ISSN: 2306-8582
eISSN: 2313-2957
DOI: 10.18271/ria.2026.713

Impacto del agua del río Cañete en los parámetros germinativos de semillas de lechuga (*Lactuca sativa* L.)

Impact of Cañete River Water on Germination Parameters of Lettuce Seeds (*Lactuca sativa* L.)

Juan Saldivar-Villarroel[1,*], Edwin Guido Vicente-Paucar[1], Raymunda Verónica Cruz-Martinez[1], Luis Felipe Bendezu-Diaz[2] Jorge Luis Magallanes-Magallanes[2] y Mario Humberto Taípe Cancho[1]

Resumen

La calidad del agua es un factor determinante en la germinación y en la evaluación de efectos ecotóxicos en cultivos agrícolas. Este estudio evaluó el impacto del agua de la cuenca baja del río Cañete sobre la germinación y el crecimiento inicial de semillas de lechuga (*Lactuca sativa* L.) mediante bioensayos estandarizados como indicador de calidad ambiental. Se analizaron parámetros fisicoquímicos (temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, pH, nitrato, amonio y fósforo total) en cinco puntos de muestreo: Puente Catapalla, Puente San Jerónimo, Puente Socci, Puente Clarita y Boca de Río. Se aplicó un diseño de Bloques Completamente al Azar (DBCA) con seis tratamientos y cinco repeticiones. Mediante diluciones seriadas (100% al 6,25%) se evaluaron el porcentaje de germinación, elongación del hipocótilo, crecimiento radicular e índice de germinación como indicador integrado de toxicidad. Los resultados mostraron que el agua de Puente Clarita registró el menor índice de germinación (62,33%) y crecimiento radicular (36,77%), con diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) respecto al control, evidenciando fitotoxicidad leve. Si bien los parámetros fisicoquímicos se mantuvieron dentro de los límites de la normativa ambiental peruana (MINAM), se observó un impacto negativo en el desarrollo inicial de Lactuca sativa L. Se concluye que el bioensayo de germinación es una herramienta sensible para detectar efectos subletales no identificados por análisis fisicoquímicos, contribuyendo al monitoreo ambiental y la gestión sostenible del recurso hídrico en la cuenca baja del río Cañete.

Palabras clave: calidad del agua, conductividad eléctrica, germinación, semillas, parámetros fisicoquímicos, toxicidad.

Abstract

Water quality is a determining factor in germination and in the assessment of ecotoxic effects on agricultural crops. This study evaluated the impact of water from the lower basin of the Cañete River on the germination and initial growth of lettuce seeds (*Lactuca sativa* L.) using standardized bioassays as an environmental quality indicator. Physicochemical parameters (temperature, electrical conductivity, dissolved oxygen, pH, nitrate, ammonium, and total phosphorus) were analyzed at five sampling points: Puente Catapalla, Puente San Jerónimo, Puente Socci, Puente Clarita, and Boca de Río. A Randomized Complete Block Design (RCBD) was applied with six treatments and five replications. Through serial dilutions (100% to 6.25%), germination percentage, hypocotyl elongation, root growth, and germination index were evaluated as an integrated toxicity indicator. Results showed that water from Puente Clarita recorded the lowest germination index (62.33%) and root growth (36.77%), with statistically significant differences ($p < 0.05$) compared to the control, evidencing mild phytotoxicity. Although physicochemical parameters remained within the limits established by Peruvian environmental regulations (MINAM), a negative impact on the initial development of Lactuca sativa L. was observed. It is concluded that the germination bioassay is a sensitive tool for detecting sublethal effects not identified by physicochemical analysis, contributing to environmental monitoring and sustainable water resource management in the lower basin of the Cañete River.

Keywords: Water quality, electrical conductivity, germination, seeds, physicochemical parameters, toxicity.

Recibido: 03/05/2025
Aceptado: 02/03/2026
Publicado: 01/04/2026

Sección: Artículo Original

***Autor correspondiente:** jsaldivar@undc.edu.pe

Introducción

La lechuga (*Lactuca sativa* L.) es una de las hortalizas de hoja más cultivadas y comercializadas a nivel mundial debido a su rápido ciclo productivo, bajo requerimiento de insumos y alto valor nutricional (Lucas et al., 2023). Su relevancia económica aumentó notablemente en las últimas décadas, debido a la modificación de los hábitos alimenticios hacia opciones más saludables. Desde la perspectiva fisiológica, la especie evidenció una elevada sensibilidad a factores abióticos, especialmente a la calidad del agua de riego, la cual incidió de manera directa en procesos como la imbibición, la activación enzimática, la elongación de la raíz y el establecimiento inicial del cultivo. (Villalba & Filippone et al., 2023).

[1] Universidad Nacional de Cañete - UNDC, Jr, San Agustín N° 124.San Vicente de Cañete, Perú.

[2] Universidad Nacional San Luis Gonzaga de Ica - UNICA, Prolog. Ayabaca C-9 Urb. San José – Ica, Perú.

Como citar: Saldivar-Villarroel, J., Vicente-Paucar, E. G., Cruz-Martinez, R. V., Bendezu-Diaz, L. F., Magallanes-Magallanes, J. L., & Taípe Cancho, M. H. (2026). Impacto del agua del río Cañete en los parametros germinativos de semillas de lechuga (*Lactuca sativa* L.). *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research, 28*. e28713. https://doi.org/10.18271/ria.2026.713

Attibution 4.0 Internacional (CC BY 4.0) Share–Adapt

La germinación constituye una fase crítica del ciclo biológico vegetal, ya que determina la uniformidad y vigor del cultivo. Alteraciones en esta etapa pueden ser inducidas por variaciones en parámetros fisicoquímicos como conductividad eléctrica, pH, concentración de nutrientes o presencia de compuestos potencialmente tóxicos en el agua de riego (Oh et al., 2025a). En este contexto, los bioensayos con semillas se han consolidado como herramientas sensibles para evaluar efectos fitotóxicos subletales que no siempre son evidenciados mediante análisis fisicoquímicos convencionales. En particular, *Lactuca sativa* es ampliamente utilizada como organismo bioindicador debido a su rápida respuesta fisiológica frente a contaminantes ambientales (Wharton et al., 2025).

A nivel global, el deterioro de la calidad de los recursos hídricos superficiales se ha intensificado como consecuencia del crecimiento urbano, la expansión agrícola y la descarga de efluentes domésticos e industriales (Yu et al., 2024a). Entre los principales procesos asociados se encuentra la eutrofización, caracterizada por el enriquecimiento excesivo de nutrientes que favorece la proliferación de algas y altera la dinámica ecológica de los ecosistemas acuáticos (Zhang et al., 2025). Estas alteraciones no solo afectan la biodiversidad acuática, sino también la calidad del agua destinada al riego agrícola.

En América Latina y particularmente en el Perú, los ríos costeros enfrentan presiones antrópicas derivadas del crecimiento poblacional, la limitada infraestructura de tratamiento de aguas residuales y el uso intensivo del recurso hídrico en actividades agroindustriales (Yu et al., 2024a). Investigaciones recientes señalan que, aun cuando ciertos parámetros fisicoquímicos pueden encontrarse dentro de los límites establecidos por la normativa ambiental, pueden persistir efectos ecológicos acumulativos asociados a cargas contaminantes crónicas (Masteali et al., 2025a). Esta situación evidencia la necesidad de complementar los monitoreos convencionales con evaluaciones biológicas que permitan detectar impactos tempranos en organismos sensibles.

La cuenca del río Cañete, ubicada en la región Lima, constituye un sistema hidrográfico estratégico para la producción agrícola regional. Su cuenca baja concentra actividades agrícolas intensivas, asentamientos urbanos y descargas domésticas que podrían influir en la calidad del agua destinada al riego. No obstante, los estudios disponibles se han centrado principalmente en la caracterización fisicoquímica del recurso hídrico, siendo escasas las investigaciones que evalúan sus efectos biológicos en cultivos de importancia económica como la lechuga.

En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar el impacto del agua de la cuenca baja del río Cañete sobre la germinación y el crecimiento inicial de semillas de *Lactuca sativa* L., mediante la determinación de parámetros fisicoquímicos y la aplicación de bioensayos de germinación bajo un diseño experimental controlado. Se planteó como hipótesis que las variaciones en la calidad del agua entre estaciones de muestreo generan diferencias significativas en el índice de germinación y en el desarrollo radicular. Los resultados aportan evidencia científica para fortalecer el monitoreo ambiental y la gestión sostenible del recurso hídrico en sistemas agrícolas costeros del Perú.

Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio se desarrolló en la provincia de Cañete, Perú, dentro de la cuenca baja del río Cañete. Se seleccionaron cinco estaciones de muestreo representativas de diferentes niveles de intervención antrópica: Puente Catapalla (E1), Puente San Jerónimo (E2), Puente Socci (E3), Puente Clarita (E4) y Boca de Río (E5). Las coordenadas geográficas y altitud de cada estación fueron registradas mediante sistema de posicionamiento global (GPS) y se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1
Estaciones de muestreo y sus coordenadas geográficas de la cuenca baja del río Cañete

Nombre de la estación de muestreo	Estación de muestreo	Coordenada geográfica		Altitud (msnm)
		Latitud	Longitud	
Puente Catapaya (E1)	CT	12º 55’ 05.3328’’ S	76º 06’ 33.2771’’ W	554
Puente San Jerónimo (E2)	SJ	13º 00’ 19.4436’’ S	76º 10’ 05.4735’’ W	362
Puente Socci (E3)	SC	13º 01’ 23.9268’’ S	76º 11’ 37.9231’’ W	320
Puente Clarita (E4)	CL	13º 07’ 10.4340’’ S	76º 21’ 25.3799’’ W	70
Boca de Río (E5)	BR	13º 07’ 18.9984’’ S	76º 24’ 02.0229’’ W	11

La Tabla 1 presentó los cinco puntos de muestreo localizados en la cuenca del río Cañete, los cuales fueron georreferenciados utilizando un GPS GARMIN eTrex 10. La selección de estos puntos consideró su representatividad dentro de la principal área agrícola del valle de Cañete, así como su exposición a vertimientos de residuos domésticos. En cada uno de estos sitios se recolectaron muestras de agua con el propósito de cumplir con los objetivos planteados en la investigación. Dichas muestras fueron obtenidas en cinco zonas con distintas

influencias de la escorrentía de aguas superficiales a lo largo del río (Albuquerque et al., 2025).

Recolección de muestra de agua

Las muestras de agua superficial fueron recolectadas en recipientes de polietileno previamente esterilizados. Posteriormente, fueron transportadas en condiciones de refrigeración al laboratorio para su procesamiento y análisis. La selección de las estaciones se realizó considerando zonas con diferente grado de influencia agrícola y urbana dentro de la cuenca.

Ensayo de germinación

El bioensayo se llevó a cabo en el Laboratorio de Biología de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de Cañete. Se utilizaron semillas comerciales de lechuga (*Lactuca sativa* L.) previamente seleccionadas por uniformidad y viabilidad (Barzallo et al., 2025). Se prepararon diluciones del agua de cada estación en concentraciones de 100%, 50%, 25%, 12.5% y 6.25%, además de un tratamiento control con agua reconstituida. Las semillas fueron colocadas sobre papel filtro humedecido dentro de condiciones controladas de incubación a 25 ± 2 °C.

Diseño experimental

Se empleó un Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA) con seis tratamientos y cinco bloques. Este diseño estuvo conformado por cinco bloques, definidos en función de las características cuantitativas de las variables analizadas (Narjesi et al., 2025). Cada unidad experimental estuvo constituida por un conjunto homogéneo de semillas distribuidas aleatoriamente para minimizar sesgos experimentales. En total se evaluaron 3000 semillas en bioensayos preliminares y 750 semillas en el ensayo definitivo.

Variables evaluadas

Se evaluaron los siguientes parámetros germinativos:

- Índice de germinación (%).
- Longitud radicular (cm).
- Elongación del hipocótilo (cm).

Las mediciones se realizaron al finalizar el periodo experimental utilizando instrumentos calibrados.

Análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron procesados mediante el software IBM SPSS Statistics versión 18.0. Se realizaron análisis descriptivos, pruebas de normalidad (Shapiro–Wilk) y homogeneidad de varianzas (Levene). Posteriormente, se aplicó análisis de varianza (ANOVA) bajo el modelo DBCA, seguido de la prueba de comparaciones múltiples de Tukey con un nivel de significancia de $p < 0.05$.

Resultados y discusión

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis fisicoquímico del agua de la cuenca baja del río Cañete y su relación con las variables germinativas evaluadas en *Lactuca sativa* L.. El análisis estadístico permitió identificar diferencias significativas entre estaciones de muestreo, evidenciando variabilidad espacial en la calidad del recurso hídrico (Ortín et al., 2025).

Parámetros físicos

Para evaluar las diferencias entre los promedios de los parámetros físicos, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) bajo un nivel de significancia de 0,05. Los resultados mostraron que la temperatura ($p = 0,049$) y el oxígeno disuelto ($p = 0,003$) presentaron diferencias estadísticamente significativas entre estaciones ($p < 0,05$), mientras que el potencial de hidrógeno (pH) y la conductividad eléctrica no evidenciaron diferencias significativas ($p > 0,05$) (Masoumi et al., 2025).

Estos resultados, presentados en la Tabla 2, indican que, aunque ciertos parámetros básicos como pH y conductividad eléctrica se mantuvieron relativamente estables, variables asociadas a la dinámica ecológica del sistema acuático como temperatura y oxígeno disuelto mostraron variaciones relevantes. La temperatura influye directamente en la solubilidad del oxígeno y en la actividad metabólica de los organismos acuáticos, por lo que cambios en este parámetro pueden afectar indirectamente la calidad del agua para uso agrícola (Zhang et al., 2025).

Tabla 2

Análisis de varianza de los parámetros físicos del agua de la cuenca baja de río Cañete

Variable dependiente		Suma de cuadrados	GL	Media cuadrática	F	Sig.
Potencial de hidrogeno (pH)	Contraste	1.404	4	0.351	0.485	0.747
	Error	7.241	10	0.724		
Temperatura (°C)	Contraste	5.153	4	1.288	3.517	0.049
	Error	3.663	10	0.366		
Oxígeno disuelto (ppm OD)	Contraste	312.111	4	78.028	8.341	0.003
	Error	93.547	10	9.355		
Conductividad eléctrica–CE (µS/cm)	Contraste	10163.6	4	2540.9	0.807	0.548
	Error	31481.333	10	3148.133		

La Tabla 3 presenta los valores promedio de los parámetros físicos en las estaciones evaluadas. El pH osciló entre 7,38 (Puente Clarita) y 8,22 (Puente Catapalla), ubicándose dentro del rango ligeramente alcalino característico de ríos costeros influenciados por actividad agrícola. La conductividad eléctrica varió entre 432,67 y 492,67 µS/cm, lo que refleja diferencias en la concentración de sales disueltas. La temperatura fluctuó entre 17,13 °C y 18,70 °C, mientras que el oxígeno disuelto registró valores entre 5,21 y 6,29 mg/L. Si bien los valores registrados se encuentran dentro de los límites permisibles establecidos por la normativa ambiental peruana para agua destinada a riego agrícola, la variabilidad observada en el oxígeno disuelto sugiere diferencias en el grado de perturbación antrópica entre estaciones. Valores superiores de oxígeno disuelto en estaciones con menor presión urbana podrían indicar mejores condiciones ecológicas, mientras que concentraciones menores podrían asociarse a mayor carga orgánica y actividad microbiana (Yu et al., 2024c). Desde una perspectiva ecológica, el oxígeno disuelto constituye un indicador clave del estado trófico del sistema acuático. Reducciones en su concentración pueden estar relacionadas con procesos de eutrofización y descomposición de materia orgánica, fenómenos reportados en cuencas sometidas a presión agrícola y urbana (Masteali et al., 2025b). Aunque en el presente estudio los valores no alcanzaron niveles críticos, las diferencias estadísticas encontradas evidencian la necesidad de monitoreos continuos que integren indicadores biológicos.

Tabla 3

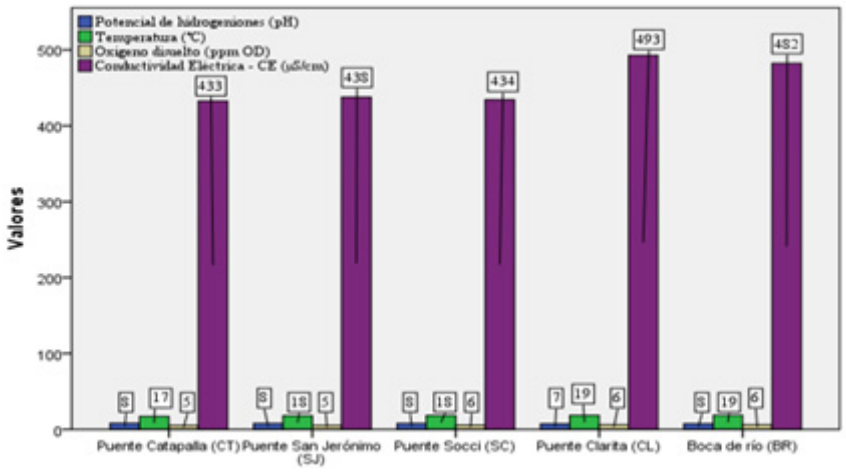
Promedio de los parámetros físicos del agua de las estaciones de muestreo

Parámetros físicos del agua	Estación de muestreo					
	Unidad de medida	Puente Catapalla (CT)	Puente San Jerónimo (SJ)	Puente Socci (SC)	Puente Clarita (CL)	Boca de Río (BR)
Potencial de hidrogeno	Unidad de pH	8.22	7.95	8.03	7.38	7.59
Conductividad eléctrica	µS/cm	432.67	437.67	434.3	492.7	482.3
Temperatura	Celsius	17.13	17.96	18.39	18.6	18.7
Oxígeno disuelto (ppm OD)	mg/L	5.21	5.21	5.54	6.21	6.29

En concordancia con estudios previos, la sola evaluación fisicoquímica puede no reflejar completamente los efectos subletales sobre organismos vegetales sensibles (Oh et al., 2025b). Por ello, la integración de bioensayos de germinación permitió complementar la caracterización del agua, proporcionando una aproximación más integral de su impacto potencial en el establecimiento inicial de cultivos. En conjunto, los resultados sugieren que, aunque los parámetros fisicoquímicos se mantienen dentro de rangos permisibles, existen variaciones espaciales que podrían influir en procesos biológicos sensibles como la germinación y el crecimiento radicular, lo que será discutido en la siguiente subsección.

Figura 1

Promedio de los parámetros físicos del agua de la cuenca baja de río Cañete, según estaciones de muestreo



La Figura 1 mostró el promedio de los parámetros físicos del agua en la cuenca baja del río Cañete en función de las estaciones de muestreo. Se identificó que la conductividad eléctrica registró los valores más elevados, con un rango de 433 µS/cm en Puente Catapalla a 493 µS/cm en Puente Clarita. La temperatura osciló entre 17 °C y 19 °C, mientras que el oxígeno disuelto fluctuó entre 5 mg/L y 6 mg/L. En cuanto al pH, los valores se mantuvieron entre 7 y 8, lo que reflejó condiciones neutras a ligeramente alcalinas.

Los resultados evidenciaron variaciones en las características fisicoquímicas del agua en función de la estación de muestreo. El análisis de la calidad física del agua indicó que, de los 19 parámetros evaluados, 16 estuvieron dentro de los límites aceptables establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS), mientras que los tres restantes no cumplieron con dicha normativa (Lencha & Babore, 2025). Estos hallazgos resaltaron la importancia de mejorar la evaluación de las propiedades físicas del agua para garantizar su calidad (Srata et al., 2024).

Parámetros Químicos

La Tabla 4 mostró el análisis de varianza de los parámetros químicos, donde los valores de significancia (Sig.) fueron superiores a 0.05 (Sig. > 0.05) para el nitrógeno nítrico (NO_3^-), el nitrógeno amoniacal (NH_4^+) y el fósforo total (P). Estos resultados evidenciaron la ausencia de diferencias significativas en dichos parámetros químicos del agua en la cuenca baja del río Cañete.

Sin embargo, el análisis de varianza indicó una significancia estadística ($p < 0.05$) en ocho parámetros fisicoquímicos, incluyendo la conductividad eléctrica (CE), la temperatura, el pH, el oxígeno disuelto (OD), el nitrito-nitrógeno (NO_2-N), los sólidos disueltos totales (TDS), el amonio-nitrógeno (NH_4-N) y la demanda química de oxígeno (DQO). Además, el análisis de conglomerados jerárquico sugirió que factores externos a las centrales hidroeléctricas tuvieron una mayor influencia en la calidad del agua (Tomczyk et al., 2025).

Tabla 4

Análisis de varianza de los parámetros químicos del agua de la cuenca baja del río Cañete

Variable dependiente		Suma de cuadrados	GL	Media cuadrática	F	Sig.
a. Nitrogeno Nítrico NO3-(ppm)	Contraste	0.034	4	0.009	0.07	0.991
	Error	1.3	10	130		
b. Nitrógeno	Contraste	0.198	4	0.05	0.4	0.806
AmoniacalNH4+(ppm)	Error	1.246	10	0.125		
c. Fosforo total P (ppm)	Contraste	0	4	2.67E-05	0.11	0.975
	Error	0.002	10	0		

Tabla 5

Promedio de los parámetros químicos de agua de los puntos de muestreo

Parámetros químicos del agua	Estación de muestreo					
	Unidad de medida	Puente Catapalla (CT)	Puente San Jerónimo (SJ)	Puente Socci (SC)	Puente Clarita (CL)	Boca de Río (BR)
Nitrato (NO3-)	ppm	0.48	0.57	0.58	0.48	0.59
Amonio (NH4-)	ppm	0.35	0.35	0.33	0.53	0.61
Fosforo total (P)	ppm	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08

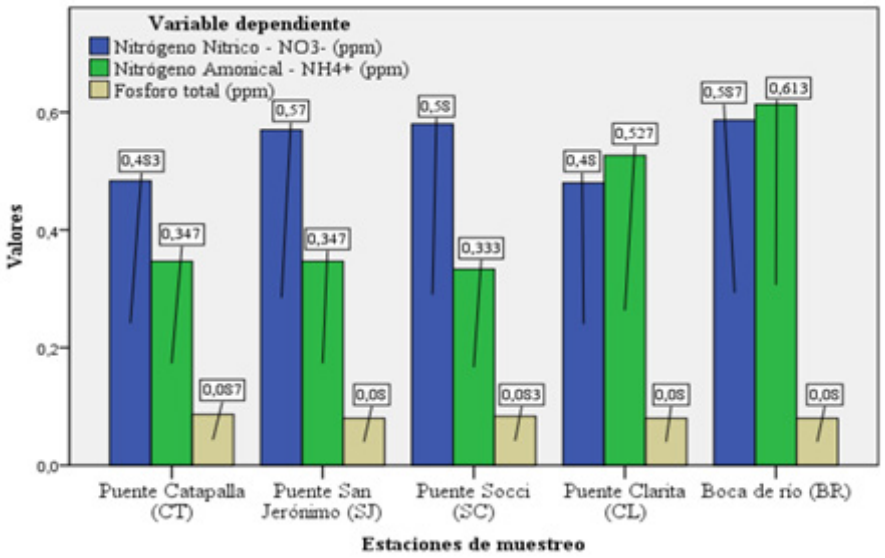
La Tabla 5 mostró el promedio de los parámetros químicos del agua en los distintos puntos de muestreo. La concentración de nitrato (NO_3^-) varió entre 0.48 ppm en Puente Catapalla y Puente Clarita, y 0.59 ppm en Boca de Río. El amonio (NH_4^+) presentó valores entre 0.33 ppm en Puente Socci y 0.61 ppm en Boca de Río, evidenciando variaciones entre estaciones. En contraste, el fósforo total (P) mantuvo valores homogéneos entre 0.08 y 0.09 ppm en todas las estaciones, indicando estabilidad en los parámetros evaluados dentro de la cuenca baja del río Cañete.

Los resultados reflejaron que los ríos fueron influenciados significativamente por factores químicos, en particular la conductividad eléctrica y la relación entre la demanda biológica de oxígeno (DBO) y la demanda química de oxígeno (DQO). Se determinó que una conductividad eléctrica promedio de 1116 micro siemens por centímetro afectó negativamente la sostenibilidad de los ríos y la participación comunitaria, resaltando el impacto adverso de la salinidad del agua (Al-Afeshat et al., 2025).

Asimismo, el análisis químico del agua del río Indo en Ladakh reveló que el calcio y el bicarbonato fueron los iones predominantes, mientras que el sodio y el sulfato estuvieron en concentraciones significativas. Las relaciones iónicas sugirieron que la hidro química del agua de deshielo estuvo influenciada principalmente por la meteorización de carbonatos, con una contribución adicional de la meteorización de silicatos (Ali et al., 2025).

Figura 2

Promedio de los parámetros químicos del agua de la cuenca baja de río Cañete, según estaciones de muestreo



La Figura 2 mostró el promedio de los parámetros químicos del agua en la cuenca baja del río Cañete según las estaciones de muestreo. La concentración de nitrógeno nítrico (NO_3^-) fluctuó entre 0.48 ppm en Puente Clarita y 0.58 ppm en Puente Socci, mientras que el nitrógeno amoniacal (NH_4^+) alcanzó su valor más alto en Boca de Río (0.61 ppm) y el más bajo en Puente Socci (0.33 ppm). En contraste, el fósforo total (P) presentó valores homogéneos en todas las estaciones, con un rango de 0.08 a 0.09 ppm.

Estos hallazgos evidenciaron variaciones en la concentración de compuestos nitrogenados según la ubicación, mientras que el fósforo total se mantuvo estable en los puntos de muestreo. El estudio tuvo como finalidad evaluar la viabilidad de estimar el Índice de Calidad del Agua (ICA) del río e identificar modelos adecuados mediante métricas de rendimiento estadístico. Para ello, se exploró la posibilidad de calcular el ICA utilizando únicamente el oxígeno disuelto (OD) y el pH como variables predictoras, considerando que los parámetros químicos empleados en el método actual de cálculo del ICA en Malasia requieren un tiempo considerable para su determinación (Irwan et al., 2025).

Índice de germinación de semillas de lechuga

Con el objetivo de evaluar si las variaciones en el índice de germinación fueron influenciadas por los tratamientos y las estaciones de muestreo, se llevó a cabo un análisis de varianza. Los resultados, presentados en la Tabla 20, evidenciaron diferencias significativas tanto entre los tratamientos como entre los bloques en estudio (Sig. < 0.05).

Tabla 6

Análisis de varianza del índice de germinación de semillas de lechuga (Lactuca sativa L.)

Origen	Suma de cuadrados	GL	Media cuadrática	F	Sig.
Modelos	167927.800a	10	16792.78	161.999	0
tratamientos	5290.3	5	1058.06	10.207	0
Estación de muestreo	1450.8	4	362.7	3.499	0.25
Error	2073.2	20	103.66		
Total	170001	3			

a. R cuadrado = .988 (R cuadrado corregida = .982)

Para comparar los promedios entre los tratamientos, se aplicó la prueba de Tukey con un 95% de confianza, cuyos resultados se presentan en la Tabla 21. Se observó que los tratamientos T4, T3, T5, T1 y T2, con porcentajes de germinación de 59.20%, 62.80%, 70.00%, 70.40% y 77.40% respectivamente, fueron estadísticamente similares entre sí, pero mostraron diferencias significativas con el tratamiento T6, que alcanzó el 100.00%.

Estos resultados se atribuyeron a que los parámetros fisicoquímicos del agua se encontraron dentro de los límites establecidos por el Ministerio del Ambiente (MINAM). Se evidenció que el estrés hídrico redujo la germinación de lechuga; sin embargo, los tratamientos con soluciones de SG y SRB favorecieron este proceso, especialmente en condiciones de sequía severa. Además, el crecimiento radicular aumentó con un 60% de estrés hídrico, mientras que SG y SRB tuvieron efectos positivos

bajo un 80% de estrés. Por otro lado, el área foliar disminuyó ante sequías extremas, pero se incrementó con la aplicación de SG y SRB en condiciones menos restrictivas (Seifikalhor et al., 2025b).

La Tabla 7 y la Figura 3 expusieron el índice de germinación de semillas de *Lactuca sativa* L., comparando el efecto de los tratamientos aplicados en distintas estaciones de muestreo con el tratamiento testigo. Se evidenció que el índice de germinación en el tratamiento testigo (T6) alcanzó el 100%, mientras que este porcentaje disminuyó a medida que se incrementó la dilución del agua proveniente de la cuenca baja del río Cañete. En el tratamiento con el 100% de agua de la cuenca (T1), el índice de germinación descendió a 70.40%, lo que representó una reducción del 29.6% en comparación con el testigo.

El uso de semillas de alta calidad y su tratamiento contribuyó a mejorar el rendimiento de los cultivos, incrementando la rentabilidad agrícola. Dicho tratamiento se realizó mediante métodos químicos, físicos y biológicos, siendo el químico el de mayor aplicación (Farias et al., 2025). El estudio también evaluó el crecimiento de la lechuga y la concentración de compuestos nutricionales, observando un aumento en la tasa de germinación y en el número de semillas germinadas, relacionado con niveles elevados de azúcares reductores, polifenoles totales, capacidad antioxidante y clorofila (Díaz et al., 2024). Finalmente, se determinó que todos los tratamientos permitieron una germinación completa de las semillas y garantizaron una supervivencia del 100% en las plántulas (Mechergui et al., 2024).

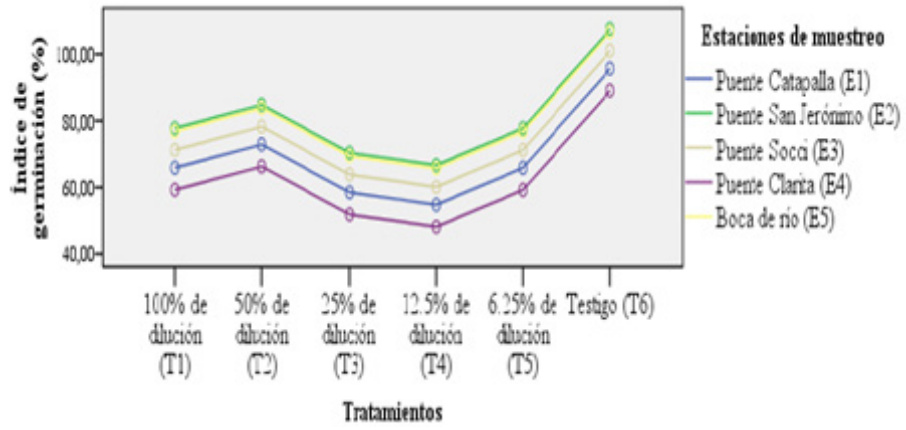
Tabla 7

Promedio del índice de germinación de semillas de lechuga (Lactuca sativa L.) según estaciones de muestreo y tratamientos

Estación de muestreo	Tratamiento						
	100% de dilución	50% de dilución	25% de dilución	12.5% de dilución	6.25% de dilución	0% de testigo	Total
Estación Catapalla	58.00	75.00	61.00	58.00	62.00	100.00	69.00
San Jerónimo	75.00	72.00	80.00	76.00	83.00	100.00	81.00
Puente Socci	71.00	84.00	68.00	57.00	66.00	100.00	74.33
Puente clarita	69.00	79.00	24.00	43.00	59.00	100.00	62.33
Boca de Rio	79.00	77.00	81.00	62.00	80.00	100.00	79.83
Total	70.40	77.4	62.80	59.2	70.00	100.00	73.30

Figura 3

Promedio del índice de germinación de semillas de lechuga (Lactuca sativa L.) según estaciones de muestreo y tratamientos



La Figura 3 mostró el índice de germinación (%) en relación con distintos tratamientos de dilución, evaluados en cinco estaciones de muestreo. Se identificó una tendencia decreciente en la germinación conforme la concentración de la dilución se redujo del 100% al 12.5%, alcanzando su menor valor en el tratamiento T4. No obstante, en la dilución más baja (6.25%) y en el tratamiento testigo (T6), se registró un incremento significativo en la germinación.

En cuanto a las estaciones de muestreo, Puente San Jerónimo (E2) y Boca de Río (E5) presentaron los valores más elevados de germinación, mientras que Puente Clarita (E4) mostró los valores más bajos en la mayoría de los tratamientos. Estos hallazgos evidenciaron que tanto la calidad del agua como el grado de dilución influyeron en la capacidad germinativa. Asimismo, los resultados indicaron que los extractos acuosos tuvieron efectos inhibidores y estimulantes en la germinación, así

como en el crecimiento de la plúmula y la radícula de *Lactuca sativa* L. (Santos et al., 2024).

Conclusiones

El estudio permitió identificar variaciones espaciales en la calidad fisicoquímica del agua de la cuenca baja del río Cañete, evidenciándose diferencias significativas en la temperatura y el oxígeno disuelto entre estaciones de muestreo ($p < 0,05$). No obstante, el potencial de hidrógeno y la conductividad eléctrica no mostraron diferencias estadísticas significativas, manteniéndose dentro de los límites permisibles establecidos por la normativa ambiental peruana para riego agrícola (MINAM, 2017). Estos resultados indican que, desde un enfoque normativo, el agua cumple con los estándares establecidos; sin embargo, presenta heterogeneidad ambiental que podría influir en procesos biológicos sensibles.

En relación con el objetivo principal del estudio, evaluar el impacto del agua del río Cañete en la germinación de semillas de *Lactuca sativa* L. se comprobó que la calidad del agua influyó significativamente en las variables germinativas. Aunque el porcentaje de germinación superó el 90% en la mayoría de estaciones, se observó una relación inversa entre la concentración del agua del río y el desempeño germinativo. Puente Catapalla presentó el menor porcentaje de germinación (93,16%), mientras que Puente San Jerónimo registró el mayor valor (95,5%), evidenciando diferencias atribuibles a la variabilidad en la calidad del agua.

Asimismo, el crecimiento radicular y la elongación del hipocótilo mostraron diferencias significativas entre estaciones, siendo Puente Clarita la que presentó el menor crecimiento radicular (36,77 mm) y la menor elongación del hipocótilo (22,35 mm). Estos resultados sugieren un efecto fitotóxico leve en etapas tempranas del desarrollo vegetal, aun cuando los parámetros fisicoquímicos se encontraban dentro de los rangos permisibles.

El índice de germinación confirmó esta tendencia, registrándose el valor más bajo en Puente Clarita (62,33%), lo que evidencia que los bioensayos vegetales son herramientas más sensibles que los análisis fisicoquímicos convencionales para detectar efectos subletales. En consecuencia, se concluye que la evaluación integrada de parámetros fisicoquímicos y biológicos constituye un enfoque más robusto para el monitoreo de la calidad del agua destinada a riego agrícola.

Finalmente, los hallazgos aportan evidencia científica relevante para la gestión sostenible del recurso hídrico en la cuenca baja del río Cañete, destacando la necesidad de implementar programas de monitoreo continuo que incorporen bioindicadores vegetales como complemento a los estándares normativos vigentes.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de Cañete por su apoyo en la ejecución de la investigación. Asimismo, se reconoce el esfuerzo y dedicación de todas las personas que contribuyeron al desarrollo del estudio, el cual fue financiado con recursos propios.

Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses que pueda influir en los resultados de este estudio.

Disponibilidad de datos

Los datos están disponibles con el autor correspondiente previa solicitud razonable.

Contribución de los autores

Saldivar-Villarroel, J.: conceptualización, metodología, investigación, análisis formal, administración del proyecto, supervisión, redacción del borrador original y revisión y edición. Vicente-Paucar, E. G.: metodología, curación de datos, investigación, validación y revisión y edición. Cruz-Martínez, R. V.: análisis formal, software, visualización, curación de datos y revisión y edición. Bendezú-Diaz, L. F.: investigación, recursos, curación de datos y validación. Magallanes-Magallanes, J. L.: recursos, investigación, captación de fondos y administración del proyecto. Taípe Cancho, M. H.: supervisión, validación y revisión - edición.

Referencias

Al-Afeshat, A., Zoubi, M. M., Abu Afifeh, Q. Y., Al-Jawaldeh, H., Qutishat, T. A., Masoud, A. M. N., & Rahbeh, M. (2025). Interrelation of dams sustainability with the local communities and water quality. *Global Journal of Environmental Science and Management*, *11*(1), 157-176. https://doi.org/10.22034/gjesm.2025.01.10

Albuquerque, V. J., Müller, C., Hartmann, M., & Hartmann, P. A. (2025). Concentration of metals in water around roads: A case study in Southern Brazil. *Discover Environment*, *3*(1), 8. https://doi.org/10.1007/s44274-025-00191-0

Ali, Gh., Chaudhari, M. P., Syed, S., Rajpurohit, D., Sanyal, M., & Shrivastav, P. S. (2025). Hydrogeochemical investigation and water quality assessment of the Indus River in the semiarid region of Ladakh, India. *Marine Pollution Bulletin*, *211*, 117413. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.117413

Barzallo, D., Lazo, R., Yugsan, F. J., & Sevilla, J. D. (2025). Enhancing turnip cultivation with plant growth-promoting bacteria in organic fertilizer. *Revista Caatinga*, *38*, e12843. https://doi.org/10.1590/1983-21252025v3812843rc

Díaz, L. E., Gonzalez, J. D., Morales-Gonzalez, M. P., & Garzón-Castro, C. L. (2024). Harnessing the power of microalgae consortia for sustainable crop production: Case study on lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Journal of Applied Phycology*, *36*(6), 3273-3286. https://doi.org/10.1007/s10811-024-03308-9

Farias, K. S., Ferreira, M. M., De Oliveira, I. B., Dalio, R. J. D., & Pirovani, C. P. (2025). The BASIDIN effector of the fungus Moniliophthora perniciosa promotes positive effects on the seed germination and seedlings development of Lactuca sativa. *Frontiers in Plant Science*, *16*. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1529096

Irwan, D., Ibrahim, S. L., Latif, S. D., Winston, C. A., Ahmed, A. N., Sherif, M., El-Shafie, A. H., & El-Shafie, A. (2025). River water quality monitoring using machine learning with multiple possible in-situ scenarios. *Environmental and Sustainability Indicators*, *26*, 100620. https://doi.org/10.1016/j.indic.2025.100620

Lencha, S. M., & Babore, T. A. (2025). Modelling of the water distribution system and determination of losses: The case of Halaba Kulito town, Central Ethiopia. *Discover Sustainability*, *6*(1), 92. https://doi.org/10.1007/s43621-025-00889-4

Lucas, J. R., Ramos, D., Balcázar, S. S., & Santos, C. (2023). The Presence of Potentially Pathogenic Protozoa in Lettuce (Lactuca sativa) Sold in Markets in the Central Peruvian Andes. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *20*(2), Article 2. https://doi.org/10.3390/ijerph20020943

Masoumi, M., Soleimani, M., Shekari, T., Alaei, M., Sheikhvatan, M., Mojtahedzadeh, M., Basiri, K., Najmeddin, F., & Shafiei, S. H. (2025). Perioperative Use of Pregabalin vs. Duloxetine for Pain Management of Knee Fracture Surgery: A Double-Blind Randomized Clinical Trial. *IJ Pharmaceutical Research*, *24*(1), Article 1. https://doi.org/10.5812/ijpr-157958

Masteali, S. H., Bayat, M., & Ghorbanpour, M. (2025). Effects of forest structure from graph theory connectivity indicators on river water quality in the Caspian Sea Basin. *Scientific Reports*, *15*(1), 7344. https://doi.org/10.1038/s41598-025-88893-6

Mechergui, T., Vanderschaaf, C. L., & Pardos, M. (2024). *From Waste to Plant Production: Cattle Dung Compost as an Alternative Nursery Substrate to Commercial Peat for Producing Lettuce Plants*. https://doi.org/10.21273/HORTSCI18035-24

Ministerio del Ambiente (MINAM). (2017). *Informe nacional sobre la calidad ambiental en el Perú*. Ministerio del Ambiente.

Narjesi, V., Bonyanpour, A., & Ghasemi-Soloklui, A. A. (2025). Determining the optimal harvest time for pomegranate variety wonderful in semi-arid climate. *Scientific Reports*, *15*(1), 7668. https://doi.org/10.1038/s41598-025-92015-7

Oh, S., Ahn, E., Shi, A., Mou, B., & Park, S. (2025). Genome-wide association studies in lettuce reveal the interplay of seed age, color, and germination under high temperatures. *Scientific Reports*, *15*(1), 733. https://doi.org/10.1038/s41598-024-84197-3

Ortín, E. R., Cebamanos, M. A., & Lozano, C. P. (2025). Competencia motriz autopercibida y práctica de actividad física en adolescentes: Diferencias según el estado de peso. *Sportis. Scientific Journal of School Sport, Physical Education and Psychomotricity*, *11*(1), Article 1. https://doi.org/10.17979/sportis.2024.11.1.10991

Santos, A. C. M. de C., Lima, L. da S. de, Cury, G., & Moura, F. de B. P. (2024). Phytotoxitic activity of *Apeiba tibourbou* Aubl. And *Curatella americana* L. aqueousextracts on seed germination of *Lactuca sativa* L. *Hoehnea*, *51*, e032024. https://doi.org/10.1590/2236-8906e032024

Seifikalhor, M., Ahangir, A., Latifi, M., Akbar-Tajari, Z., Hassani, S. B., & Nasiri Almanghadim, N. (2025). Unlocking the Drought-Relief Partnership: Exploring the Role of Sulfate-Reducing Bacteria and Salep Gum in Alleviating Drought Stress in Lettuce (Lactuca sativa). *International Journal of Horticultural Science and Technology*, *12*(3), 939-952. https://doi.org/10.22059/ijhst.2024.380585.902

Srata, L., Chikri, M., Farres, S., Hamdani, I., Tmimi, Y., & Fethi, F. (2024). A comparative study of discrimination and parameter identification of oil types using near-infrared spectroscopy, fourier transform infrared spectroscopy, and laser-induced fluorescence spectroscopy combined with chemometrics tools. *Interactions*, *246*(1), 12. https://doi.org/10.1007/s10751-024-02239-8

Tomczyk, P., Tymcio, M., Kuriqi, A., Santos, J. M., & Wiatkowski, M. (2025). Small hydropower impacts on water quality: A comparative analysis of different assessment methods. *Water Resources and Industry*, *33*, 100282. https://doi.org/10.1016/j.wri.2025.100282

Villalba, A., Huvierne, L., Mamani, A., & Filippone, M. P. (2023). Efecto inductor de un extracto de hojas de frutilla (Fragaria x ananassa Duch.) sobre la germinación y el crecimiento de lechuga (Lactuca sativa L.). *Revista Agronómica del Noroeste Argentino*, *43*(1), 35-45.

Wharton, C., Beacham, A., Gifford, M. L., & Monaghan, J. (2025). Rootrainertrons: A novel root phenotyping method used to identify genotypic

variation in lettuce rooting. *Plant Methods*, *21*(1), 29. https://doi.org/10.1186/s13007-025-01348-x

Yu, X., Muhamad, M., Mohamed, S. N., Ali, R., & Sediri, M. (2024). Non-Woven Fibre Filter Made From Bamboo And Oil Palm Empty Fruit Bunch For Water Treatment. *Journal Of Advanced Research*, *129*(1), https://doi.org/91-104. 10.37934/aram.129.1.91104

Zhang, Z., Qi, J., Wang, Q., Wang, S., & Hu, F. (2025). Analysis and forecast of the coupled development level of socioeconomy ecological environment and tourism in China's Yellow River Basin. *Scientific Reports*, *15*(1), 5446. https://doi.org/10.1038/s41598-025-88875-8