación inversa se observa en dos clústers identificados en la muestra completa estudiada, denominados para fines de análisis como Grupo A y Grupo B.

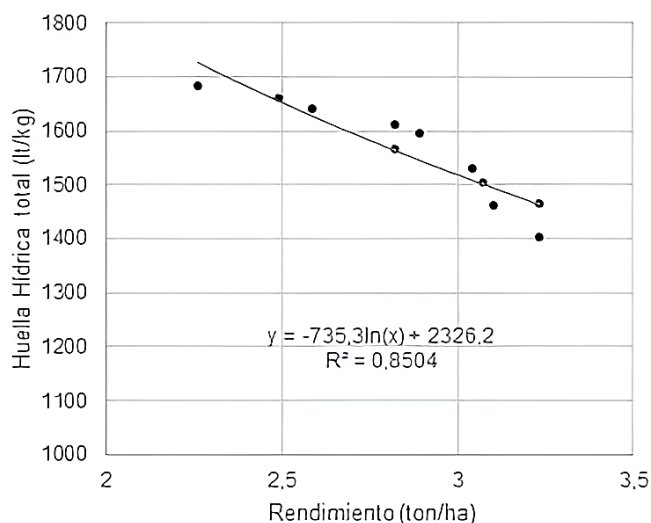
Para el Grupo A, se estima que el aumento de un 1% en el rendimiento resulta en una disminución del 1,12% en la HHT. En el Grupo B, el aumento del 1% en el rendimiento resulta en una disminución del 0,84% en la HHT. El Grupo A presenta un perfil de producción más eficiente en el uso del agua (que no es óptimo) para la producción de quinua. Esto es crucial en un contexto donde la escasez de agua es una preocupación creciente de los pequeños productores, como resultado del aumento en la frecuencia e intensidad de las sequías (véanse las Figuras 2 y 3).

Fig. 2. HH-Rendimiento para el Grupo A



Fuente: Elaboración propia con base en la identificación de clústers y *Cool Farm Tool*.

Fig. 3. HH-Rendimiento para el Grupo B

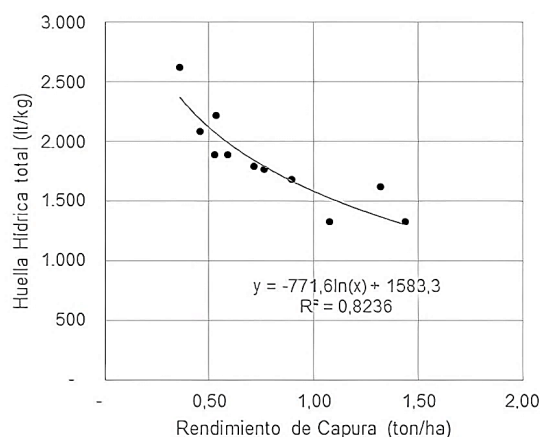


Fuente: Elaboración propia con base en la identificación de clústers y *Cool Farm Tool*.

IV.3. Huella Hídrica y Rendimiento para cada comunidad

Para la comunidad de Capura se observa que, a medida que aumenta el rendimiento, la HHT tiende a disminuir, mostrando una relación inversa. Allí, un aumento del 1% en el rendimiento resulta en una disminución del 0,02% en la HHT (Véase la Fig. 4).

Fig. 4. HH total y rendimiento en la comunidad de Capura



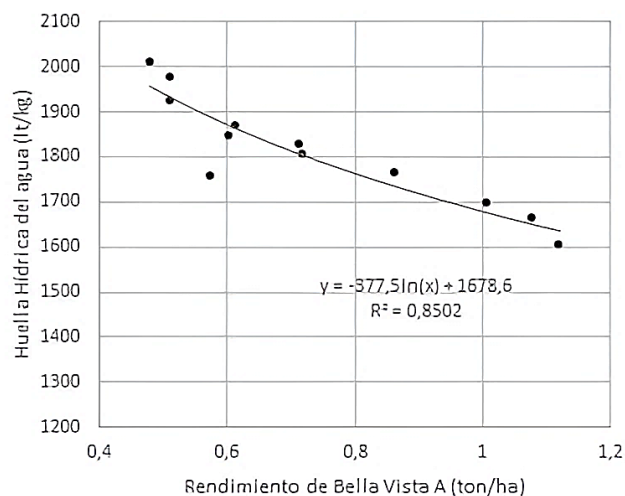
Fuente: Elaboración propia con base en la identificación de clústers y *Cool Farm Tool*.

Para la comunidad de Bella Vista se observó la formación de dos agrupaciones³, para lo cual se dividió a la comunidad en dos grupos: Bella Vista A y Bella Vista B.

En Bella Vista A, se observa que a medida que aumenta el rendimiento, la huella hídrica HHT tiende a disminuir. De manera similar, en Bella Vista B se encuentra una relación inversa entre el rendimiento y la HHT. En Bella Vista A, el aumento del 1% en el rendimiento reduce la HHT entre 0,12 y 0,34%. En Bella Vista B, el aumento de 1% en el rendimiento reduce entre un 1,48 y 3,44% la HHT (véanse las Figuras 5 y 6).

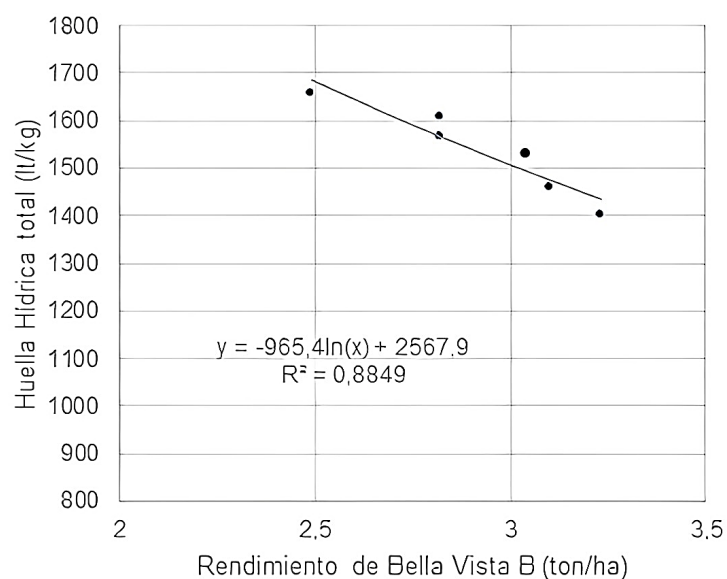
³ Para la identificación de clústers se usó el método de *K-means Clustering*, que se basa en la partición de los datos en K grupos, donde K es un número predefinido. El algoritmo asigna cada punto de datos al clúster más cercano, calculando la media de los puntos en cada clúster para actualizar su posición.

Fig. 5. HH total y rendimiento en la comunidad de Bella Vista A



Fuente: Elaboración propia con base en la identificación de clústers y *Cool Farm Tool*.

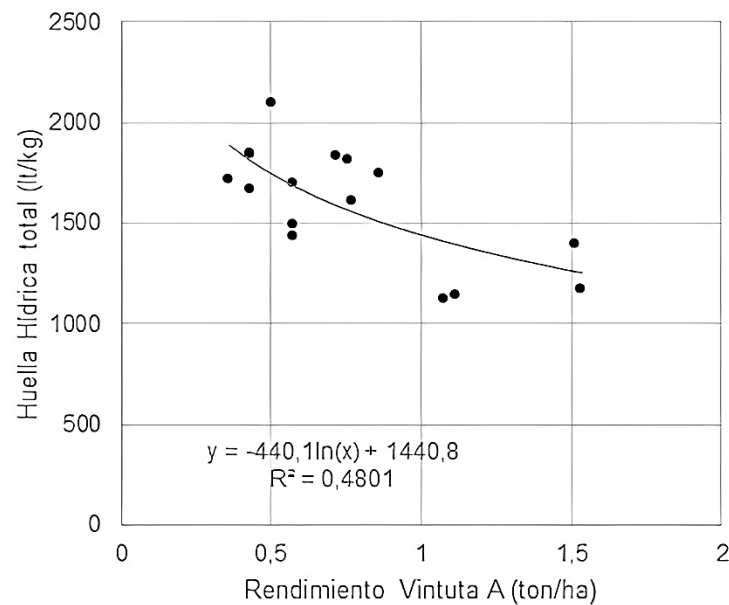
Fig. 6. HH total y rendimiento para la comunidad de Bella Vista B



Fuente: Elaboración propia con base en la identificación de clústers y *Cool Farm Tool*.

Para la comunidad de Vintuta también se identificaron dos clústers dividiendo la muestra en dos grupos denominados Vintuta A y B. Para Vintuta A y B, se observa que a medida que aumenta el rendimiento, la HHT tiende a disminuir. En Vintuta A un aumento del 1% en el rendimiento reduce la HHT entre 0,10 y 0,67% (véase la Fig. 7).

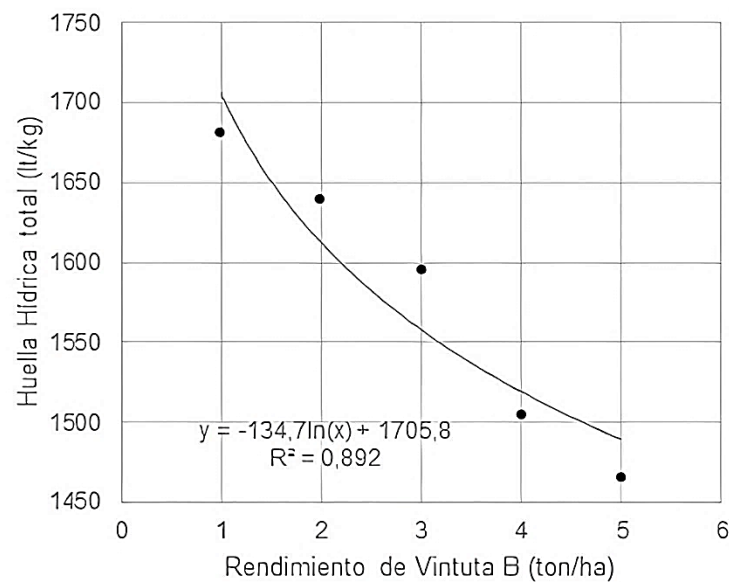
Fig. 7. HH y rendimiento del cultivo para Vintuta A



Fuente: Elaboración propia con base en la identificación de clústers y *Cool Farm Tool*.

En el caso de Vintuta B, el aumento del 1% en el rendimiento reduce la HHT entre 0,07% y 0,10%. Las variedades de cultivos y su resistencia a las sequías (IPCC, 2019) pueden explicar este comportamiento (véase la Fig. 8).

Fig. 8. HH total y rendimiento del cultivo para Vintuta B



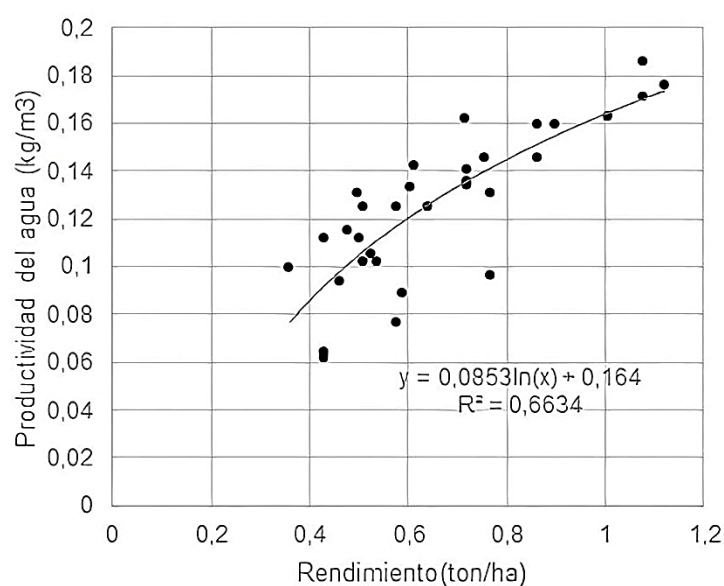
Fuente: Elaboración propia con base en la identificación de clústers y *Cool Farm Tool*.

IV.4. Huella Hídrica y productividad del agua para cada comunidad

En el análisis del perfil de productividad del agua identificamos tres clústers, denominados panel A, B y C, en los cuales se observa que, a medida que aumenta el rendimiento, también aumenta la productividad del agua (Hoekstra y Hung 2005; Geerts *et al.*, 2008, 2009).

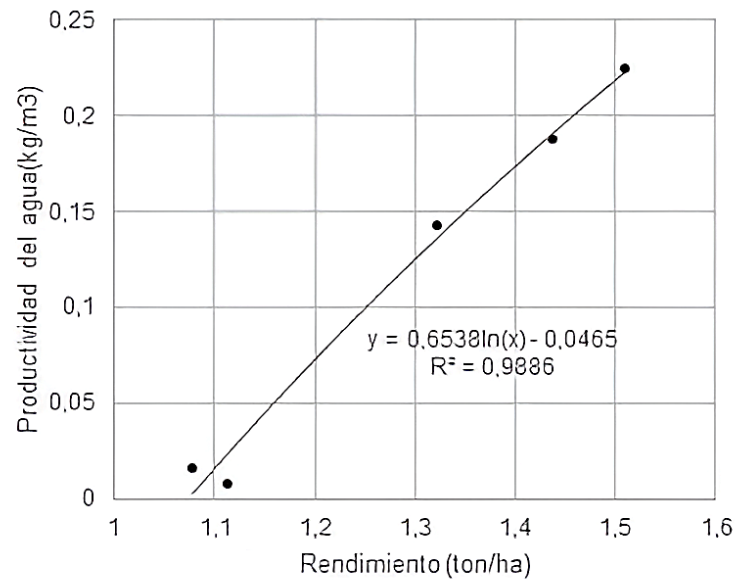
En el panel A, un aumento del 1% en el rendimiento incrementa la productividad del agua en un 8,21% (véase la Fig. 9). En el panel B, un aumento del 1% en el rendimiento incrementa la productividad del agua en un 3,48%. La eficiencia en el uso del agua, que mejora la resistencia de los cultivos frente a las sequías, refuerza la relación positiva entre el rendimiento y la productividad del agua (véase la Fig. 10).

Fig. 9. Productividad del agua y rendimiento para el panel A



Fuente: Elaboración propia con base en la identificación de clústers y *Cool Farm Tool*.

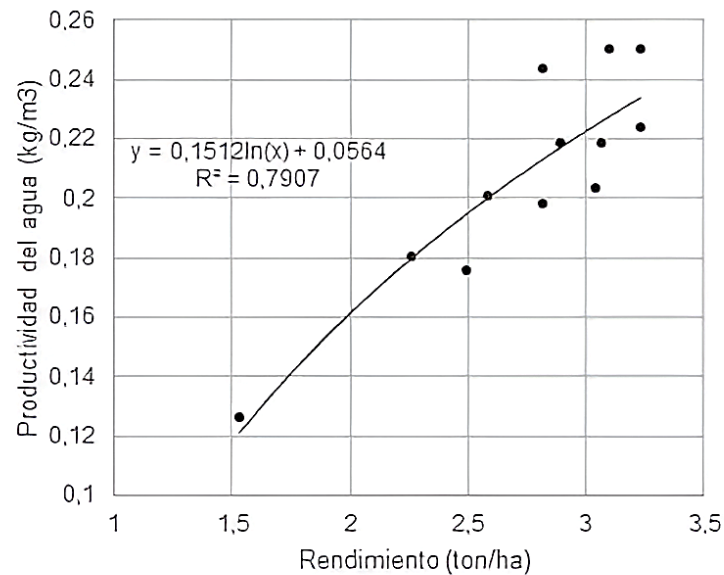
Fig. 10. Productividad del agua y rendimiento para el panel B



Fuente: Elaboración propia con base en la identificación de clústers y *Cool Farm Tool*.

En el panel C, un aumento del 1% en el rendimiento incrementa la productividad del agua entre un 0,82% y 0,91% (véase la Fig. 11).

Fig. 11. Productividad del agua y rendimiento para el panel C

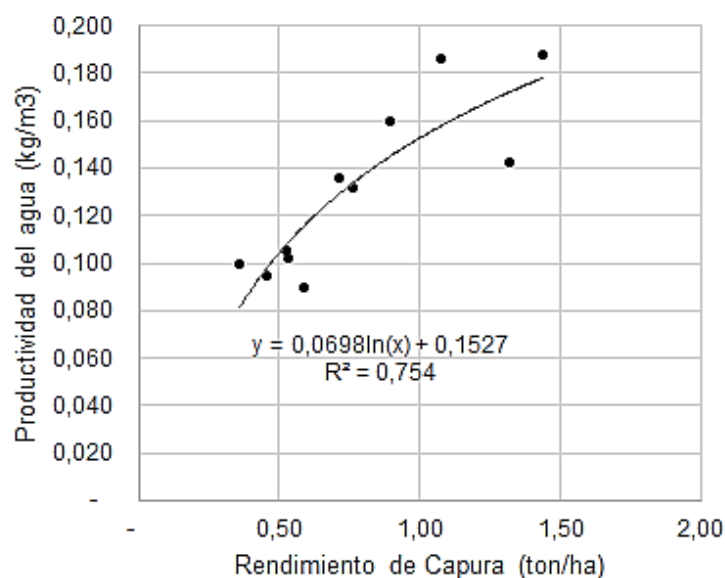


Fuente: Elaboración propia con base en la identificación de clústers y *Cool Farm Tool*.

IV.5. Huella Hídrica y productividad del agua para cada comunidad

Para Capura, también se verificó una relación positiva entre el rendimiento y la productividad (Geerts *et al.*, 2008, 2009). En esta comunidad se estimó que un aumento del 1% en el rendimiento incrementa la productividad del agua entre 0,41 y 0,73% (véase la Fig. 12).

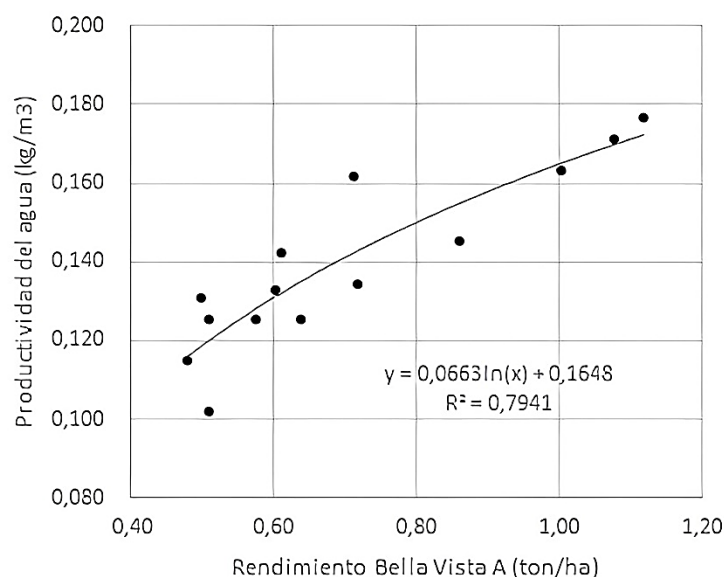
Fig. 12. Productividad del agua y rendimiento para la comunidad de Capura



Fuente: Elaboración propia con base en la identificación de clústers y *Cool Farm Tool*.

Para la comunidad de Bella Vista se identificaron dos clústers (*i.e.* Bella Vista A y Bella Vista B). Como era de esperar, en ambos grupos se observó una relación positiva entre el rendimiento y la productividad. En Bella Vista A, un aumento del 1% en el rendimiento incrementa la productividad del agua entre 0,21 y -0,338% (véase la Fig. 13).

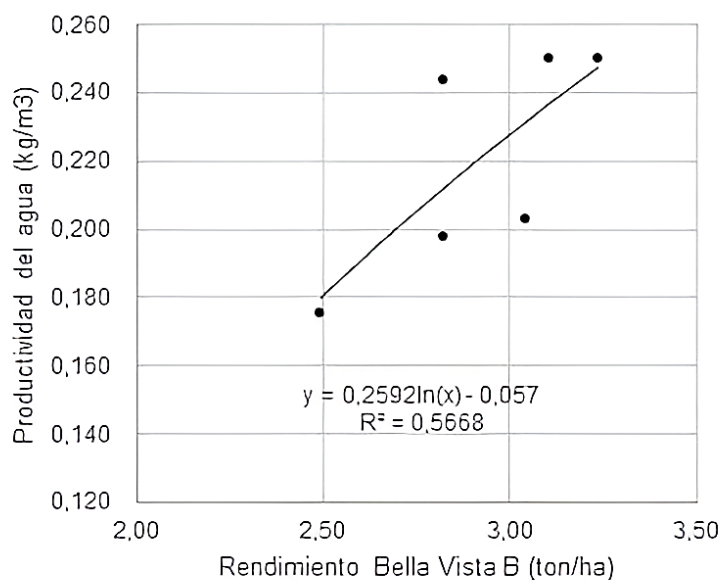
Fig. 13. Productividad del agua y rendimiento para Bella Vista A



Fuente: Elaboración propia con base en la identificación de clústers y *Cool Farm Tool*.

En Bella Vista B, se estimó que un aumento del 1% en el rendimiento incrementa la productividad del agua entre 1,20 y 1,28% (véase la Fig. 14).

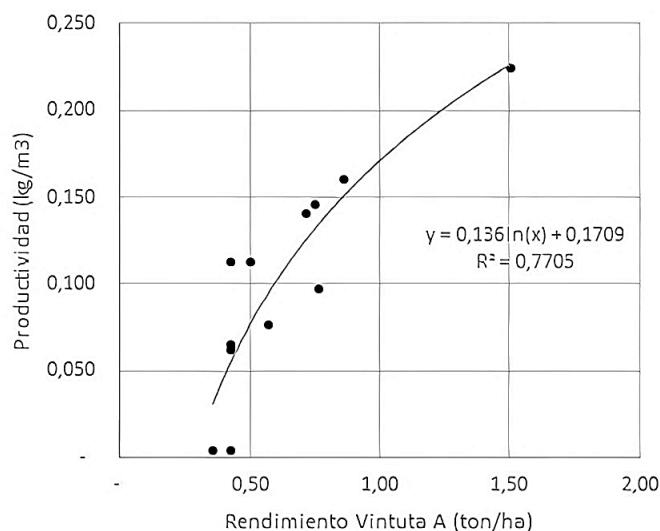
Fig. 14. Productividad del agua y rendimiento para Bella Vista B



Fuente: Elaboración propia con base en la identificación de clústers y *Cool Farm Tool*.

Para la comunidad de Vintuta, también se identificaron dos grupos (i.e. Vintuta A y B), donde prevalece una relación positiva entre el rendimiento y la productividad. En Vintuta A, un aumento del 1% en el rendimiento incrementa la productividad del agua entre un 0,93 y 1,10% (véase la Fig. 15).

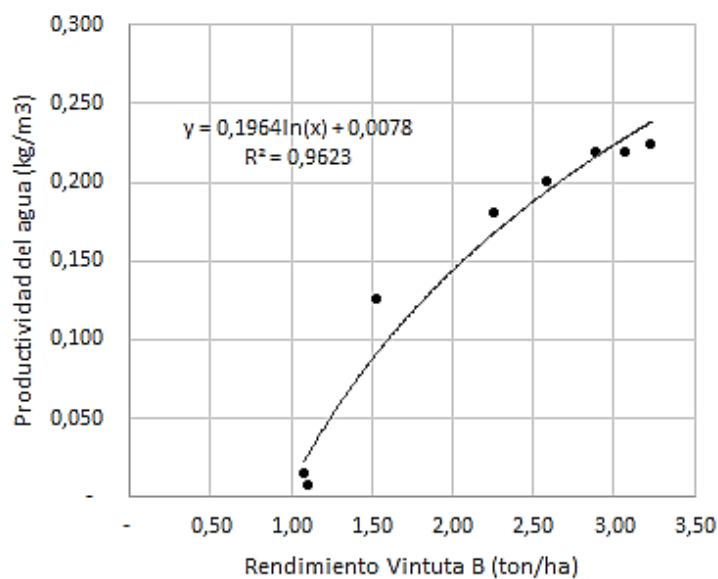
Fig. 15. Productividad del agua y rendimiento para Vintuta A



Fuente: Elaboración propia con base en la identificación de clústers y *Cool Farm Tool*.

En Vintuta B, un aumento del 1% en el rendimiento incrementa la productividad del agua entre un 4,7 y 13,54%e (véase la Fig. 16).

Fig. 16. Productividad del agua y rendimiento para Vintuta B



Fuente: Elaboración propia con base en la identificación de clústers y *Cool Farm Tool*.

IV.6. Adaptación al cambio climático y buenas prácticas agrícolas

En esta sección se lleva a cabo un análisis de diversos modelos econométricos para evaluar el rendimiento de la quinua en relación con la HH (HV) y la implementación de buenas prácticas agrícolas (BPA). Para tal efecto, se emplearon cuatro enfoques metodológicos: Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO), Mínimos Cuadrados *Robust*

(Robust MCO), Modelos Lineales Generalizados (GLM) y Regresión Cuantil (véase la Tabla 6). Asimismo, se utilizará la ecuación (8):

$$\text{Rend} = \alpha_0 + \alpha_1 HV + \alpha_2 BPA_{\text{soil}} + \alpha_3 BPA_{\text{mix}} \quad (8)$$

Donde:

HV: Esta variable representa el impacto del uso del agua de lluvia en el rendimiento (*Rend*) de la quinua.

BPA_{soil}: Se refiere a las buenas prácticas agrícolas que pueden ayudar a mejorar la fertilidad del suelo, como el uso de abono orgánico.

BPA_{mix}: Representa una combinación de buenas prácticas tanto en el manejo del suelo como del agua.

Tabla 6. Modelos de adaptación al cambio climático y buenas prácticas agrícolas (BPAs)

Coefficiente α_1	-0.0004	-0.0036	-0.0004	-0.0031
Coefficiente α_2	0.4781	0.4886	0.4781	0.4378
Coefficiente α_3	1.0856	1.1199	1.0856	1.1194
<i>p</i> – value α_0	***	***	***	***
<i>p</i> – value α_1	**	**	**	0.0460
<i>p</i> – value α_2	***	***	***	***
<i>p</i> – value α_3	***	***	***	***
R^2	0.9619	0.7095	0.9101	0.7777
R^2 Ajustado	0.9597	0.9695	0.9101	0.7649
$t\alpha_0$	5.6822			4.2175
$t\alpha_1$	-2.9610			-2.0448
$t\alpha_2$	5.6633			3.7603
$t\alpha_3$	29.8020			17.0420
<i>z</i> – estadístico α_0		5.4521	5.6822	
<i>z</i> – estadístico α_1		-2.6932	-2.9610	
<i>z</i> – estadístico α_2		5.8645	5.6633	
<i>z</i> – estadístico α_3		31.1539	29.8020	
F-estadístico	437.6437			
Prob(F-estadístico)	***			
Prob (Quasi-LR stat)				***
Error Estándar α_0	0.2151	0.2123	0.2151	0.2562
Error Estándar α_1	0.0001	0.0001	0.0001	0.0002
Error Estándar α_2	0.0844	0.0833	0.0844	0.1164
Error Estándar α_3	0.0364	0.0359	0.0364	0.0657

Fuente: Elaboración propia con base en estimaciones realizadas con Stata.

Nota: Los coeficientes representan la relación entre las variables independientes y la HH verde (HV). Un valor $p < 0,05$ es: ** $< 0,005$ es: *** indica significancia estadística. Para mayor detalles, revisar el Anexo 2.

El primer método (MCO) se basa en la estimación de los coeficientes de regresión mediante la minimización de la suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores observados y los predichos. Este enfoque asume que los errores son normalmente distribuidos y que presentan una varianza constante, lo que garantiza la validez de las inferencias estadísticas (Wooldridge 2016).

En contraste, el *Robust* MCO se presenta como una alternativa menos sensible a la presencia de valores atípicos y a la heterocedasticidad, características que son particularmente relevantes en el contexto agrícola, donde las condiciones pueden variar significativamente entre parcelas. Este método permite obtener estimaciones de los coeficientes que reflejen de manera más precisa la relación entre las variables, minimizando así el impacto de *outliers* (Holland y Welsch 1977).

El tercer enfoque (GLM) permite que la variable dependiente siga diferentes distribuciones. Utiliza funciones de enlace para relacionar la media de la variable dependiente con las variables independientes. Esto resulta útil en situaciones donde se presume que el rendimiento no sigue una distribución normal (McCullagh y Nelder 1989).

Finalmente, se aplica la regresión cuantílica para estimar los efectos de las variables independientes en el cuartil 50 (Q50), lo que proporciona una visión más completa acerca de cómo las variables afectan el rendimiento en diferentes niveles de la distribución (Koenker y Bassett 1978).

Los resultados obtenidos muestran que los modelos *Robust* y *GLM* son los más adecuados para explicar el rendimiento de la quinua. El *Robust* MCO resulta ser la opción preferida debido a su menor sensibilidad a valores atípicos y a su capacidad para manejar datos que no cumplen con las suposiciones del modelo lineal clásico. Aunque ambos modelos presentan un R^2 ajustado similar, el *Robust* MCO proporciona estimaciones más confiables, especialmente en presencia de anomalías en los datos, lo que es fundamental en el análisis del rendimiento agrícola (Rousseeuw y Leroy 1987).

El análisis de los coeficientes estimados revela que el intercepto tiene un valor similar en MCO y *GLM* (1,22), y que es ligeramente más alto en *Robust* (1,157). Esto indica que, en ausencia de otras variables, el rendimiento tiene un valor base positivo. En cuanto a la HV, los coeficientes son negativos en todos los métodos, lo que sugiere que un aumento en la HH se asocia con una disminución en el rendimiento.

Por otro lado, los coeficientes de BPA_{soil} y BPA_{mix} son positivos en todos los métodos. Esto indica que la aplicación de buenas prácticas agrícolas, como el uso de abono orgánico y las prácticas mixtas, está asociada con un aumento en el rendimiento. Es relevante mencionar que el coeficiente de *Quantile* Q50 para BPA_{soil} es menor que en otros métodos, lo que sugiere que su efecto puede ser menos pronunciado en el cuartil medio de la distribución del rendimiento.

La interpretación de los resultados sugiere que los coeficientes positivos asociados a las buenas prácticas agrícolas, específicamente BPA_{soil} y BPA_{mix} , reflejan una mejora significativa en el rendimiento de la quinua. Esto puede explicarse porque la

implementación de BPA_{soil} podría ayudar a mejorar la fertilidad del suelo mediante el uso de abono orgánico. Este tipo de prácticas podría fomentar un ambiente más favorable para el desarrollo de las raíces, mejorar la retención de la humedad y aumentar la disponibilidad de nutrientes esenciales. Como resultado, las plantas de quinua podrían acceder a recursos hídricos y nutricionales de manera más eficiente, lo que se podría traducir en un aumento del rendimiento (López *et al.*, 2020).

Por otro lado, BPA_{mix} implica el uso de prácticas agrícolas mixtas (manejo del suelo y el agua de manera conjunta). Este enfoque busca integrar diversas estrategias que, al trabajar en conjunto, mejorarían la eficiencia y sostenibilidad de los sistemas agrícolas. En cuanto al manejo del agua, este enfoque podría permitir un uso más eficiente del agua, sobre todo en períodos secos. Los beneficios de BPA_{mix} son múltiples, ya que se podría mejorar la productividad del agua al optimizar el uso de recursos, promover la sostenibilidad al conservar los recursos naturales, y aumentar la resiliencia al permitirles a los agricultores adaptarse mejor a las variaciones climáticas y a otros desafíos ambientales.

La relación negativa y significativa de la HV es particularmente intrigante, cuando lo que se espera es que una mejora en la productividad del agua vaya acompañada de una mejora en el rendimiento del cultivo. Este coeficiente negativo puede explicarse porque la mayoría de las parcelas estudiadas muestran una muy baja productividad del agua, donde solo el 18% de las parcelas aplicaron algún tipo de manejo del recurso agua. Esto sugiere que muchas parcelas podrían estar operando con niveles bajos de eficiencia, donde un aumento en la HH no necesariamente se traduce en un uso eficiente del agua, lo que resulta en rendimientos más bajos (Grafton *et al.*, 2018). Además, un aumento en la HH verde puede indicar una mayor demanda de agua, lo que podría llevar a una competencia por recursos hídricos limitados entre parcelas, resultando en un efecto negativo en el rendimiento, especialmente en áreas donde el agua es escasa o mal gestionada (Pérez *et al.*, 2019).

Es importante destacar que, aislando las parcelas donde se implementaron las BPA mixtas, se observó una relación clara entre el aumento de la productividad del agua y el rendimiento. Esto sugiere que estas prácticas no solo mejoran la eficiencia en el uso del agua, sino que también contribuyen a maximizar el rendimiento, lo que contrasta con las parcelas que no aplican BPA. La combinación de técnicas adecuadas de manejo del agua y las prácticas agrícolas sostenibles es esencial para optimizar la producción (Zhang *et al.*, 2020).

Los resultados de la elasticidad para las variables HV, BPA_{soil} y BPA_{mix} muestran que la elasticidad para HV fue aproximadamente cero en todos los modelos, lo que indica que el rendimiento no responde a cambios en la HH verde. Para BPA_{soil} y BPA_{mix} , en todos los modelos los valores fueron mayores a cero, pero no mayores a 1. Esto significa que el rendimiento no responde de manera proporcional a los cambios en ambas variables.

Según nuestros resultados, podrían existir otras variables que pueden estar afectando el rendimiento de la producción de quinua y su relación con la HH. El manejo del suelo, sus buenas prácticas y la sobreutilización del agua podrían tener un efecto si se consideran otras variables más para definir sus impactos. Esto podría estar relacionado

con dilucidar las comunidades microbianas asociadas a los suelos bajo diferentes tratamientos y combinaciones de materia orgánica (Mohammadi *et al.*, 2011). Se podría trabajar con diferentes tipos de abonos para ver las distintas respuestas de la materia orgánica sobre el ciclo de nutrientes en el suelo, lo que podría mejorar el crecimiento de las plantas. Tener plantas más saludables y productivas podría contribuir a absorber el agua de manera más efectiva, lo que reduciría la cantidad de agua necesaria para alcanzar rendimientos óptimos (Tarafdar, 2022). También se podrían realizar diferentes tratamientos en cuanto a la disponibilidad del agua y el estrés hídrico de las plantas, y considerar otras variables adicionales que podrían estar afectando en la respuesta de los cultivos a los cambios ambientales.

Es relevante considerar que la calidad de los suelos y la optimización del ciclo de nutrientes depende de las comunidades microbianas presentes (Mohammadi *et al.*, 2011). Es bien sabido que existen muchas relaciones simbióticas de comunidades microbianas con las raíces de los cultivos de quinua (Estrada *et al.*, 2023). Por ello, se recomienda realizar estudios de comunidades microbianas de suelos para dilucidar sus interacciones con los cultivos. Todo ello con el objetivo de implementar estas comunidades como parte de otra buena práctica agrícola para el manejo de suelos.

IV. Conclusión

Un alto rendimiento agrícola se asocia con una baja HH. En Bolivia, el rendimiento promedio de la quinua es de aproximadamente 1,15 ton/ha, mientras que la HH total es alta: 1.728 l/kg. Esta discrepancia indica que la relación entre el rendimiento y la HH en Bolivia es ineficiente en comparación con otros países, como Perú y Ecuador, donde los rendimientos superan las 2 ton/ha. La alta HH, combinada con el bajo rendimiento, sugiere que la producción no está optimizando el uso del agua, lo que podría deberse a prácticas agrícolas inadecuadas y a la falta de tecnologías de riego eficientes. Este problema se ve exacerbado por los efectos del cambio climático, donde las sequías suelen provocar estrés hídrico en el cultivo. Por lo tanto, es esencial realizar un análisis de ciclos de vida para comprender mejor los impactos de cada etapa de producción en la huella hídrica y en los rendimientos. Además, la evaluación de los perfiles de productividad del agua puede identificar oportunidades para mejorar la eficiencia y sostenibilidad del uso del agua en la agricultura de la quinua. Esto resalta la necesidad de mejorar las técnicas de cultivo y gestión del agua para lograr un uso más sostenible y productivo de los recursos.

La productividad del agua se podría optimizar con la adopción de tecnologías avanzadas de riego y manejo agrícola. En Bolivia, la falta de acceso a estas tecnologías limita significativamente la productividad del agua, que está relacionada con la cantidad de sales presentes en el agua de riego. Además, la productividad se mide directamente a través de la conductividad eléctrica del agua de riego, lo que a su vez afecta el rendimiento de la quinua. Lo último se evidencia en el hecho de que el rendimiento en las comunidades del altiplano -por ejemplo, la comunidad de Vintuta, que tiene una huella relativamente baja (1.584,82 l/kg)- no logra maximizar el potencial productivo del grano. La ausencia de tecnologías adecuadas de riego y manejo agrícola, como los sistemas de riego o las prácticas de conservación del agua, contribuye a una baja eficiencia en el uso del agua. Por lo tanto, la baja productividad del agua en Bolivia es un

factor crítico que contribuye al bajo rendimiento de la quinua, aspecto que subraya la necesidad de una innovación tecnológica en la agricultura.

Un uso eficiente del agua puede resultar en mayores rendimientos y menores costos económicos para los agricultores. En Bolivia, la ineficiencia en su uso provoca altos costos económicos y bajos rendimientos en la producción quinuera. Esto se traduce en que los agricultores deben invertir más en el riego y el manejo del agua sin obtener un retorno proporcional en su producción. La variabilidad climática y la escasez de recursos hídricos en el altiplano boliviano agravan esta situación, pues así la gestión del agua es aún más crítica. Por lo tanto, la ineficiencia en la gestión del agua limita la competitividad de los agricultores bolivianos en el mercado internacional, ya que enfrentan desafíos adicionales que afectan su capacidad para producir de manera rentable.

La implementación de Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) podría mejorar el rendimiento de los cultivos al optimizar el manejo de recursos. En Bolivia, la adopción limitada de BPA está asociada con bajos rendimientos en la producción de la quinua. La falta de capacitación y recursos para implementar estas prácticas significa que muchos agricultores no están aprovechando al máximo su potencial productivo. Las BPA, como la rotación de cultivos, el uso de abonos orgánicos y las técnicas de conservación del agua, se complementan de manera significativa. Por lo tanto, la falta de implementación de BPA contribuye a la reducción del rendimiento de la quinua en Bolivia. Es fundamental, pues, fomentar la educación y el acceso a recursos para que los agricultores puedan adoptar estas prácticas y para que mejoren su producción.

V. Recomendaciones

Los suelos del Altiplano Sur de Bolivia presentan características que limitan su eficiencia en el uso del agua, lo que contribuye a una mayor huella hídrica en la producción quinuera. Estos suelos, a menudo, tienen un bajo contenido de materia orgánica y son propensos a la compactación, lo que reduce su capacidad de retención de humedad y aumenta la necesidad de un riego frecuente. Esta situación no solo afecta la sostenibilidad del cultivo, sino que también pone en riesgo la viabilidad económica de los agricultores, quienes deben invertir más recursos en el manejo del agua. Por lo tanto, es imperativo implementar estrategias que mejoren la calidad del suelo y optimicen el uso del agua en la producción de la quinua.

Una de las primeras recomendaciones es la implementación de programas destinados a recuperar la materia orgánica del suelo. La incorporación de abonos orgánicos y compost podría mejorar significativamente la fertilidad del suelo, y aumentar su capacidad de retención de agua y nutrientes. Además, la adopción de prácticas de conservación del suelo, como la labranza mínima, es crucial para reducir la erosión y promover la salud del suelo. Estas prácticas no solo beneficiarán el crecimiento de la quinua, sino que también contribuirán a la sostenibilidad de largo plazo en los ecosistemas agrícolas del altiplano.

Para optimizar el rendimiento del cultivo y reducir la huella hídrica, es esencial la implementación de sistemas de riego eficientes. Esto incluye instalar tecnologías avanzadas -como sistemas de riego por goteo y microaspersión- que permitan una

aplicación más precisa del agua. Asimismo, el uso de sensores de humedad del suelo podría proporcionar datos críticos sobre las necesidades hídricas de los cultivos, y así permitirles a los agricultores ajustar sus prácticas de riego de manera más efectiva. La capacitación en estas tecnologías será fundamental para garantizar que los agricultores puedan utilizarlas de manera adecuada y maximizando sus beneficios.

El monitoreo y la medición periódica de la huella hídrica del cultivo son prácticas recomendadas para evaluar la eficiencia en el uso del agua. Realizar análisis regulares permitirá identificar áreas de mejora y ajustar estrategias de manejo según las condiciones del clima y el suelo. Esta información podría ser valiosa para desarrollar un enfoque más sostenible y adaptado a las particularidades del altiplano, donde las variaciones climáticas pueden ser significativas.

Además, se sugiere el uso de coberturas vegetales, como de leguminosas nativas y *Lupinus* (silvestre), que mejoren la retención de la humedad en el suelo. Estas coberturas podrían ser cultivos de cobertura o mulching, que ayudan a reducir la evaporación y a mantener la temperatura del suelo. Implementar estas prácticas no solo contribuiría a la conservación del agua, sino que también mejoraría la biodiversidad del agroecosistema, creando un ambiente más resiliente ante cambios climáticos.

Por último, la formación en manejo integrado de recursos hídricos es esencial para que los agricultores comprendan la importancia de gestionar el agua de manera sostenible. Esto incluye el desarrollo de estrategias de adaptación climática que consideren las proyecciones del cambio climático y sus posibles impactos en la producción quinuera. Fomentar la colaboración entre agricultores, instituciones de investigación y organizaciones gubernamentales podría facilitar la difusión de conocimientos y la adopción de prácticas innovadoras. De este modo, se podría asegurar un futuro más sostenible para la producción de la quinua en el altiplano boliviano.

Referencias

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. y Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. *FAO*, 298(0). Roma.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. y Smith, M. (1998). Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper*, 56. <http://www.fao.org/3/X0490E/X0490E00.htm>.
- Angulo, E., Bracamonte, E., Croce, A., Sbarato, V. y Matoff, E. (2024). Evaluación de la huella de carbono en la papa de consumo: Colonias Caroya–Córdoba, Argentina. *INTA*, 84. R. Bongiovanni, L. Tuninetti, N. Nardi (Ed.).
- Aldaya, M. M. y Hoekstra, A. Y. (2010). The Water Needed for Italians to Eat Pasta and Pizza. *Agricultural Systems*, 103(6), 351-360.
- Banco Mundial (2020). *Agua, agricultura y seguridad alimentaria*.
- Barco-Gamarra, M. T. D., Foladori, G. y Soto-Esquivel, R. (2019). Insustentabilidad de la producción de quinua en Bolivia. *Estudios sociales: Revista de alimentación contemporánea y desarrollo regional*, 29(54).
- Bates, B. C., Kundzewicz, Z. W., Wu, S. y Palutikof, J. P. (2008). Climate Change and Water. *IPCC Technical Paper VI*.
- Becerra, A. T., Bravo, X. B. L. y Membrive, V. J. F. (2013). HH y sostenibilidad del uso de los recursos hídricos. *M+ A: Revista Electrónica de Medioambiente*, 14.
- Benique Olivera, E. (2021). Impacto económico del cambio climático en cultivo de la quinua (*Chenopodium quinoa willd*) orgánica en la región del altiplano: un enfoque ricardiano. *Revista de investigaciones altoandinas*, 23(4), 236-243.
- Camaggio, G. y Amicarelli, V. (2014). The Ancient Crop of Quinoa for World Food Security. M. Micniakiewicz y S. Popek (ed. *Commodity Science in Research, Practice-Future Trends and Challenges in Food Sector*, 1, 31-45.
- Canavire-Bacarreza, G., Rios, A. R. y Yañez-Pagans, P. (2021). Estimating the Water Footprint of Agricultural Production: Issues and Challenges. *Ecological Economics*, 180, 106-871.
- Cando, L. J. R., Vilches, R., Acevedo, R. X. L., Colmenares, I. E. P. y Mena, E. L. S. (2017). Estimación de la HH y de Carbono en los cultivos comunitarios de quinua (*Chenopodium Quinoa Willd*) correspondientes a la zona central de los andes ecuatorianos. *Anales científicos*, 78(2), 173-182. Universidad Nacional Agraria La Molina.

- Capcha, T. M. y Mejía, J. A. (2005). HH de productos agrícolas producidos en la sierra central y comercializados en Lima. *Apunt. Cienc. Soc.*, 05 (01), 128-134. <http://dx.doi.org/10.18259/acs.2015020>
- Carrasquilla-Batista, A., Chacón-Rodríguez, A., Núñez-Montero, K., Gómez-Espinoza, O., Valverde, J. y Guerrero-Barrantes, M. (2016). Regresión lineal simple y múltiple: Aplicación en la predicción de variables naturales relacionadas con el crecimiento microalgal. *Tecnología en marcha*, 29, 33-45.
- Castañeda, A. y Cañizares, J. (2018). Huella hídrica de la papa en Colombia. *Revista de Ciencias Ambientales*, 52(2), 45-59. <https://doi.org/10.21830/rca.52.2.432>.
- Castañeda, M. B. (2010). *Procesamiento de datos y análisis estadísticos utilizando SPSS: Un libro práctico para investigadores y administradores educativos*. Edipucrs.
- Cedeño Plaza, C. R. (2020). *PIB enfoque de la producción en el Ecuador: Análisis econométrico desde el modelo de regresión logarítmico, período 2007-2017*.
- Chavarría-Solera, F., Gamboa-Venegas, R., Rodríguez-Flores, J., Chinchilla-González, D., Herrera-Araya, A. y Herra-Solís, A. C. (2020). Medición de la HH azul de la Universidad Nacional en Costa Rica, del 2012 al 2016. *Uniciencia*, 34(1), 189–203. <https://doi.org/10.15359/ru.34-1.11>
- Chirivella González, V. (2015). *Hipótesis en el modelo de regresión lineal por Mínimos Cuadrados Ordinarios*.
- Estrada, R., Cosme, R., Porras, T., Reynoso, A., Calderon, C., Arbizu, C. I. y Arone, G. J. (2023). Changes in Bulk and Rhizosphere Soil Microbial Diversity Communities of Native Quinoa Due to the Monocropping in the Peruvian Central Andes. *Microorganisms*, 11(8), 1926.
- Figueroa, B. y Rodríguez, L. (2020). Factores que afectan el rendimiento de los cultivos. *Revista de investigación agraria*, 15(2), 45-60.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations -FAO-. (2017). *The Future of Food and Agriculture: Trends and Challenges*.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations -FAO- (2013). HH: Conceptos y aplicaciones. Roma, Italia.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations -FAO-. (2011). *Water Footprint Assessment: Manual for Practitioners*.
- Gallego, C., Salazar, H. y Gallego, R. (2011). Análisis de las metodologías usadas en la detección de posiciones dominantes en el mercado de electricidad mayorista colombiano. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (59), 122-132.

- García, A., López, J. y Martínez, R. (2020). Water Competition in Agriculture: A Critical Review. *Journal of Water Policy*, 22(2), 123-135.
- Garrido, A., Llamas, M. R., Varela-Ortega, C., Novo, P., Rodríguez-Casado, R. y Aldaya, M. M. (2010). *Water Footprint and Virtual Water Trade in Spain: Policy Implications*, vol. 35. Springer Science & Business Media.
- Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., Taboada, C., Miranda, R., Cusicanqui, J., Vaacher, J. (2009). Modelling the Potential for Closing Quinoa Yield Gaps under Varying Water Availability in the Bolivian Altiplano. *Agricultural Water Management*, 96, 1652-1658.
- Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., Vacher, J., Mamani, R., Mendoza, J., y Taboada, C. (2008). Introducing Deficit Irrigation to Stabilize Yields of Quinoa (*Chenopodium Quinoa Willd.*). *European Journal of Agronomy*, 28(3), 427-436.
- González, J. García, A., Martínez, R., y López, M. (2019). Conservation Agriculture and its Impact on Water Retention in Soils. *Agricultural Systems*, 176, 102-110.
- González Robaina, F., Herrera Puebla, J., López Seijas, T. y Cid Lazo, G. (2014). Productividad del agua en algunos cultivos agrícolas en Cuba. *Revista Ciencias técnicas agropecuarias*, 23(4), 21-27.
- Grafton, R. Q. Landry, C. E., & W. H. (2018). Water Management in Agriculture: The Role of Irrigation and Water Pricing. *Agricultural Water Management*, 210, 1-10.
- Grassini, P., Yang, H., Irmak, S., Thorburn, J., Burr, C. y Cassman, K. G. (2011). High-Yield Irrigated Maize in the Western US Corn Belt. II: Irrigation Management and Crop Water Productivity. *Field Crops Research*, 120(1), 133-141.
- Gutiérrez, J. R. y Rojas, E. (2017). Huella hídrica del maíz en Colombia: Un análisis regional. *Revista de agricultura y ambiente*, 12(1), 25-34. <https://doi.org/10.21830/raa.12.1.123>
- Hoekstra, A. Y., & Hung, P. Q. (2005). Globalization of water resources: The role of the water footprint. In R. A. S. de Almeida & E. M. de Oliveira (Eds.), *Water Resources Management* (pp. 1-20). Springer.
- Hoekstra, A. Y., Mekonnen, M. M., & Chapagain, A. K. (2011). Global assessment of the water footprint of farm animal products. In A. Y. Hoekstra (Ed.), *The water footprint assessment manual: Setting the global standard* (pp. 1-193). Earthscan.
- Hoekstra, A. Y. (2017). Water Footprint Assessment: Advances and Future Directions. *Water Resources Management*, 31(1), 1-11.
- Hoekstra, A. Y. y Mekonnen, M. M. (2012). The Water Footprint of the Consumer. *Water Resources Research*, 48(7). <https://doi.org/10.1029/2011WR011655>

- Hoekstra, A. Y. y Chapagain, A. K. (2008). *Globalización del agua: Compartir los recursos de agua dulce del planeta*. Ediciones Akal, España.
- Holland, P. W. y Welsch, R. E. (1977). Robust Regression Using Iteratively Reweighted Least-Squares. *Communications in Statistics: Theory and Methods*, 6(9), 813-827.
- Ilbay-Yupa, M., Ilbay, F., Zubieta, R., García-Mora, M. y Chasi, P. (2021). Impacts of Climate Change on the Precipitation and Streamflow Regimes in Equatorial Regions: Guayas River Basin. *Water*, 13(21), 31-38.
- Intergovernmental Panel on Climate Change -IPCC-. (2019). *Climate Change and Land*.
- Jacobsen, S. E. (2012). La producción de quinua en el sur de Bolivia. Del éxito económico al desastre ambiental. *Leisa, Revista de agroecología*, 28(4).
- Kayatz, B., Baroni, G., Hillier, J., Lüdtke, S., Heathcote, R., Malin, D., y Wattenbach, M. (2019). Cool Farm Tool Water: A Global On-Line Tool to Assess Water Use in Crop Production. *Journal of Cleaner Production*, 207, 1163-1179.
- Keller, J. y Bliesner, R. (1990). *Sprinkler and Trickle Irrigation*. Van Nostrand Reinhold.
- Koenker, R. y Bassett, G. (1978). Regression Quantiles. *Econometrica*, 46(1), 33-50.
- Liuhto, M., Mercado, G. yAruquipa, R. (2016). Climate Change, Quinoa Production and Farmers Adaptation Capacity in the Bolivian Altiplan. *Revista de investigación e innovación agropecuaria y de recursos naturales*, 3, 166.
- Lovarelli, D., Bacenetti, J. y Fiala, M. (2016). Water Footprint of Crop Productions: A Review. *Science of the Total Environment*, 548-549; 236-251.
- Mason, S. Amani, H., & Gibbons, J. (2020). Sustainable Diets and their Impact on Water Resources. *Food Security*, 12(3), 675-688.
- Mastrorillo, M., de Fraiture, C., & Wichelns. (2016). The Role of Education in Sustainable Water Management. *Water Resources Management*, 30(12), 4417-4430.
- McCullagh, P. y Nelder, J. A. (1989). *Generalized Linear Models* (2nd ed.). Chapman & Hall.
- Mejía, M., Fresán, U., Harwatt, H., Oda, K., Uriegas-Mejia, G. y Sabaté, J. (2020). Life Cycle Assessment of the Production of a Large Variety of Meat Analogs by Three Diverse Factories. *Journal of Hunger & Environmental Nutrition*.
- Mekonnen, M. M. y Hoekstra, A. Y. (2016). Global and Local Water Footprint of Food Products: A Global Assessment. *Water Resources Research*, 52(8), 6415-6430.

- Mekonnen, M. M. y Hoekstra, A. Y. (2011a). The Green, Blue and Grey Water Footprint of Crops and Derived Crop Products. *Value of Water Research Report Series* No. 47. UNESCO-IHE.
- Mekonnen, M. M. y Hoekstra, A. Y. (2011b). The Green, Blue and Grey Water Footprint of Crops and Derived Crop Products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5), 1577-1600.
- Mohammadi, K., Heidari, G., Khalesro, S. y Sohrabi, Y. (2011). Soil Management, Microorganisms and Organic Matter Interactions: A review. *African Journal of Biotechnology*, 10(86), 19840.
- Paredes, M. (2016). Análisis de la huella hídrica de la quinua en la región andina. *Revista de ciencias agrarias*, 43(2), 123-135.
- Pérez, M. A. García, J., & López, R. (2019). Water Scarcity and Agricultural Productivity in the Mediterranean Region. *Agricultural Systems*, 168, 90-99.
- Razzaghi, F., Ahmadi, S. H., Jacobsen, S. E., Jensen, C. R. y Andersen, M. N. (2012). Effects of Salinity and Soil-Drying on Radiation use Efficiency, Water Productivity and Yield of Quinoa (*Chenopodium Quinoa* Willd.). *Journal of Agronomy and Crop Science*, 198(3), 173-184.
- Renderos, R. (2016). Huella hídrica del cultivo de caña de azúcar. *Research Gate*, (julio), 8-8.
- Roncagliolo, A. C. y Pierrend, D. D. L. T. U. 2017. *Competitividad y sostenibilidad de la gestión del agua en la costa agroexportadora peruana*.
- Rousseeuw, P. J. y Leroy, A. M. (1987). *Robust Regression and Outlier Detection*. John Wiley & Sons.
- Rosa, L. Vázquez, S., & Zorrilla, P. (2021). Advances in Water Footprint Assessment in Agriculture. *Agricultural Water Management*, 243, 106-400.
- Rubinovich, L., Dagan, R., Lugasi, Y., Galili, S. y Asher, A. (2023). The Potential of Young Vegetative Quinoa (*Chenopodium Quinoa*) As a New Sustainable Protein-Rich Winter Leafy Crop Under Mediterranean Climate. *Plos one*, 18(12).
- Sandoval Mena, E. L. (2017). *Estimación de la HH en los cultivos de quinua (Chenopodium quinoa) de los cantones Cayambe y Riobamba ubicados en los Andes Ecuatorianos*. Tesis de licenciatura. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/14109>
- Schneir, E. R. (2015). La HH como un indicador de sustentabilidad y su aplicación en el Perú. *Saber y hacer*, 2(1), 34-47.

- Schyns, J. F., Hoekstra, A. Y. y Booij, M. J. (2015). Review and Classification of Indicators of Green Water Availability and Scarcity. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(11), 4581-4608.
- Schwarz, G., Kauffman, S., y Burch, M. (2021). International Cooperation in Water Resource Management: Challenges and Opportunities. *Water International*, 46(1), 1-15.
- Tarafdar, J. C. (2022). Role of Soil Biology on Soil Health for Sustainable Agricultural Production. En *Structure and functions of pedosphere*, 67-81. Singapur: Springer Nature Singapore.
- Tovar, J. y García, F. (2019). Estimación de la huella hídrica de la cebada en el altiplano andino. *Agronomía mesoamericana*, 30(1), 123-135. <https://doi.org/10.15517/am.v30i1.19242>
- Vizcarra Mendoza, A. V. (2022). *Determinación de la HH de los productos agrícolas de arroz y papa en la comisión de regantes del distrito de Uraca, provincia de Castilla, departamento Arequipa*
- Wooldridge, J. M. (2016). *Introductory Econometrics: A Modern Approach* (6ta ed.). Cengage Learning.
- Zhang, W., Wang, Y., y Liu, Z. (2020). Sustainable Water Management in Agriculture: An Integrated Approach. *Water Resources Research*, 56(4).
- Zhang, Y., Zhang, Y., y Liu, J. (2018). Irrigation Efficiency and its Impact on the Water Footprint of Crops. *Agricultural Water Management*, 202, 1-10.

Anexo 1. Perfil: HHV, rendimiento y productividad del agua-rendimiento

Panel A	$y = -579,4 \ln(x) + 1555,1$	0,51	0,36	1,53	2147,04	1308,69	-1,12	-0,84
Panel B	$y = -735,3 \ln(x) + 2326,2$	0,85	2,26	3,23	1726,66	1464,07	-0,35	-0,58
Capura	$y = -771,6 \ln(x) + 1583,3$	0,82	0,12	6,4	3219,29	150,98	-0,018	-20,71
Bella Vista A	$y = -377,5 \ln(x) + 1678,6$	0,85	0,48	1,12	1955,67	1635,82	-0,12	-0,34
Bella Vista B	$y = -965,4 \ln(x) + 2567,9$	0,88	2,49	3,23	2567,9	1435,98	-1,48	-3,44
Vintuta A	$y = -440,1 \ln(x) + 1440,8$	0,48	0,36	1,53	1890,43	1253,64	-0,104	-0,667
Vintuta B	$y = -134,7 \ln(x) + 1705,8$	0,89	2,26	3,23	1595,97	1547,87	-0,07	-0,1

Elasticidad entre la productividad del agua y el rendimiento

Comunidad	Perfil	R ²	Rend. máx. (x1)	Rend. mín. (x2)	PordH2O max (y1)	ProdH2O min (y2)	Elasticidad x1	Elasticidad x2
Panel A	$y = 0,0853 \ln(x) + 0,164$	0,66	0,36	1,12	0,076	0,174	6,05	8,21
Panel B	$y = 0,654 \ln(x) + 0,046$	0,99	1,08	1,51	0,004	0,22	135,63	3,48
Panel C	$y = 0,1512 \ln(x) + 0,056$	0,79	1,53	3,23	0,12	0,23	0,82	0,91
Capura	$y = 0,0698 \ln(x) + 0,1527$	0,75	0,36	1,44	0,08	0,18	0,41	0,726
Bella Vista A	$y = 0,0663 \ln(x) + 0,1648$	0,79	0,48	1,12	0,116	0,172	0,21	0,338
Bella Vista B	$y = 0,2592 \ln(x) - 0,057$	0,57	2,49	3,23	0,179	0,247	1,28	1,2
Vintuta A	$y = 0,136 \ln(x) - 0,1709$	0,77	0,36	1,51	0,031	0,227	0,93	1,1
Vintuta B	$y = 0,1964 \ln(x) + 0,0078$	0,96	1,08	3,23	0,023	0,238	4696.00	13542.00

Fuente: Elaboración propia con base en estimaciones hechas con *Cool Farm Tool*.