

Rendimiento futuro de la quinua bajo escenarios de cambio climático en Puno: evidencia y recomendaciones para la adaptación agrícola

Future yield of quinoa under climate change scenarios in Puno: evidence and recommendations for agricultural adaptation

Wilfredo Yzarra-Tito^{1*}, Sthefany Tisnado¹, Delia Acuña¹,
Bernardino Tapia²

1 Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (Senamhi). Lima, Perú.
2 Facultad de Ingeniería, Universidad Peruana Unión. Juliaca, Perú.



Citar como: Yzarra-Tito, W. *et al.* (2026). «Rendimiento futuro de la quinua bajo escenarios de cambio climático en Puno: evidencia y recomendaciones para la adaptación agrícola». *South Sustainability*, 7(1), e148.
DOI: 10.21142/SS-0701-2026-e148

Recibido: 27/9/2025
Revisado por pares
Aceptado: 15/5/2026



© Los autores, 2026. Publicado por la Universidad Científica del Sur (Lima, Perú)

*E-mail de correspondencia:
wyzarra@senamhi.gob.pe

Editor asociado:
Juan Carlos Francia Quiroz

RESUMEN

La quinua es un cultivo estratégico para la seguridad alimentaria y economía rural de Puno, pero su producción enfrenta alta vulnerabilidad frente al aumento de la temperatura, la variabilidad de las precipitaciones y la limitada disponibilidad hídrica. Con base en la calibración y validación local del modelo AquaCrop para las variedades blanca de Juli, Pasankalla y Salcedo INIA, se proyectaron cambios de rendimiento en Taraco y Juliaca bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. Los resultados proyectan mayores reducciones en secano y bajo escenarios de mayor emisión, mientras que blanca de Juli muestra mejor desempeño relativo, lo que respalda la necesidad de políticas focalizadas en riego tecnificado, gestión del riesgo agroclimático y sistemas de monitoreo para fortalecer la adaptación de la quinua en el Altiplano peruano.

Palabras clave: quinua, cambio climático, AquaCrop, escenarios RCP, adaptación climática

ABSTRACT

Quinoa is a strategic crop for the food security and rural economy of Puno, but its production is highly vulnerable to rising temperatures, precipitation variability and limited water availability. Based on the calibration and validation of the local AquaCrop model for the *Blanca de Juli*, *Pasankalla* and *Salcedo INIA* varieties, yield changes were projected for Taraco and Juliaca under the RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios. The results project greater yield reductions under rainfed conditions and under higher-emission scenarios, while *Blanca de Juli* displays better relative performance. These results support the need for policies focused on technified irrigation, agro-climatic risk management, and monitoring systems to strengthen quinoa adaptation on the Peruvian high plains known as the *altiplano*.

Keywords: quinoa, climate change, AquaCrop, RCP scenarios, climatic adaptation



Introducción

La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) debe ser tratada como una prioridad de política pública en Puno no solo por su aporte a la seguridad alimentaria, su valor nutricional y su importancia para la agricultura familiar altoandina (Villacrés *et al.*, 2022; Calizaya *et al.*, 2023), sino también porque su sostenibilidad productiva enfrenta riesgos crecientes en un contexto de cambio climático. Aunque es un cultivo destacado por su tolerancia a la sequía, la salinidad y los suelos pobres, el cambio climático está empezando a traducir ese límite fisiológico en caídas de rendimiento, más riesgos productivos y, por tanto, mayor fragilidad económica para los productores (Abbas *et al.*, 2024). La evidencia reciente indica que la combinación de sequía, salinidad y aumento de temperatura puede reducir el rendimiento y ampliar la incertidumbre productiva, aun en cultivos considerados relativamente resilientes, cuando estos son sometidos a estrés múltiple o prolongado (Sun *et al.*, 2025). En esa línea, las proyecciones climáticas que anticipan mayor variabilidad de las precipitaciones, incremento térmico y eventos extremos más severos hacia fines de siglo, especialmente bajo escenarios de altas emisiones, refuerzan la necesidad de mirar la quinua como un cultivo adaptado y, asimismo, como un sistema económico y territorial vulnerable, cuya caída de rendimiento puede comprometer ingresos rurales, competitividad regional y estabilidad de la oferta alimentaria (García-López *et al.*, 2025). Por ello, el interés público en la quinua radica en que su resiliencia natural tiene límites, y que superar esos umbrales puede traducirse en pérdidas productivas y mayor fragilidad socioeconómica en zonas altoandinas ya expuestas al riesgo climático.

Esta importancia se refuerza por la disponibilidad de recursos genéticos promisorios identificados en la zona de transición andino-amazónica, con alto potencial de rendimiento, madurez temprana o intermedia y menor severidad al mildiú, lo que amplía las posibilidades de desarrollar variedades más resilientes y de sostener la conservación de su germoplasma (Baldera-Champoñan *et al.*, 2025). Asimismo, aunque la quinua presenta tolerancia a diversos estreses ambientales, aún muestra bajos niveles de tolerancia al calor, mientras que el conocimiento sobre otros factores críticos, como frío, metales pesados y radiación UV-B, sigue siendo limitado (Grenfell-Shaw y Tester, 2021). No obstante, esta plasticidad parece estar parcialmente controlada por factores genéticos, y nuevas herramientas moleculares han abierto oportunidades relevantes para fortalecer el mejoramiento genético y comprender mejor los mecanismos de tolerancia al estrés abiótico (Hinojosa *et al.*, 2018).

En Puno, el principal desafío no es solo reconocer la capacidad adaptativa de la quinua, sino identificar con precisión su vulnerabilidad frente al cambio climático. La producción se desarrolla mayoritariamente en

condiciones de secano, con escasa infraestructura de riego y alta dependencia de la precipitación estacional, lo que incrementa la exposición del cultivo a sequías, heladas, granizadas y alteraciones en la distribución de lluvias durante etapas fenológicas críticas (Yzarra *et al.*, 2025). La evidencia reciente muestra que el incremento térmico, la mayor variabilidad interanual de las precipitaciones y la irregularidad intraestacional de las lluvias están comprometiendo la estabilidad de los rendimientos y, con ello, la sostenibilidad productiva y territorial de la agricultura familiar andina (Lozano *et al.*, 2023).

Frente a este escenario, resulta prioritario contar con herramientas que permitan anticipar impactos y orientar decisiones de adaptación. Las proyecciones de modelos de alta precisión (como el AquaCrop) indican que, sin intervenciones, el rendimiento de la quinua en Puno podría reducirse entre 30 % y 50 % hacia 2050, según el sistema de manejo (Yzarra, 2023). En ese marco, AquaCrop constituye una herramienta útil para planificar la gestión del agua y respaldar estrategias de adaptación frente a escenarios climáticos adversos (Alvar-Beltrán *et al.*, 2021).

Enfoque y discusión

La evidencia disponible muestra que, pese a la tolerancia de la quinua a condiciones adversas, aún persisten vacíos de información sobre su respuesta bajo escenarios específicos de cambio climático, lo que limita el diseño de políticas de adaptación más precisas y territorialmente focalizadas (Lozano *et al.*, 2023). En este contexto, AquaCrop constituye una herramienta útil para evaluar escenarios futuros y orientar decisiones públicas en territorios agrícolas vulnerables (Flores-Márquez *et al.*, 2024; Puma-Cahua *et al.*, 2023). Sobre esta base, entre 2018 y 2021 se realizaron ensayos de campo en Taraco y Juliaca (Puno) con tres variedades de quinua de importancia regional (blanca de Juli, Salcedo INIA y Pasankalla) bajo diferentes fechas de siembra y condiciones de manejo (riego y secano), lo que permitió calibrar y validar el modelo AquaCrop mediante indicadores estadísticos de ajuste. Estos ensayos confirmaron la capacidad del modelo para representar de manera confiable la respuesta del cultivo frente a variaciones en la disponibilidad hídrica y el manejo agronómico (Yzarra, 2023). A partir de ello, se evaluaron los posibles impactos del cambio climático en la quinua utilizando los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, que representan trayectorias de emisión moderada y alta de gases de efecto invernadero. El uso de estos escenarios permite definir un rango plausible de variación futura del rendimiento, generar evidencia útil para la planificación y adaptación agrícola, y mantener comparabilidad con estudios desarrollados en otras regiones a partir de información climática proveniente de los modelos globales del CMIP5 (Llacza *et al.*, 2021). Siguiendo el enfoque de Yzarra (2023), se analizaron tres horizontes temporales futuros: cercano (2010–2040), medio (2040–

2070) y lejano (2070–2090), utilizando como referencia el año base 1995 (1980–2010).

Sobre esta base, las proyecciones muestran que el cambio climático afectará de manera diferenciada a los territorios y variedades de quinua evaluados en Puno, principalmente por sus efectos sobre la disponibilidad hídrica y el desempeño productivo. Estos impactos no solo comprometen el rendimiento, sino también la rentabilidad y competitividad de la oferta regional, especialmente en las variedades más sensibles (TDPS, 2021). En este contexto, blanca de Juli destacó por su mayor potencial productivo, particularmente en siembras tardías y bajo riego, con rendimientos proyectados de hasta 3.2 t ha⁻¹ en Taraco y 3.0 t ha⁻¹ en Juliaca, valores muy superiores al rendimiento promedio actual reportado para Puno, lo que evidencia su potencial como opción de adaptación en zonas altoandinas vulnerables (Yzarra, 2023). En contraste, Pasankalla mostró mayor vulnerabilidad frente al estrés hídrico, y la compensación parcial observada en algunos casos bajo RCP4.5 no debe interpretarse como un beneficio, ya que resulta insuficiente frente al efecto combinado del incremento de temperatura y la reducción de la disponibilidad de agua (Lozano *et al.*, 2023). Este hallazgo reviste especial importancia debido a que Pasankalla, por su mayor valor comercial y su posicionamiento en mercados especializados, presenta una vulnerabilidad que trasciende el ámbito productivo. En consecuencia, el cambio climático podría afectar el volumen de producción, al igual que la calidad y diversificación de la oferta regional, con implicancias

directas sobre la competitividad y los ingresos de los productores.

La compensación parcial observada en algunos casos bajo el escenario RCP4.5 no debe interpretarse como un beneficio del cambio climático ni como una señal para postergar medidas de adaptación. Si bien el aumento de CO₂ puede generar una respuesta fisiológica favorable en cultivos C3 como la quinua, este efecto es limitado y desaparece cuando se intensifican el calor y el déficit hídrico. En esa línea, el escenario RCP8.5 debe entenderse como una advertencia de lo que podría ocurrir si no se toman medidas oportunas, ya que bajo condiciones de mayores emisiones los efectos negativos de la temperatura y la menor disponibilidad de agua superan cualquier ganancia transitoria asociada al CO₂, lo que compromete el rendimiento y la estabilidad productiva del cultivo (Alvar-Beltrán *et al.*, 2021; Lozano *et al.*, 2023).

En este marco, el estudio sugiere que las medidas de adaptación no deben ser uniformes entre territorios. En Juliaca, la prioridad debe centrarse en reducir la vulnerabilidad del secano mediante mejor gestión del agua, ajuste de fechas de siembra y promoción de variedades resilientes, mientras que en Taraco se requiere fortalecer la estabilidad productiva y optimizar el manejo agronómico. En conjunto, los hallazgos respaldan la necesidad de una respuesta institucional articulada para fortalecer la adaptación agrícola mediante gestión del agua, mejoramiento varietal e intervenciones focalizadas, a fin de reducir la vulnerabilidad de la quinua frente al cambio climático (Yzarra, 2023).

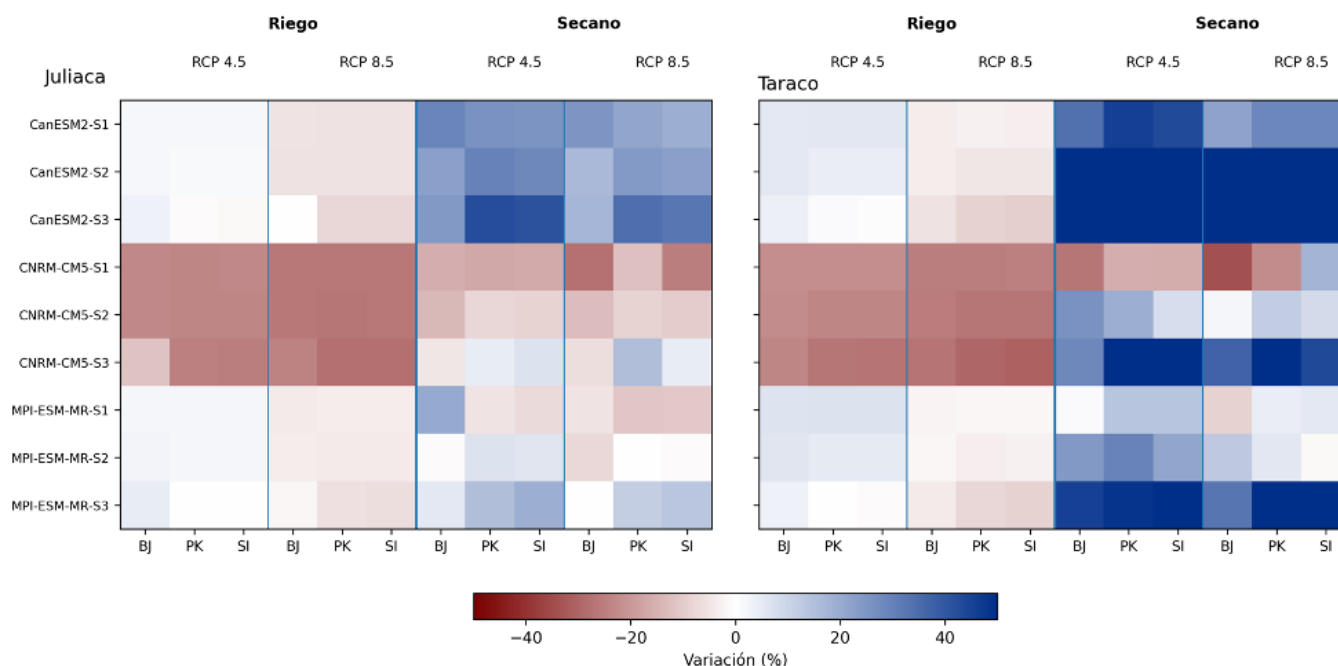


Figura 1. Cambios proyectados en el rendimiento de la quinua en Juliaca y Taraco para tres variedades de quinua (BJ): blanca de Juli, PK: Pasankalla, SI: Salcedo INIA), sistema de manejo (riego y secano) según los modelos climáticos globales (CanESM2; MPI-ESM-MR; CNRM-CM5) para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5.

Nota. Adaptado de Yzarra (2023).



Conclusiones y recomendaciones

La quinua en Puno es estratégica para la seguridad alimentaria y la economía rural, pero su producción presenta alta vulnerabilidad frente a la variabilidad térmica e hídrica. Las proyecciones muestran mayores reducciones de rendimiento en seco y bajo escenarios de mayores emisiones, lo que exige priorizar medidas de adaptación en los territorios más expuestos.

Se recomienda impulsar un plan específico de riego tecnificado para granos andinos, con intervenciones focalizadas en captación, almacenamiento, distribución y uso eficiente del agua. Esta medida permitiría orientar mejor la inversión pública y reducir la vulnerabilidad de los sistemas de producción de quinua.

Asimismo, se propone crear un fondo de semillas resilientes para quinua, que priorice variedades con mejor respuesta al estrés hídrico y térmico, como blanca de Juli y Salcedo INIA, especialmente en zonas críticas como Juliaca.

También se recomienda diseñar un seguro agrario para quinua basado en índices climáticos, que proteja a los productores ante pérdidas asociadas a temperatura y déficit hídrico, y fortalezca la gestión del riesgo en la agricultura altoandina.

Finalmente, se plantea implementar un sistema de alerta temprana, monitoreo y evaluación continua, articulado en un Programa Nacional de Adaptación de la Quinua al Cambio Climático, con participación del

Gobierno Regional, Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (Midagri), Ministerio del Ambiente (Minam) y organizaciones de productores, para fortalecer la gobernanza y la sostenibilidad de las acciones de adaptación.

Contribución de los autores

Todos los autores contribuyeron en las etapas de elaboración del manuscrito.

Wilfredo Yzarra-Tito: conceptualización, investigación, metodología, administración de proyectos, supervisión, validación, escritura del borrador. Sthefany Tisnado: metodología, investigación, escritura, revisión y edición. Delia Acuña: <https://software>, metodología, investigación, escritura, revisión y edición. Bernardino Tapia: metodología, investigación, escritura, revisión y edición.

Fuente de financiamiento

Ninguno.

Potenciales conflictos de interés

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de interés.

Declaración de uso de IA

Los autores declaran que no se ha usado inteligencia artificial en ningún proceso de la elaboración de este manuscrito.

Referencias bibliográficas

- Abbas, G., Murtaza, B., Amjad, M., Saqib, M., Akram, M., Naeem, M. A., Shah, G. M., Raza, M., Ali, Q. y Ahmed, K. (2024). «Heat stress resulting from late sowing impairs grain yield and quality of quinoa genotypes facing drought and salt stress under field conditions». *Journal of Agronomy and Crop Science*, 210(4), e12717. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/jac.12717>
- Alvar-Beltrán, J., Gobin, A., Orlandini, S., Dao, A. y Dalla Marta, A. (2021). «Climate resilience of irrigated quinoa in semi-arid West Africa». *Climate Research*, 84, pp. 97-111. Disponible en: <https://doi.org/10.3354/cr01660>
- Baldera-Chapoñan, V. H., De la Cruz, G., Oliva-Cruz, S. y Lozano-Isla, F. (2025). «Agromorphological Characterization of Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) Under Andean-Amazonian Region of Peru». *Plants*, 14(23), 3689. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/plants14233689>
- Calizaya, F., Gómez, L., Zegarra, J., Pozo, M., Mindani, C., Caira, C. y Calizaya, E. (2023). «Unveiling ancestral sustainability: A comprehensive study of economic, environmental, and social factors in potato and quinoa cultivation in the highland Aynokas of Puno, Peru». *Sustainability*, 15(17), 13163. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su151713163>
- Flores-Marquez, R., Vera-Vilchez, J., Verástegui-Martínez, P., Lastra, S. y Solórzano-Acosta, R. (2024). «An evaluation of dryland ulluco cultivation yields in the face of climate change scenarios in the Central Andes of Peru by using the Aquacrop model». *Sustainability*, 16(13), 5428. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su16135428>
- García-Lopez, Y., Ramos-Fernandez, L. y Gomez-Pando, L. (2025). «Climate Change Projections for the Central Peruvian Coast (2006–2100) Using CMIP5 Models: Agricultural Impacts and Implications for the Growth of *Chenopodium quinoa* Willd in Arid Zones». [Preprint]. Disponible en: <https://doi.org/10.31223/X5K45Z>
- Grenfell-Shaw, L. y Tester, M. (2021). «Abiotic Stress Tolerance in Quinoa». En S. M. Schmöckel (eds.), *The Quinoa Genome. Compendium of Plant Genomes* (pp. 139-167). Cham: Springer. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-3-030-65237-1_9
- Hinojosa, L., González, J. A., Barrios-Masias, F. H., Fuentes, F. y Murphy, K. M. (2018). «Quinoa abiotic stress responses: A review». *Plants*, 7(4), 106. <https://doi.org/10.3390/plants7040106>
- Llacza, A., Acuña, D., Jácome, G., De la Cruz, G., Paredes, J., Bruno, J., Alvarez, E., Flores, W., Urdanivia, F. y Sulca, B. (2021). *Escenarios climáticos al 2050 en el Perú: Cambios en el clima promedio*. Lima: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12542/1470>
- Lozano, A., Povis Condori, B. L., Zaravia Povis, A. y Ccoyllar Quintanilla, K. (2023). «*Chenopodium quinoa* Willd: Un cultivo resiliente al cambio climático en regiones altoandinas del Perú». *South Sustainability*, 4(2), e079. Disponible en: <https://doi.org/10.21142/SS-0402-2023-e079>
- Proyecto Gestión Integrada de los Recursos Hídricos en el Sistema TDPS. (2021). «Escenarios climáticos en el sistema hídrico del lago Titicaca, río Desaguadero, lago Poopó y salar de Coipasa». Disponible en: <https://girh-tdps.com/cambio-climatico/>
- Puma-Cahua, J., Belizario, G., Laqui, W., Alfaro, R., Huaquisto, E. y Calizaya, E. (2023). «Evaluating the Yields of the Rainfed Potato Crop under Climate Change Scenarios Using the AquaCrop Model in the Peruvian Altiplano». *Sustainability*, 16(1), 71. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su16010071>
- Sun, H., Khan, W. U. D., Tanveer, M., Ijaz, U., Lu, Z. y Shabala, S. (2025). «Can quinoa (*Chenopodium quinoa*) replace traditional cereals under current climate scenarios?». *Frontiers in Plant Science*, 16, 1636565. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1636565>
- Villacrés, E., Quelal, M., Galarza, S., Iza, D. y Silva, E. (2022). «Nutritional value and bioactive compounds of leaves and grains from quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.)». *Plants*, 11(2), 213. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/plants11020213>
- Yzarra Tito, W. J. (2023). *Simulación del rendimiento de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) con el modelo Aquacrop, bajo escenarios de cambio climático en Puno, Perú*. [Tesis de maestría en Meteorología Aplicada, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12996/5795>
- Yzarra-Tito, W. J., Machaca, O., Peña, A., Zolezzi, A., Ancori, C., Ramos, H., Flores, S. y Evangelista, B. A. (2025). «Zonificación agrícola de riesgos climáticos para el cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) en el Altiplano Peruano». *Scientia Agropecuaria*, 17(1), pp. 7-20. Disponible en: <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2026.001>

