



ISSN: 2616-9541

Revista de Investigación
APORTE
SANTIAGUINO
Ingeniería e Innovación

Vol. 18, Núm. 1 (2025): enero-junio





AUTORIDADES UNIVERSITARIAS

RECTOR

Dr. Carlos Reyes Pareja

VICERRECTOR ACADÉMICO

Dr. Marco Sila Lindo

VICERRECTOR DE INVESTIGACIÓN

Dra. Consuelo Valencia Vera

UNASAM
LICENCIADA

"Una Nueva Universidad para el Desarrollo"

¡La primera en la región Ancash!

ISSN-L: 2616-9541
ISSN: 2070-836X

**UNIVERSIDAD NACIONAL
SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO**
“Una Nueva Universidad para el Desarrollo”

Vicerrectorado de Investigación

Dirección del Instituto de Investigación

Revista de Investigación

**APORTE
SANTIAGUINO**

Ingeniería e Innovación

Vol. 18 Núm. 1 (2025), enero - junio



Huaraz, Perú

Revista de Investigación
APOORTE SANTIAGUINO
Ingeniería e Innovación
Vol. 18 Núm. 1 (2025), enero - junio





Cuerpo Editorial

DIRECCIÓN

Dra. Karina Soledad Vilca Mallqui

Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Perú
kvilcam@unasam.edu.pe

EDICIÓN

Dra. Karina Soledad Vilca Mallqui

Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Perú
kvilcam@unasam.edu.pe

COMITÉ EDITORIAL

Dr. Elio Alejandro Milla Vergara

Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Perú

Dr. Edwin Julio Palomino Cadenas

Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Perú

Dr. Julián Pérez Falcón

Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Perú

Dr. Edwin Johny Asnate Salazar

Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Perú

Mag. Katy Medina Marcos

Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Perú

Dr. Hugo Chirinos Collantes

Universidad Nacional de Ingeniería, Perú

Dr. Flavio Gutiérrez Segura

Universidad Nacional de Piura, Perú

Dr. Freddy Mejía Coico

Universidad Nacional de Trujillo, Perú

CONSEJO CONSULTIVO

PhD. Khngdet Phasinam

Pibulsonskram Rajabhat University, Thailandia

PhD. Raul Narciso Carvahlo Guedes

Universidade Federal de Vicosa, Brasil

Dr. Harold Blas Achic

Universidad Federal de Mato Grosso, Brasil

PhD. Ángel Cobo Ortega

Universidad de Cantabria, España

Dr. Raymundo Erazo Erazo

Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú

Dr. Jesús Edilberto Espinola Gonzales

Universidad Carlos III de Madrid, España

PhD. Eusebio Mercedes Ingol Blanco

Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú

Dr. Nicolás Kemper Valverde

Universidad Nacional Autónoma de México, México

PhD. Gretty Katherina Villena Chávez

Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú

Dra. Carmen Eusebia Palacios Jara

Universidade de São Paulo - Instituto de Biociências, Brasil

GESTIÓN DE LA REVISTA ELECTRÓNICA

William Eduardo Varillas

Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo

La revista de investigación *Aporte Santiaguino* es una publicación científica de periodicidad semestral. Tiene como objetivo difundir los resultados de los trabajos de investigación desarrollados en los ámbitos regional, nacional e internacional, como una contribución a la solución de la problemática natural, social y cultural.

La revista publica artículos científicos originales e inéditos en las Ingenierías. Los trabajos recepcionados son evaluados por árbitros externos según criterios de calidad.

La revista de investigación *Aporte Santiaguino* está indizada en el Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal (Latindex) y en el Directorio de Revistas de Acceso Abierto (DOAJ).

Hecho el depósito legal en la
Biblioteca Nacional del Perú N° 2008-13057
ISSN-L: 2616-9541
ISSN: 2070-836X

Comunicaciones:

Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo.
Vicerrectorado de Investigación.
Dirección del Instituto de Investigación.
Av. Centenario N° 200, Huaraz, Perú.
Teléfono: (51) 043-640020 Anexo: 3613.
Apartado Postal: 70.
Correo electrónico: revistaaportesantiaguino@unasam.edu.pe.

El contenido de cada artículo es de responsabilidad exclusiva de los autores y no expresa, necesariamente, la opinión de la revista.

Licencia:

Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo.
Vicerrectorado de Investigación



Licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional.

La revista está disponible a texto completo en la página web: <http://revistas.unasam.edu.pe>.

CONTENIDO

Vol. 18 Núm. 1 (2025), enero - junio

CONTENT

Vol. 18 Núm. 1 (2025), enero - junio

Artículos Originales

Propagación de *Solanum muricatum* Aiton en arena y suelo agrícola mediante aplicación de AIB y lixiviado de lombriz

Britchell-Eduardo Ccoyllo-Chancabuaña y Elizabeth Miranda-Barrios..... Pág. 9-16

Degradación, lesiones y resistencia al desgarro de las películas de mantillo de bioplástico Mater-Bi y LDPE en el cultivo de frijol a gran altura

Einer Espinoza-Muñoz, Juan F. Barreto, Rosario Barra Zegarra y Henry Garrido-Angulo..... Pág. 17-26

Rendimiento y contenido proteico de tres variedades de kiwicha bajo tres niveles de fertilización en Marcará, Ancash 2022

Rhodes Mejia Valvas, Walter Vasquez Cruz, Hugo Mendoza Vilcabuaman , Francisco Espinoza Montesinos, Clay Pajuelo Roldan, Guillermo Castillo Romero, Teófanés Mejía Anaya y José del Carmen Ramírez Maldonado..... Pág. 27-34

Tiempos improductivos en el proceso de minado de la Compañía Minera “AC Agregados S.A.” Unidad Arequipa M

Manuel Rashta Lok..... Pág. 35-48

Radio enlace y la alerta temprana ante un aluvión de la Laguna Palcacocha en Huaraz - 2025

Luis Alvarado Cáceres, Henry Garrido Angulo y Oscar Alvarado Mendoza Pág. 49-62

Efecto de tres dosis de microorganismo eficaces aplicados en dos etapas fenológicas del cultivo de trigo (*Triticum sp.*), variedad Santa Rosa. Centro Poblado de Macashca, Huaraz, Ancash 2023

Dustin Aguilar Bustamante , Guillermo Castillo Romero y José Ramírez Maldonado..... Pág. 63-70

Determinación del ángulo óptimo de inclinación para mejorar la captación solar en instalaciones térmicas y fotovoltaicas en zonas cercanas a latitud 0°

Segundo Guasumba Codena, Isidoro Lillo Bravo, José Díaz Santamaría , Hugo Bonifáz García y Jerry Tacán Jaya Pág. 71-86

CONTENIDO

Vol. 18 Núm. 1 (2025), enero - junio

CONTENT

Vol. 18 Núm. 1 (2025), enero - junio

Artículos de Revisión

Revisión de literatura para el análisis del desempeño del modelo SWAT en la disponibilidad hídrica futura

Carlos Martínez Zelaya y Fidel Aparicio Roque..... Pág. 87-98

Vorticidad y socavación fluvial alrededor de las estructuras hidráulicas : una revisión

Toribio Reyes Rodríguez y Maximiliano Asís-López..... Pág. 99-108

Propagación de *Solanum muricatum* Aiton en arena y suelo agrícola mediante aplicación de AIB y lixiviado de lombriz

RESUMEN

***Britchell-Eduardo,
Ccoyllo-Chancahuaña***

*Instituto de Educación Superior Tecnológico
Público Peruano Español, Arequipa, Perú.
brithell919@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0000-7433-8627>*

Elizabeth Miranda-Barrios

*Instituto de Educación Superior Tecnológico
Público Peruano Español, Arequipa, Perú.
elizabethmirandabarrios@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-8741-3577>*

El pepino dulce es originario de los Andes. Se propaga comúnmente por estructuras vegetativas como esquejes que permiten conservar las características de la planta madre. De allí que el objetivo de la investigación fue evaluar el efecto del lixiviado de lombriz y AIB en polvo en la multiplicación de *Solanum muricatum* a partir de esquejes en arena y suelo agrícola. Se obtuvieron esquejes de pepino dulce y de acuerdo a los tratamientos, se aplicó AIB en polvo y lixiviado de lombriz al 1,0% y 1,5% mediante inmersión de la parte basal durante 2 horas en el lixiviado. Luego, se plantaron en camas de arena y suelo agrícola. Los resultados indican que, en la arena, la incorporación de AIB en polvo o de lixiviado de lombriz al 1,5% favorecen el enraizamiento con valores del 88,89% en los tratamientos 2 y 4, seguidos por los tratamientos 1 y 3 con 77,8% y 66,67%, respectivamente. Asimismo, el uso de AIB en suelo agrícola favorece el enraizamiento de la planta.

Palabras claves: Cbr, Contenido de Humedad, Energía de Compactación

Cómo citar este artículo: Ccoyllo-Chancahuaña, B.-E., & Miranda-Barrios, E. (2025). Propagación de *Solanum muricatum* Aiton en arena y suelo agrícola mediante aplicación de AIB y lixiviado de lombriz. *Aporte Santiaguino*, 18(1), 09–19. <https://doi.org/10.32911/as.2025.v18.n1.1225>

Recibido: 2025-03-17 | Aceptado: 2025-05-15

Propagation of *Solanum muricatum* Aiton in Sand and agricultural soil using IBA and worm leachate

Pear melon is native to the Andes and is commonly propagated through vegetative structures such as cuttings, which allow for the preservation of the mother plant's characteristics. Therefore, the objective of this research is to evaluate the effect of worm compost leachate and powdered IBA on the multiplication of *Solanum muricatum* from cuttings in sand and agricultural soil. Melon pear cuttings were obtained and, according to the treatments, powdered IBA and 1.0% and 1.5% worm compost leachate were applied by immersing the basal part for 2 hours in the leachate. They were then planted in sand and agricultural soil beds. The results indicate that, in the sand, the incorporation of powdered IBA or 1.5% worm compost leachate promoted rooting, with values of 88.89% in treatments 2 and 4, followed by treatments 1 and 3 with 77.8% and 66.67%, respectively. Likewise, the use of IBA in agricultural soil promotes plant rooting.

Keywords: phytohormone, substrates, vegetative propagation, vermicompost

INTRODUCCIÓN

Solanum muricatum Aiton o pepino dulce pertenece a la familia de las solanáceas. Tiene su centro de origen en los Andes y se cultiva en Perú, Colombia, Chile y Ecuador debido a sus propiedades medicinales y diuréticas, que incluyen el alto contenido de agua, bajo contenido de azúcar y alta cantidad de fibra y antioxidantes (Jana & Contreras, 2019). Los frutos se exportan a USA y Europa (Mahato et al., 2016).

El pepino dulce se caracteriza por ser una planta perenne, de desarrollo rastrero y crecimiento indeterminado, aunque se cultiva como planta anual. El tallo es herbáceo y frágil en las primeras etapas de crecimiento. Después se lignifica hasta convertirse en leñoso, de color

verde con pigmentaciones oscuras. Las hojas son simples o compuestas de tamaño variado. Las flores son hermafroditas, de color blanco con centro morado de diferente intensidad y se presentan en racimos de hasta 20 flores o más. El fruto es una baya hueca en el centro de forma variada; en cuanto a su fenología, depende del tamaño del esqueje utilizado en la propagación vegetativa (Jana & Contreras, 2019). Mahato et al. (2016) indican que las flores no necesitan polinización para producir frutos, pero que puede mejorar la fructificación;

Las temperaturas de desarrollo del pepino dulce van desde los 8,3 °C hasta los 23,1 °C, con picos extremos de 35,3 °C. Algunos autores refieren que las altas temperaturas reducen el contenido de azúcares durante la cosecha de la fruta (Ampim & Rivera-Ocasio, 2017). En cuanto a la humedad relativa, se registra rangos entre 50,9 % hasta 96,6 %. Por ello, se afirma que el pepino dulce puede adaptarse a diferentes condiciones climáticas (Balbontín & Jana, 2019). Así también, se conoce que la planta tolera suelos salinos, pero prefiere suelos fértiles (Ampim & Rivera-Ocasio, 2017).

La propagación de la planta se realiza mediante estructuras vegetativas o semillas (Ampim & Rivera-Ocasio, 2017). La propagación más común es la clonal, mediante esquejes o estacas debido a la gran facilidad que tiene para producir raíces adventicias. Se recomienda estructuras semileñosas de 10-20 cm de longitud, obtenidas a partir de plantas sanas, vigorosas y productivas. Como sustrato, se indica una relación 2:1 de suelo agrícola: arena. Además, en la fase de propagación se debe proteger las estacas de las bajas temperaturas y heladas. El enraizamiento de la planta se estima en 2 a 3 meses. Como plantación final, se sugiere suelos de buena textura, porosos y sueltos (Jana et al., 2019). Respecto a la propagación sexual, Aghdaei et al. (2019) indican que solo alrededor del 4% llega a germinar.

Respecto a los reguladores de crecimiento, Faizy et al. (2021) mencionan que la incorporación de auxinas como ácido indol acético (AIA), ácido indol butírico (AIB) y ácido naftalacetico (ANA) favorecen en un 100% el enraizamiento de las estructuras vegetativas del pepino dulce bajo condiciones de micropropagación.

Por su parte, Aghdaei et al. (2019) indican que además del AIB, el uso de *peat moss* + perlita y *peat moss* + arena como sustratos de enraizamiento, favorecen una mayor cantidad de raíces, considerando una temperatura de 25 °C y humedad relativa del 50%.

En su investigación, Shiwanand Pandey (2021) indica que las auxinas y las citoquininas favorecen un rápido cultivo de las estructuras vegetativas, sobre todo en la etapa de establecimiento después del cultivo invitro y resalta que una alta concentración de citoquininas (BAP) y baja concentración de auxinas (AIB) favorecen procesos de división celular y morfogénesis de nuevos tejidos.

Respecto al lixiviado de lombriz, se conoce que contiene fitohormonas, así como sustancias húmicas que tienen efectos similares a las hormonas vegetales, lo que favorece el enraizamiento de las plantas (Zamudio Solis, 2013). Además de fitohormonas, el lixiviado de lombriz es rico en microorganismos, ácidos húmicos y fúlvicos (López Pérez et al., 2019).

El lixiviado de lombriz estimula el desarrollo radicular, mejorando la absorción de nutrientes durante todo el ciclo de la planta. En esquejes de nopal, el lixiviado incrementó la producción y aceleró el crecimiento de raíces secundarias (López Pérez et al., 2019).

Por lo expuesto, el objetivo de la investigación fue evaluar el efecto de lixiviado de lombriz al 1 y 1,5% y AIB en polvo en la propagación de *Solanum muricatum* a partir de esquejes en arena y suelo agrícola.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en el distrito de Bella Unión, Caravelí, Arequipa, coordenadas geográficas 15°26'47" S y 74°38'49" a 210 m s. n. m. La investigación se condujo del 7 al 27 de agosto de 2024. Las temperaturas promedio de la arena fueron 17,6 °C y del suelo agrícola de 16.9 °C. En la Tabla 1 se observa las características en cuanto a pH y CE del agua de riego utilizada en el proyecto, la arena, el suelo agrícola y el lixiviado de lombriz al 1 y 1,5%.

Tabla 1

Datos de los materiales y productos utilizados en los tratamientos ejecutados

Medio evaluado	pH	CE dS
Agua de riego	6,31	0,62
Arena	7,28	0,28
Suelo agrícola	8,00	0,60
Lixiviado 1%	6,70	0,65
Lixiviado 1.5%	6,67	0,65

Nota. pH: potencial de hidrogeniones; CE: Conductividad eléctrica; dS: deciSiemens

Los tratamientos ejecutados se describen en la Tabla 2, donde del T1 al T4 se llevaron a cabo en sustrato arena y del T5 al T8 se condujo en suelo agrícola.

Tabla 2

Tratamientos ejecutados en la investigación

Tratamiento	Producto utilizado	Dosis	Sustrato	Tiempo de remojo
T-1	Agua (testigo)	-	arena	-
T-2	A.I.B.	-	arena	-
T-3	Lixiviado de lombriz	1,0%	arena	2h.
T-4	Lixiviado de lombriz	1,5%	arena	2h.
T-5	Agua (testigo)	-	Suelo agrícola	-
T-6	A.I.B.	-	Suelo agrícola	-
T-7	Lixiviado de lombriz	1,0%	Suelo agrícola	2h.
T-8	Lixiviado de lombriz	1,5%	Suelo agrícola	2h.

Los esquejes de pepino dulce que se utilizaron en la investigación fueron obtenidos en horas de la mañana del fundo “San Antonio” ubicado en el distrito de Bella Unión. La planta, esqueje, nudo, hojas, flores y fruto se observa en la Figura 1. Se procuro que los esquejes tuvieran presencia de leño.

Figura 1

Estructuras vegetativas de la planta Solanum muricatum utilizado en la investigación



Respecto al lixiviado de lombriz, se empleó el que procedía de la vermicompostera del IESTP Peruano Español, en dosis del 1 y 1,5% de concentración. Para ello, se incorporó 10 y 15 ml de lixiviado por cada litro de agua desionizada, respectivamente.

Finalmente, el riego se realizó diariamente en las camas de arena y cada 3 días en el suelo fértil.

Respecto al diseño experimental y variables evaluadas, la investigación ejecutada fue de tipo factorial 2 x 4, con 3 repeticiones y 3 unidades experimentales por repetición. Las variables evaluadas fueron presencia y longitud de la raíz, así como porcentaje de enraizamiento. La presencia y porcentaje de enraizamiento se realizó por conteo directo en las repeticiones. El diámetro de la raíz se evaluó mediante el método de Tennat (1975).

Los datos se tomaron a los 7, 14 y 21 días después de la instalación y se sometieron al análisis ANVA y comparación de las medias a través del test de Fisher al 95 % de confianza. El paquete estadístico utilizado fue InfoStat, versión estudiantil 2020.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 3 se muestran los resultados en relación a la presencia de raíces observadas en los tratamientos durante las 3 evaluaciones realizadas a los 7, 14 y 21 días después de ejecución.

Tabla 3

Presencia de raíz en los esquejes de pepino dulce en las diferentes fechas de evaluación

Tratamiento	PR Ev. 1	PR Ev. 2	PR Ev. 3
T-1	0,33 a	1,00 a	1,00 a
T-2	0,67 a	1,00 a	1,00 a
T-3	0,33 a	0,67 a	1,00 a
T-4	0,67 a	1,00 a	1,00 a
T-5	0,33 a	0,33 a	0,33 bc
T-6	0,67 a	0,67 a	0,67 ab
T-7	0,33 a	0,67 a	0,00 c
T-8	0,33 a	0,33 a	0,00 c

Nota. Comparativo de Fisher, las medias con letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$); PR Ev1: Presencia de raíz en la evaluación 1; PR Ev2: Presencia de raíz en la evaluación 2; PR Ev3: Presencia de raíz en la evaluación 3.

Como se observa, en la primera evaluación, todos los tratamientos mostraron presencia de raíces a los 7 días después de ejecutar, con mayor presencia en los tratamientos 2, 4 y 6. En la segunda evaluación, nuevamente todos los tratamientos mostraron presencia radicular; de ellos destaca el 1, 2 y 4. Hacia la tercera evaluación, se observó ausencia de raíces en los tratamientos 7 y 8, mientras que la mayor cantidad se concentró en los primeros 4 tratamientos. Se infiere que debido a la compactación del suelo y a los microorganismos oportunistas, las raíces existentes del tratamiento 7 y 8 se necrosaron debido a que en esos tratamientos se comenzó a observar necrosis en el tejido de los esquejes. Una situación similar comenzó a ocurrir en los tratamientos 5 y 6 ejecutados en suelo agrícola. Debido a ello, se colige que hay mayor eficiencia en la propagación de pepino dulce en arena. Estos resultados coinciden con lo mencionado por Jana et al. (2019), quienes sugieren para la propagación asexual de pepino dulce, suelos de buena textura, porosos y sueltos. También los hallazgos son similares a los de Aghdai et al. (2019), que observaron mejores resultados en

sustratos compuestos por peat moss + perlita y peat moss + arena, que se caracterizan por ser materiales muy porosos.

En la Tabla 4, se observa el porcentaje de enraizamiento de acuerdo a los tratamientos ejecutados.

Tabla 4
Porcentaje de enraizamiento de acuerdo a los tratamientos ejecutados

Tratamiento	Porcentaje de enraizamiento
T-1	77,78 %
T-2	88,89 %
T-3	66,67 %
T-4	88,89 %
T-5	33,33 %
T-6	66,67 %
T-7	33,33 %
T-8	22,22 %

En la tabla 5 se observa que los tratamientos con mayor porcentaje de enraizamiento son el 2, que corresponden a AIB y el 4 a lixiviado de lombriz al 1,5%, ambos en el sustrato “arena” y alcanzan el 88,89% de enraizamiento. Son seguidos por el tratamiento testigo en arena con 77,78%. En menor posición se encuentra el tratamiento 3 de lixiviado de lombriz al 1% en sustrato arena y el tratamiento 6 de lixiviado de lombriz al 1,5% en sustrato de suelo agrícola, ambos con un 66,67 % de porcentaje de enraizamiento. En cuanto a los tratamientos restantes, su porcentaje de enraizamiento es menor al 50%.

Estos resultados se apoyan en lo observado por Shivanand P. (2021), que indica que la presencia de auxinas favorece la propagación vegetativa de pepino dulce. También los hallazgos se complementan con los de Zamudio Solis (2013), infiriendo que el lixiviado de lombriz, con concentración del 1 y 1,5% en sustratos porosos

como la arena favorece el enraizamiento de pepino dulce en cuanto a su propagación vegetativa.

En cuanto a la longitud de raíces, en la Tabla 5 se registra el tamaño observado en las 3 evaluaciones realizadas: a los 7, 14 y 21 días después de ejecutar.

Tabla 5
Longitud de la raíz en los esquejes de pepino dulce en las diferentes fechas de evaluación

Tratamiento	LR Ev. 1	LR Ev. 2	LR Ev. 3
T-1	0,33 a	7,33 abc	5,67 c
T-2	2,67 a	8,67 abc	35,00 a
T-3	5,33 a	4,00 abc	7,67 c
T-4	1,67 a	10,67 a	20,33 b
T-5	0,33 a	2,33 bc	1,67 c
T-6	1,00 a	3,33 abc	2,33 c
T-7	1,00 a	3,00 abc	0,00 c
T-8	0,33 a	0,33 c	0,00 c

Nota. Comparativo de Fisher, donde medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$); LR Ev1: Longitud de raíz en la evaluación 1; LR Ev2: en la evaluación 2; LR Ev3: Longitud de raíz en la evaluación 3.

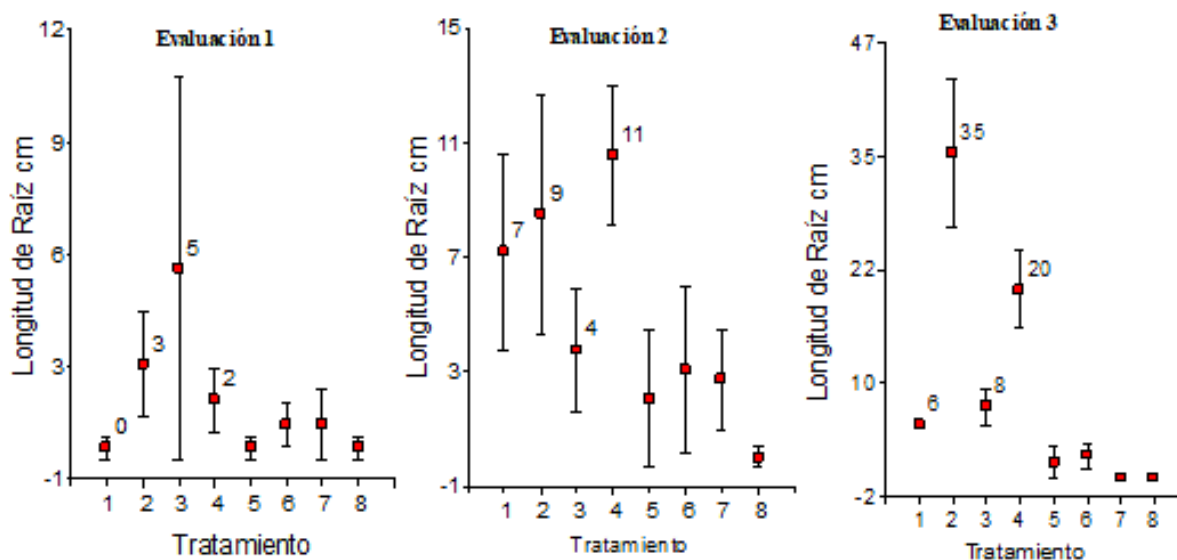
Como se observa, en la primera evaluación, la mayor longitud se encontró en el tratamiento 3; sin embargo, no existe diferencia estadística significativa comparado con los otros tratamientos. En la segunda evaluación, la longitud de raíz del tratamiento 4 es mayor y es seguido con diferencias estadísticas mínimas por el tratamiento 2 y 1, que a su vez son mayores respecto a los demás tratamientos. En la tercera evaluación, la mayor longitud de raíz y estadísticamente significativo, se observa en el tratamiento 2 y es seguido por el tratamiento 4. De ello se infiere, que el AIB en polvo influye positivamente en la longitud de las raíces del pepino dulce. De manera semejante, el efecto del lixiviado de lombriz líquido a 1,5 % de concentración, considerando el lixiviado

de lombriz, estimula el desarrollo radicular y mejora la absorción de nutrientes de las plantas de acuerdo (López Pérez et al., 2019).

Lo descrito, se representa en la Figura 2, donde se compara el crecimiento de las raíces en las evaluaciones realizadas a los 7, 14 y 21 días después de ejecutar.

Figura 2

Comparativo de la longitud de raíz en esquejes de pepino dulce en los diferentes tratamientos ejecutados



Se desprende que la mayor cantidad de raíces en los esquejes de pepino dulce a los 7 días se encuentra en los tratamientos 2, 3 y 4 con aplicación de AIB en polvo y lixiviado de lombriz al 1 y 1.5%, respectivamente, todos ellos en sustrato arena. Este comportamiento se mantiene en la segunda y tercera evaluación para el factor sustrato, mientras que para el factor tipo de enraizante, el AIB en polvo y Lixiviado de lombriz al 1,5 % muestran los mejores resultados.

CONCLUSIONES

La propagación vegetativa de *Solanum muricatum* tiene mayor eficiencia en arena, especialmente cuando se incorpora el uso de ácido indol-3-butírico (AIB) o lixiviado de lombriz al 1,5%. Por el contrario, el suelo agrícola, debido a sus características particulares, como la compactación, limita significativamente el desarrollo radicular, incluso en presencia de reguladores de crecimiento. Estos hallazgos

sugieren que, el pepino dulce tiene mejor enraizamiento en suelos con alta porosidad y los porcentajes se incrementan con la aplicación de bioestimulantes.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los ingenieros Alberto Nina Quispe y Andrés Chura Bravo y al profesor Michael Roque Canales por la confianza y el apoyo brindado en la ejecución de la investigación.

FINANCIAMIENTO

No financiado.

REFERENCIAS


- Aghdaei, M., Nemati, S. H., Samiee, L., & Sharifi, A. (2019). Effect of rooting medium, cutting type and auxin on rooting of pepino (*Solanum Muricatum* Aiton) cutting. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(5), 10357–10369. https://doi.org/10.15666/aer/1705_1035710369
- Ampim, P., & Rivera-Ocasio, D. (2017). *Pepino fruit - Cultivation*. <https://www.pvamu.edu/cafnr/wp-content/uploads/sites/27/Fact-Sheets-Pepino.pdf>
- Balbontín, C., & Jana, C. (2019). Caracterización de las zonas de producción en Chile. In C. Jana (Ed.), *El cultivo del pepino dulce* (Vol. 410, pp. 35–61). INIA - Chile. <https://biblioteca.inia.cl/items/e73c0838-d42a-42c5-b167-d0413991d4f9>
- Faizy, W. S., Toma, R. S., Tamer, Y. S., & Khaza'al, W. (2021). Auxins and Cytokinins Involved in Micropropagation of Pepino Plant (*Solanum muricatum* Aiton). *Diyala Agricultural Sciences Journal*, 13(1), 24–30. <https://doi.org/10.52951/dasj.2113010>
- Jana, C., Alfaro, V., & Sandoval, A. (2019). Propagación de pepino dulce. In C. Jana (Ed.), *El cultivo del pepino dulce* (Vol. 410, pp. 63–71). <https://biblioteca.inia.cl/items/e73c0838-d42a-42c5-b167-d0413991d4f9>
- Jana, C., & Contreras, C. (2019). Introducción. In C. Jana (Ed.), *El cultivo del pepino dulce* (Vol. 410, pp. 9–13). INIA - Chile. <https://biblioteca.inia.cl/items/e73c0838-d42a-42c5-b167-d0413991d4f9>
- Jana, C., Contreras, C., Sagredo, B., Alfaro, V., & Márquez, R. (2019). Origen, morfología, fisiología, tipos varietales. In C. Jana (Ed.), *El cultivo del pepino dulce* (Vol. 410, pp. 15–34). INIA - Chile. <https://biblioteca.inia.cl/items/e73c0838-d42a-42c5-b167-d0413991d4f9>
- López Pérez, Y., Sosa Pérez, R., Méndez González, R., & Rodríguez Ledesma, Y. (2019). Foliar application of liquid earthworm humus in *Allium sativum* in Topes de Collantes, Cuba. *Centro Agrícola*, 46(2), 13–21. <http://cagricola.uclv.edu.cu>
- Mahato, S. K., Gurung, S., Chakravarty, S., Chhetri, B., & Khawas, T. (2016). An introduction to Pepino (*Solanum muricatum* Aiton): Review. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology (IJEAB)*, 1(2). www.ijeab.com
- Shiwanand Pandey. (2021). *Effect Of Different Concentrations Of Auxin, As Well As Cytokinin On Callus Induction, Shoot Formation And Root Development In Pepino (Solanum muricatum Ait.) cv. Valentia Under In-vitro condition* [Tesis Doctoral, Sardar Vallabhbhai Patel University of Agriculture & Technology Meerut-250110 (U.P.), India]. <https://journalajaar.com/index.php/AJAAR/article/view/513>
- Zamudio Solis, K. (2013). *Efecto del humus de lombriz sobre los esquejes y el desarrollo de la plántula de Nopal, Opuntia ficus-indica (L.) Miller* [Tesis de grado, Universidad Nacional Autónoma De México Facultad De Estudios Superiores Iztacala]. <https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000705899/3/0705899.pdf>

Degradación, lesiones y resistencia al desgarro de las películas de mantillo de bioplástico Mater-Bi y LDPE en el cultivo de frijol a gran altura

Einer Espinoza-Muñoz

Investigador y docente universitario de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo de Huaraz, Perú. Ingeniero Químico, campo de interés en investigaciones que ayuden a solucionar problemas ambientales en diferentes temas como contaminación minera, manejo de residuos sólidos, biopolímeros, evaluación de la calidad del agua, actividad turística e impacto ambiental y propuestas de mitigación.


eespinozam@unasam.edu.pe

 <https://orcid.org/0000-0002-7260-1142>

Juan F. Barreto

Ingeniero Agrónomo de profesión, especialista en suelos, con maestría en políticas sociales y mención en proyectos y programas sociales, con un doctorado concluido en Agricultura Sustentable (La Molina). Actualmente docente principal de la Facultad de Ciencias Agrarias de la UNASAM.


jbarretor@unasam.edu.pe

 <https://orcid.org/0000-0003-0940-6843>

Rosario Barra Zegarra

Químico, Master en ciencias. Especialidad en química orgánica. Docente de la Universidad Nacional "santiago Antúnez de Mayolo"


ibarraz@unasam.edu.pe

 <https://orcid.org/0000-0002-9153-0554>

Henry Garrido-Angulo

Doctor en Ciencias e Ingeniería de la Computación y de profesión Licenciado en Matemática, tiene experiencia en diversos estudios en decisiones multicriterio y problemática en glaciares de montaña en los Andes Peruanos. Tiene publicaciones de impacto en la problemática del riesgo de desastre entre el que resalta el estudio de vulnerabilidades en la Comunidad de Santa Cruz en Ancash.

hgarridoa@unasam.edu.pe

 <https://orcid.org/0000-0002-1541-2660>

RESUMEN

Este estudio evaluó las propiedades químicas (nivel de degradación) y físico-mecánicas (lesiones y resistencia al desgarro) del mantillo de bioplástico Mater-Bi y del LDPE (polietileno de baja densidad) aplicados en parcelas experimentales de cultivo de frijol canario. Ambos materiales fueron probados en condiciones de gran altitud (2800 m s. n. m.) en el Centro Experimental Ecológico Tuyu Ruri, valle interandino del Callejón del Huaylas, Perú. Se empleó un diseño experimental completamente al azar, con dos tratamientos y dos repeticiones (4 unidades experimentales). La evaluación duró 20 semanas. Se utilizó una escala del 9 al 1. Mater-Bi demostró una rápida degradación, con una calificación de 7 en la quinta semana y de 3 en la vigésima semana, con lesiones y agujeros predominantemente en las áreas expuestas a la luz solar directa y al viento con una calificación de 4 y una resistencia al desgarro con calificación de 3, lo que refleja su fragilidad progresiva a medida que avanzaba la degradación. Por el contrario, el LDPE permaneció intacto durante todo el período de cultivo, con lesiones físicas mínimas y alta resistencia a la degradabilidad y al desgarro. Estos hallazgos resaltan los posibles beneficios y limitaciones de los plásticos biodegradables para la agricultura sostenible a gran altura.

Palabras clave: degradación, lesiones, resistencia al desgarro, películas de bioplástico

Cómo citar este artículo: Espinoza-Muñoz, E., Barreto, J. F., Barra Zegarra, R., & Garrido-Angulo, H. (2025). Degradación, lesiones y resistencia al desgarro de las películas de mantillo de bioplástico Mater-Bi y LDPE en el cultivo de frijol a gran altura. *Aporte Santiaguino*, 18(1), 21–36. <https://doi.org/10.32911/as.2025.v18.n1.1229>

Recibido: 2025-03-17 | Aceptado: 2025-05-15

Degradation, damage and tear resistance of Mater-Bi bioplastic and LDPE mulch films in bean cultivation at high altitude

This study evaluated the chemical (degradation level) and physical-mechanical (damage and tear resistance) properties of Mater-Bi bioplastic mulch and LDPE (low-density polyethylene) mulch as applied in experimental plots of canary bean cultivation. Both materials were tested under high-altitude conditions (2800 masl) at the Tuyu Ruri Ecological Experimental Center, Callejón de Huaylas interandean valley, Peru. A completely randomized experimental design was used, with two treatments and two repetitions (4 experimental units), the evaluation spanned 20 weeks, rates on a scale from 9 to 1. Mater-Bi demonstrated rapid degradation, with a rating of 7 by the fifth week and 4 by the twentieth week, with lesions and holes predominantly in areas exposed to direct sunlight and wind rated 4, and tear strength rated 3, reflecting its progressive fragility as degradation progressed. In contrast, LDPE remained intact throughout the cultivation period, with minimal physical damage and high resistance to degradability and tearing. These findings highlight the potential benefits and limitations of biodegradable plastics for sustainable agriculture at high altitudes.

Keywords: degradation, damage, tear resistance, bioplastic mulch films

INTRODUCCIÓN

Los acolchados de mantillo se vienen aplicando en la producción de cultivos desde hace mucho tiempo (Zribi et al, 2011) cuando de forma natural se formaban los acolchados vivos en los cultivos y se sacaba provecho de ellos para reducir la pérdida de agua, la erosión y el control de malezas que compiten directamente con los cultivos (Hernández Sánchez, 2014).

La utilización de plásticos en la agricultura comenzó en los países desarrollados y ahora

está extendido también a los países en vías de desarrollo (Kasirajan & Ngouajio, 2012). El plástico (polietileno de baja densidad, LDPE) actualmente se usa en todo el mundo para proteger a los cultivos de condiciones de crecimiento desfavorables, tales como clima severo, insectos y aves. Las cantidades empleadas para todo uso son alarmantes, tal como refiere Espi et al. (2006). El uso del plástico común en la agricultura se ha expandido sustancialmente por todo el mundo en los últimos diez años debido a que las películas de polietileno son más baratas, fáciles de producir, altamente flexibles y duraderas (Somanathan et al., 2022). Las películas plásticas son una piedra angular en las prácticas agrícolas modernas, pero brindan múltiples beneficios, como una mejor regulación de la temperatura del suelo, la supresión de malezas y un mejor rendimiento de los cultivos (Menossi, 2021).

Sin embargo, la eliminación inadecuada de películas plásticas usadas ha provocado la contaminación del suelo y, por ende, la contaminación ambiental, como afirma Somanathan et al. (2022). El impacto ambiental a largo plazo causado por estos plásticos ha generado preocupación debido a su persistencia en el medio ambiente y su limitada reciclabilidad (Liu, 2022; Munhoz, 2024). El uso masivo de plásticos petroquímicos se ha convertido en un verdadero problema para la salud y el medio ambiente (Tiseo, 2022; Zoungran et al., 2020). Aquella solución fácil y barata se ha tornado en un verdadero problema especialmente para los suelos agrícolas de todas partes (López Falcón, 2002). Ante esta situación, se ha comenzado a desarrollar la tecnología de los plásticos biodegradables. Son materiales cuyas propiedades físicas y químicas se deterioran rápidamente cuando se exponen a los microorganismos debido a su capacidad para degradar, por completo, la mayor parte de los materiales orgánicos e inorgánicos, incluidos la lignina, el almidón, la celulosa y las hemicelulosas (Kale et al., 2015). El desarrollo de plásticos biodegradables y menos peligrosos representa, por tanto, una alternativa a los plásticos

petroquímicos (Zoungran et al., 2020). El aumento mundial de la contaminación plástica ha provocado un cambio hacia alternativas sostenibles en la agricultura, particularmente en el uso de materiales biodegradables. Los bioplásticos producidos a partir de materiales biobasados y materiales biodegradables tienen un gran potencial de ser compostables. El desarrollo reciente de tecnología, la innovación continua y el apoyo global, son importantes para comercializar y demostrar dichos materiales (Gloria, 2022).

Los bioplásticos como el de la marca Mater-Bi se han introducido como una alternativa ecológica porque se descomponen en condiciones naturales, reduciendo la acumulación de residuos en los suelos (Soulethone, 2020). De hecho, se sabe que varios tipos de microorganismos (aeróbicos, anaeróbicos, bacterias fotosintéticas, arqueas y eucariotas inferiores) en los suelos, son responsables del catabolismo de los bioplásticos (Accinelli et al., 2012; Kumaravel et al., 2010). pesar de estas ventajas, no se ha evaluado bien su rendimiento en condiciones ambientales específicas, incluidos entornos de gran altitud. La agricultura en estas altitudes presenta desafíos únicos, como el aumento de la radiación ultravioleta, las temperaturas fluctuantes y las variaciones en las condiciones atmosféricas y del suelo, que pueden afectar significativamente la degradación y la integridad mecánica de estos materiales (Lang, 2023). En consecuencia, este estudio tuvo como objetivo proporcionar información sobre el rendimiento comparativo de las películas de mantillo o acolchado Mater-Bi y LDPE en cultivos de frijol ubicados en ecosistemas altos (región quechua: 2300 a 3500 m s. n. m.), centrándose en sus propiedades de degradación, lesiones o daño físico y resistencia al desgarro.

MATERIALES Y MÉTODOS

El Centro Experimental Ecológico Tuyu Ruri (2800 m s. n. m.) en el valle del Callejón de Huaylas, Áncash, Perú, sirvió como sitio de estudio. El lugar experimenta temperaturas anuales moderadas (12–20 °C), humedad variable (50–85 %) y una importante exposición a los rayos UV, todo lo cual contribuye a las condiciones únicas de degradación de los plásticos agrícolas (Kijchavengkul, 2008; Lang, 2023). Las películas de mantillo probadas fueron: **Mater-Bi** (Marca comercial de polímero biodegradable de origen italiano, diseñado para aplicaciones agrícolas y conocido por su susceptibilidad a la degradación microbiana), **LDPE** (Película convencional de polietileno en base a petróleo de origen peruano, muy utilizado en la agricultura por su durabilidad mecánica y rentabilidad económica).

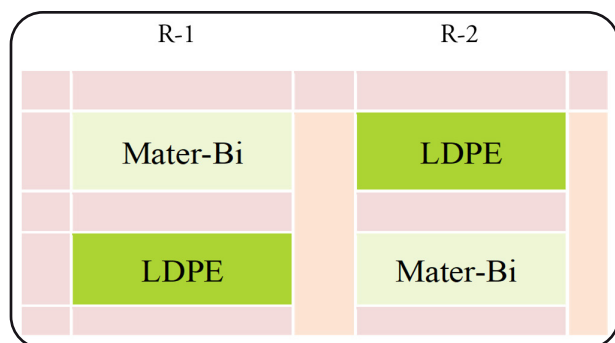
Los dos acolchados plásticos fueron de color negro, con 15 µm de espesor y 1 m de ancho, lo que garantizó propiedades físicas comparables para la configuración experimental. Luego de la preparación del terreno (deshierbo, desmenuzado y abonado), los plásticos se colocaron de forma manual encima de los camellones altos, extendiéndolos bien y asegurando sus bordes con tierra. En seguida, se realizaron las mediciones y se agujerearon los plásticos con círculos de 5 cm de diámetro para colocar las semillas de frijol, para lo cual se empleó una densidad de siembra de 60 x 35 cm (dos hileras cruzadas de 6 plantas cada una), utilizando el “método de las tres semillas” (tres semillas por agujero).

Se empleó un diseño experimental completamente al azar, con dos tratamientos y dos repeticiones, por lo que se utilizaron 4 unidades experimentales. La superficie de cada unidad experimental fue de 1.68 m² (parcelas pequeñas). El ciclo del cultivo duró 5 meses (de octubre de 2023 a febrero de 2024), iniciando con riego por gravedad y posteriormente la lluvia aportó la humedad requerida. La aleatorización efectuada del cultivo implicó la distribución aleatoria de los

tratamientos en cada repetición, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 1

Aleatorización de tratamientos y esquema experimental: Mater-Bi y LDPE



El diseño experimental permitió una evaluación adecuada de los parámetros de degradación, lesiones y resistencia al desgarro de las dos películas de mantillo:

Degradación: Proceso de degeneración, deterioro o desgaste de la película, medido a través de inspección visual y calificación en escala del 9 al 1 (9=intacto; 1=degradación completa).

Lesiones físicas: Presencia de desgarros, agujeros y fisuras que alteren el rendimiento de la película, calificadas de forma similar (9=sin lesiones; 1=número elevado de lesiones).

Resistencia al desgarro: Medida del aguante a la ruptura o estiramiento de la película, calificadas de forma similar a la degradación (9=muy fuerte; 1=extremadamente frágil).

Se registraron también como datos complementarios, la *temperatura del suelo* y las *condiciones climáticas* durante el ciclo del cultivo que es una estación lluviosa moderada/fuerte. La temperatura del suelo se midió durante tres días en diferentes horas del día (6 am, 1 pm y 6 pm), registrándose un promedio de 18,6°C en el suelo con tratamiento Mater-Bi y 19,2°C en el tratamiento con LDPE, las dos en igualdad

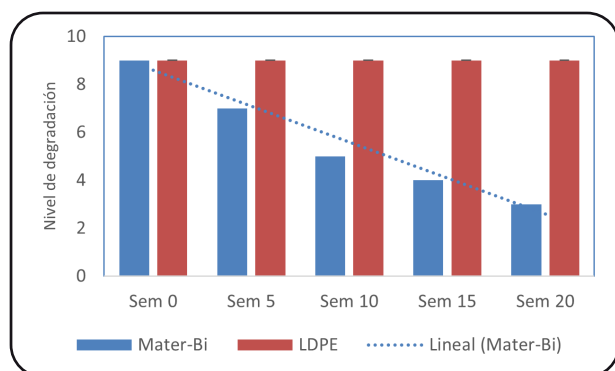
de condiciones. En el caso de las condiciones climáticas, se tomaron como referencia la data histórica de octubre de 2021 a febrero de 2022 (dos años antes del experimento) obtenidos de la estación meteorológica del mismo fundo, cuyos promedios/mes de los registros son: Precipitación 185,68 mm, Radiación solar 141,72 watts, Velocidad de viento 2,32 m/s, Humedad relativa 74,22 %, Temperatura media 6,24°C, Temperatura mínima -0,98°C y Temperatura máxima 16,38°C. Estos datos del clima se tomaron para monitorear cualquier evento climático anormal que pudiera tener influencia en el rendimiento del mantillo.

Para la recolección de datos se utilizaron diversas técnicas, como la observación directa, medición y conteo. Los instrumentos utilizados fueron la wincha, para medir longitudes y cuaderno, para registrar datos. Las técnicas de observación permitieron a los investigadores observar, registrar y analizar eventos de interés relacionados con los cultivos (Fagarasanu et al., 2002). Los datos recolectados fueron analizados mediante la prueba estadística no paramétrica de Mann-Whitney (U) a fin de comparar con un nivel de confianza del 95% las diferencias entre los niveles de degradación, lesiones físicas y resistencia al desgarro de los tipos de películas (Mater-Bi y LDPE). Adicionalmente, se calculó el tamaño del efecto (r) de Rosenthal, haciendo uso del Software Estadístico SPSS 27.

RESULTADOS

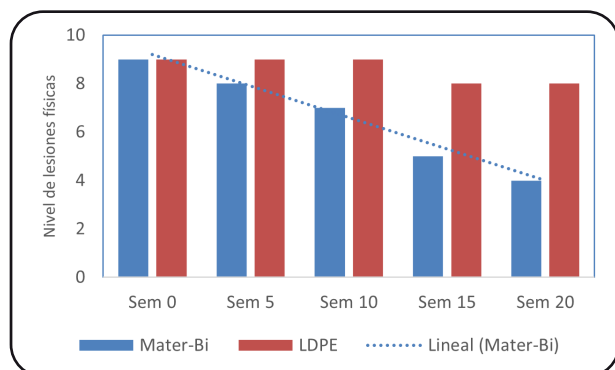
Los resultados de los parámetros de degradación, lesiones y resistencia al desgarro de las películas de mantillo para ambos tratamientos se presentan por cada cinco semanas, en las siguientes figuras:

Figura 2
Nivel de degradación según tipo de mantillo



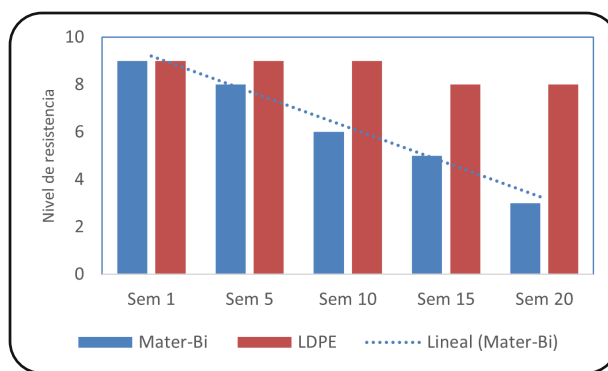
Respecto al nivel de degradación, la película de Mater-Bi se degradó rápidamente durante el período de cultivo, con puntuaciones que variaron desde 9 (colocación inicial) a 7 (semana 5), luego 5 (semana 10), a 4 (semana 15) y finalmente hasta 3 (semana 20). Por el contrario, el LDPE mantuvo una degradación estable de 9 durante el período de 20 semanas.

Figura 3
Lesiones físicas según tipo de mantillo



La película de Mater-Bi mostró un daño físico creciente con el tiempo, con puntuación inicial de 9, luego de 8 (semana 5) y finalmente a 4 (semana 20). La película de LDPE no mostró daño físico, con una ligera reducción en la puntuación (de 9 a 8) desde la colocación hasta la semana 20.

Figura 4
Resistencia al desgarro según tipo de mantillo



La resistencia al desgarro de Mater-Bi disminuyó significativamente, desde 9 en su colocación, luego a 8 (semana 5) y finalmente a 3 (semana 20). La película de LDPE se mantuvo prácticamente sin cambios durante las 20 semanas.

Figura 5
Imágenes de la evolución de la degradación, lesiones y resistencia al desgarro



Tabla 1*Resultados de los estadísticos de prueba*

	Mater-Bi	LDPE			
	Mdn (Rango)	Mdn (Rango)	U de Mann- Whitney	P	r de Rosenthal
Nivel de degradación	5.50 (6)	9.00 (0)	7.00	.000	-0.860
Lesiones físicas	7.00 (5)	9.00 (0)	24.00	.000	-0.675
Resistencia al desgarro	6.00 (6)	8.00 (1)	34.00	.002	-0.583

Los resultados del análisis comparativo y estadísticos de prueba para cada variable (nivel de degradación, lesiones físicas y resistencia al desgarro) entre Mater-Bi y LDPE se presentan en la Tabla 1, de donde se deduce que existen diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) en las variables evaluadas en estos dos tipos de mantillos; además, el tamaño del efecto ($r > 0.5$) evidencia que estas diferencias son grandes en todos los casos.

DISCUSIÓN

En la Figura 2 se aprecia que la película de Mater-Bi se degradó rápidamente durante el período de cultivo, con puntuaciones de degradación que variaron desde 9 (colocación inicial) a 7 (semana 5), luego 5 (semana 10), a 4 (semana 15) y finalmente hasta 3 (semana 20). Esta trayectoria de degradación es consistente con los hallazgos de Soulethone (2020), quien informó la descomposición acelerada de Mater-Bi bajo exposición microbiana y UV. La reducción gradual en la tasa de degradación después de la semana 10 podría atribuirse a la reducción de la actividad microbiana durante las temperaturas más frías y a la menor precipitación observada en la segunda mitad del ciclo de cultivo (Lang, 2023). Por el contrario, el LDPE mantuvo una puntuación de degradación estable de 9 durante el período de 20 semanas, lo que confirma su alta resistencia a los factores ambientales y su falta de biodegradabilidad. Esta durabilidad, si bien es ventajosa para un uso a largo plazo, genera preocupación con respecto a la contaminación del

suelo y del medio ambiente (Liu, 2022; Menossi, 2021).

Asimismo, como se aprecia en la Figura 3, la película de Mater-Bi exhibió un daño físico creciente con el tiempo, con puntuaciones que disminuyeron a partir de 9 en la colocación inicial, luego de 8 (semana 5) y finalmente a 4 (semana 20). Se observaron desgarros y agujeros predominantemente en las áreas expuestas a la luz solar directa y al viento, lo que enfatiza la vulnerabilidad del material a los factores estresantes ambientales (Chen, 2021). La película de LDPE mostró daño físico mínimo, con una ligera reducción en la puntuación (de 9 a 8) desde la colocación hasta la semana 20. Esta resiliencia subraya la superioridad mecánica del LDPE, particularmente en entornos agrícolas de alto estrés (Munhoz, 2024).

La resistencia al desgarro de la película de Mater-Bi, como se evidencia en la Figura 4, disminuyó significativamente, desde 9 en su colocación, luego a 8 (semana 5) y finalmente a 3 (semana 20), lo que refleja su fragilidad progresiva a medida que avanzaba la degradación. Osman (2022) reportó hallazgos similares y destacó la compensación entre la biodegradabilidad y la resistencia mecánica de los materiales poliméricos. La película de LDPE se mantuvo prácticamente sin cambios, lo que demuestra su robustez, pero plantea dudas sobre su sostenibilidad ambiental a largo plazo.

La rápida degradación de Mater-Bi ofrece importantes beneficios ambientales, particularmente en la reducción de la contaminación plástica del suelo. Sin embargo, su limitada durabilidad mecánica puede requerir reemplazos frecuentes, lo que aumenta los costos para los agricultores (Menossi, 2021; Soulethone, 2020). Por otro lado, la durabilidad del LDPE lo convierte en una opción rentable, pero exacerba la contaminación plástica, particularmente en regiones que carecen de una infraestructura adecuada para la gestión de residuos (Liu, 2022; Munhoz, 2024).

CONCLUSIONES

Mater-Bi demostró una rápida degradación, con una calificación de 7 en la quinta semana y de 3 en la vigésima semana, con lesiones y agujeros predominantemente en las áreas expuestas a la luz solar directa y al viento con una calificación de 4 y una resistencia al desgarro con calificación de 3, lo que refleja su fragilidad progresiva a medida que avanza la degradación.

Por el contrario, el LDPE permaneció intacto durante todo el período de cultivo, con lesiones físicas mínimas y alta resistencia a la degradabilidad y al desgarro. Estos hallazgos resaltan los posibles beneficios y limitaciones de

Las investigaciones futuras deberían centrarse en mejorar la durabilidad de los polímeros biodegradables manteniendo al mismo tiempo sus beneficios medioambientales. Además, la integración de nuevos bioplásticos con aditivos o nanomateriales de origen biológico puede proporcionar un camino prometedor para equilibrar la sostenibilidad y el rendimiento (Chen, 2021; Osman, 2022). Los estudios a largo plazo en diversas condiciones ambientales son esenciales para validar aún más estos hallazgos.

los plásticos biodegradables para la agricultura sostenible a gran altura.

Este estudio destaca las fortalezas y limitaciones de las películas de mantillo Mater-Bi y LDPE en la agricultura de gran altitud. Si bien Mater-Bi ofrece una solución ecológica, sus limitaciones mecánicas restringen su aplicabilidad a cultivos a corto plazo. El LDPE, aunque mecánicamente superior, plantea importantes desafíos ambientales debido a su no biodegradabilidad.

REFERENCIAS

- Accinelli C.; Saccà ML.; Mencarelli M. y Vicari A. (2012). Deterioro de las bolsas de bioplástico en el medio ambiente y evaluación de una nueva alternativa de reciclaje. *Quimiosfera*, 89(2), 136-143. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22717162/>
- Chen, J. (2021). Polymer materials in sustainable agricultural practices: A comprehensive review. *Chemical Engineering Journal*, 129639. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129639>
- Espi, E.; Salmerón, A.; Fontecha A.; García Y., & Real AI (2006). Plastic films for agricultural applications. *Journal of Plastic Film and Sheeting*, 22(2), 85–102 https://www.researchgate.net/publication/249358537_PLastic_Films_for_Agricultural_Applications
- Fagarasanu, M., & Kumar, S. (2002). Measurement instruments and data collection: A consideration of constructs and biases in ergonomics research. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 30(6), 355-369. [https://doi.org/10.1016/S0169-8141\(02\)00101-4](https://doi.org/10.1016/S0169-8141(02)00101-4)
- Gloria, B. (2022). Bioplásticos: Sustentabilidad Ambiental y Principales Tendencias. *Revista Tekhné-UCAB*, 25(3), 45-65. <https://revistasenlinea.saber.ucab.edu.ve/index.php/tekhne/article/view/5792>
- Hernández Sánchez, E. (2014). *Manual: Acolchados Vegetales y Películas Plásticas*. Universidad Tecnológica de Tula-Tepeji. <https://www.uttt.edu.mx/extensionismo/Informacion/Publicaciones/Serie.%20Agricultura%20Regenerativa/4.-Acolchados%20vegetales.pdf>
- Kale, S., Deshmukh, A., Dudhare, M., & Patil, V. (2015). Microbial degradation of plastic: a review. *J Biochem Tech*, 6(2), 952-961.
- Kasirajan, S., & Ngouajio, M. (2012). Polyethylene and biodegradable mulches for agricultural applications: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32,501–529. <https://link.springer.com/article/10.1007/s13593-011-0068-3>
- Kijchavengkul, T., & Auras, R. (2008). Compostability of polymers. *Chemosphere*, 71(3), 429–439. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.10.074>
- Kumaravel, S.; Hema R.y Lakshmi, R. (2010). Producción de polihidroxibutirato (Bioplástico) y su biodegradación por *Pseudomonas Lemoignei* y *Aspergillus Niger*. *Revista electrónica de química*, 7, 536-542. https://www.researchgate.net/publication/258377772_Production_of_Polyhydroxybutyrate_Bioplactic_and_its_Biodegradation_by_Pseudomonas_Lemoignei_and_Asperrgillus_Niger
- Lang, T., Zhang, Y., & Zhao, L. (2023). Degradation behavior of biodegradable mulches in varied agricultural environments. *Journal of Agricultural Science*, 19(12), 75–88. <https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.202212019>
- Liu, M., Wang, Y., & Zhou, Q. (2022). Environmental impacts of plastic mulch degradation and removal. *Journal of Hazardous Materials*, 129507. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129507>

- López Falcón, R. (2002). *Degradación del suelo: causas, procesos, evaluación e investigación*. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial. <http://www.serbi.ula.ve/serbiula/libros-electronicos/Libros/degradacion/pfd/librocompleto.pdf>
- Menossi, M., Martínez, C., & Pinto, A. (2021). Challenges of biodegradable plastics in modern agriculture. *Agronomy for Sustainable Development*, 41(85). <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00685-0>
- Munhoz, C., Silva, J., & Costa, R. (2024). Long-term environmental consequences of plastic mulch films in agriculture. *Science of the Total Environment*, 172175. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172175>
- Osman, A. (2022). Biodegradable polymers: Applications in agriculture. In *Sustainable Materials and Technologies* (pp. 242-260). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820352-1.00242-X>
- Somanathan H., Sathasivam R., Sivaram S., Mariappan Kumaresan S., Muthuraman M. S., & Park S. U. (2022). An update on polyethylene and biodegradable plastic mulch films and their impact on the environment. *Chemosphere*, 307(3). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135839>
- Soulenthone, J., & Delgado, A. (2020). Environmental degradation of biodegradable polymers: Case studies. *Polymer Degradation and Stability*, 182, 109335. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109335>
- Tiseo, I. (2022). *Annual production of plastics worldwide from 1950 to 2020*. <https://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950/>
- Zounggran, Y., Lynda, E., Dobi-Brice, K., Tchirioua, E., Bakary, C., & Yannick, D. (2020). Influence of natural factors on the biodegradation of simple and composite bioplastics based on cassava starch and corn starch. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. <https://www.growkudos.com/publications/10.1016%252Fj.jece.2020.104396/reader>
- Zribi, W., Faci, J. M., & Aragüés, R. (2011). Efectos del acolchado sobre la humedad, temperatura, estructura y salinidad de suelos agrícolas. *Información Técnica Económica Agraria*, 107(2), 148-162. https://www.researchgate.net/publication/267921237_Efectos_del_acolchado_sobre_la_humedad_temperatura_structura_y_salinidad_de_suelos_agricolas

Figura 5

Imágenes de la evolución de la degradación, lesiones y resistencia al desgarro



Rendimiento y contenido proteico de tres variedades de kiwicha bajo tres niveles de fertilización en Marcará, Áncash 2022

RESUMEN

Rhodes Mejia Valvas¹

rmejiav@unasam.edu.pe
<https://orcid.org/0000-0001-7856-7814>

Walter Vasquez Cruz¹

wvasquezc@unasam.edu.pe
<https://orcid.org/0000-0002-4605-2725>

Hugo Mendoza Vilcahuaman¹

hmendezav@unasam.edu.pe
<https://orcid.org/0000-0003-1544-3827>

Francisco Espinoza Montesinos¹

fespinozam@unasam.edu.pe
<https://orcid.org/0000-0003-3510-7812>

Clay Pajuelo Roldan¹

cpajueloro@unasam.edu.pe
<https://orcid.org/0000-0003-1450-7569>

Guillermo Castillo Romero¹

gcastillor@unasam.edu.pe
<https://orcid.org/0000-0002-6139-7465>

Teófanés Mejía Anaya¹

tmejiaa@unasam.edu.pe
<https://orcid.org/0000-0002-7332-4271>

José del Carmen Ramírez M.¹

jramirez@unasam.edu.pe
<https://orcid.org/0000-0001-8095-4661>

¹Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo - Huaraz - Perú.

Se evaluaron tres dosis de fertilización inorgánica (nitrógeno, fósforo y potasio) en el cultivo de Kiwicha (*Amaranthus caudatus* L.), con el objetivo de determinar el contenido de proteínas y el rendimiento en tres variedades: Oscar Blanco, Centenario y Caracino, bajo tres niveles de fertilización NPK (40-40-40; 100-90-60; 120-150-80). El diseño experimental consistió en bloques completos al azar con un arreglo factorial 3x3 y cuatro repeticiones. La fertilización se realizó en dos etapas: a los 30 y 60 días posteriores a la siembra. Los resultados mostraron que los tratamientos con dosis de fertilización 120-150-80 y 100-90-60, con rendimientos de 2415.40 y 2382.3 kg/ha, fueron los más efectivos, mientras que la dosis 40-40-40 alcanzó un rendimiento de 1909.9 kg/ha. En cuanto a las variedades, Oscar Blanco y Centenario no presentaron diferencias estadísticamente significativas en rendimiento, con 2408.10 y 2350.30 kg/ha, respectivamente, mientras que Caracino mostró un rendimiento significativamente inferior, alcanzando 1949.70 kg/ha. En cuanto al contenido de proteínas, Oscar Blanco y Centenario, con 14.88 % y 14.64 % de proteína, superaron significativamente a Caracino, que presentó un 13.59 %. Respecto a la altura de las plantas, Oscar Blanco y Centenario alcanzaron 1.15 m y 1.18 m, mientras que Caracino presentó la menor altura, con 1.04 m.

Palabras clave: kiwicha, cultivar, fertilización, rendimiento, *Amaranthus caudatus* L

Cómo citar este artículo: Mejia Valvas, R., Vasquez Cruz, W., Mendoza Vilcahuaman, H., Espinoza Montesinos, F., Pajuelo Roldan, C., Castillo Romero, G., Mejía Anaya, T., & Ramírez Maldonado, J. del C. (2025). Rendimiento y contenido proteico de tres variedades de kiwicha bajo tres niveles de fertilización en Marcará, Ancash 2022. *Aporte Santiaguino*, 18(1), 37–48. <https://doi.org/10.32911/as.2025.v18.n1.1231>

Recibido: 2025-03-17 | Aceptado: 2025-05-15

Yield and protein content of three kiwicha varieties under three fertilization levels in Marcará, Áncash 2022

Three doses of inorganic fertilization (nitrogen, phosphorus and potassium) were evaluated in the Kiwicha (*Amaranthus caudatus* L.) crop, with the aim of determining the protein content and yield in three varieties: Oscar Blanco, Centenario and Caracino, under three NPK fertilization levels (40-40-40; 100-90-60; 120-150-80). The experimental design consisted of randomized complete blocks with a 3x3 factorial arrangement and four replications. Fertilization was carried out in two stages: 30 and 60 days after planting. The results showed that treatments with fertilization doses 120-150-80 and 100-90-60, with yields of 2415.40 and 2382.3 kg/ha, were the most effective, while the 40-40-40 dose reached a yield of 1909.9 kg/ha. As for the varieties, Oscar Blanco and Centenario did not present statistically significant differences in yield, with 2408.10 and 2350.30 kg/ha, respectively, while Caracino showed a significantly lower yield, reaching 1949.70 kg/ha. In terms of protein content, Oscar Blanco and Centenario, with 14.88 % and 14.64 % protein, significantly surpassed Caracino, which presented 13.59 %. Regarding the height of the plants, Oscar Blanco and Centenario reached 1.15 m and 1.18 m, while Caracino presented the lowest height, with 1.04 m.

Keywords: kiwicha, cultivar, fertilization, yield, *Amaranthus caudatus* L

INTRODUCCIÓN

La kiwicha, también conocida como amaranto (*Amaranthus caudatus* L.), es un grano que forma parte del conjunto de cultivos tradicionales andinos. El género *Amaranthus* tiene un origen diverso, ya que está compuesto por tres especies utilizadas para obtener granos. Por un lado, *Amaranthus cruentus* proviene de Guatemala y del sureste mexicano, *Amaranthus hypochondriacus* es nativo de México y *Amaranthus*

caudatus se originó en la zona andina de Sudamérica, donde se extiende desde el norte de Colombia hasta Argentina (Miranda et al., 2023). Las variedades Óscar Blanco y Noel Vietmeyer fueron obtenidas mediante la combinación de ecotipos con alto rendimiento productivo. En la actualidad, el mejoramiento continuo de estos ecotipos ha permitido el desarrollo de nuevas variedades, tales como INIA 414-Taray, INIA 442-La Frondosa, entre otras (Mejía et al., 2020). La kiwicha en Áncash está siendo encaminado por organizaciones que están presentes en las provincias de Yungay y Huaylas, tal es el caso de PRISMA, que fomentó este cultivo en los años 2010 promocionando la cadena de valor de la kiwicha. Logró instalar 505 has y organizar 343 productores de kiwicha y gracias a ello en las zonas mencionadas se logró una agricultura sostenible (Mejía et al., 2020). En el año 2014, en el departamento de Áncash se reportó la siembra de 370 hectáreas de cultivo, con un rendimiento promedio de 1,638 kilogramos por hectárea, lo que resultó en una producción total de 606 toneladas (Mamani & Quispe, 2017).

La kiwicha o amaranto (*Amaranthus caudatus*) es un pseudocereal andino de alto valor nutricional. Destaca por su contenido de proteína de alta calidad (13–16 %), rica en lisina, un aminoácido esencial poco presente en otros cereales. Contiene aproximadamente 370–390 kcal por cada 100 g, junto con carbohidratos complejos (60–65 %), grasas saludables (6–8 %), y una buena cantidad de fibra dietética. Además, es fuente importante de minerales como calcio, hierro, magnesio y fósforo, así como vitaminas del complejo B y vitamina E. Libre de gluten, la kiwicha es ideal para dietas celíacas y se asocia con beneficios para la salud cardiovascular, digestiva e inmune gracias a sus antioxidantes y compuestos bioactivos (Ministerio de Agricultura y Riego, 2018).

Con respecto a la fertilización, bajo un contexto de agricultura convencional en la sierra, la dosis óptima de fertilización para kiwicha

(*Amaranthus caudatus*) suele variar según el tipo de suelo, el clima y la variedad de kiwicha cultivada, pero en general, se recomienda una fertilización NPK (Nitrógeno, Fósforo y Potasio) de 120-100-80 kg/ha. Esto significa que se deben aplicar 120 kg de nitrógeno, 100 kg de fósforo y 80 kg de potasio por hectárea (Mejía et al., 2022).

El Perú es uno de los países que se posiciona en la producción de kiwicha de calidad, que tiene contenidos altos de proteína (12,5 % y 17,6 %). También tiene una concentración alta de aminoácidos y contribuye a su digestibilidad proteica, la cual es muy alta, alcanzando entre el 80 % y el 92 % (Mamani & Quispe, 2017). Por tales razones, la presente investigación tiene como objetivo evaluar el nivel de proteína y el rendimiento de la kiwicha (*Amaranthus caudatus* L)

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se ejecutó en las instalaciones del Centro de Investigación y Experimentación de Allpa Rumi, ubicado en el distrito de Marcará, provincia de Carhuaz, Región Áncash (9°19'37.83" latitud sur y 77°36'23.14" longitud oeste) desde marzo hasta julio del 2018. Se inició con la toma de muestra del suelo para su análisis. Los resultados del análisis de fertilidad se contrastaron con las siguientes características: el suelo fue del tipo franco con pH fuertemente ácido (4.84), conductividad eléctrica (CE) 122 mS/cm no salino, bajo en materia orgánica 1,416 %, alto en P disponible (18 ppm), bajo en K (76 ppm) y capacidad de intercambio catiónico (CIC) de 11,61.

Posteriormente, se trabajó en una parcela que fue aleatorizada en cuatro bloques de 3.2 m x 4.5 m. Estos bloques contenían 4 surcos a una distancia de 80 cm. En cada surco se esparcieron semillas de kiwicha de las variedades Oscar Blanco, Centenario y Caracino, a chorro continuo. El raleo se realizó cuando las plantas tenían en promedio 8 cm de altura, dejando 30 plantas, quienes se

distribuyeron en quince golpes. Cada golpe tuvo una distancia de 30 cm. Después de instalado el experimento, se regó por gravedad, cada 7 días hasta la culminación del experimento. Asimismo, se fertilizó en dos momentos, a los 30 y 60 días después de la siembra, para lo cual se empleó la dosis de 120-150-80, 100-90-60 y 40-40-40 para las tres variedades en estudio. En la primera fertilización se usó el 50 % de nitrógeno, 100 % de fósforo y 100 % de potasio. El faltante 50 % de nitrógeno se aplicó en la segunda fertilización, el cual se realizó a los 60 días después de la siembra.

En el proceso del manejo agronómico del cultivo, se presentaron algunas plagas como *Epicauta* sp. y *Diabrofia viridula*, que se controlaron con Methomil (2 aplicaciones) y el crecimiento de maleza conocida como yugo (*Amaranthus hybridus* L.) se controló manualmente. La cosecha se realizó a los 5 meses después de la siembra, cuando los granos presentaban madurez.

Las variables que se evaluaron fueron los siguientes:

- Longitud de tallo: Se escogió al azar 10 plantas de los surcos centrales, descartando por efecto de borde los surcos extremos. Se midió la longitud del tallo desde la base hasta la hoja terminal del ápice del tallo haciendo uso de la wincha (Castro et al., 1997).
- Rendimiento de semillas frescas: Se extrajo al azar 10 plantas, cuando el cultivo alcanzó la madurez de la panoja en un 90 % aproximadamente. En la cosecha, las plantas se cortaron para luego ser expuestas al sol por un periodo de 5 días. Posteriormente, se obtuvieron las semillas por aplastamiento manual y a continuación por tamizado para separar las semillas libres de restos de panoja. Por último, se realizó el pesado haciendo uso de la balanza (Castro et al., 1997).
- Determinación de proteínas totales: Se pesaron 15 gramos de semillas secas, las cuales fueron transferidas a un vaso precipitado con 200 ml de

agua potable. Luego, se sometieron a un proceso de cocción durante 30 minutos. Tras este tiempo, se dejó enfriar durante 15 minutos y se realizó el decantado del agua de ebullición. El sedimento, compuesto por las semillas cocidas, se suspendió en 200 ml de NaHCO₃ 0.4 M (pH 9.0) y se trituró durante 3 a 5 minutos. Posteriormente, la mezcla se sometió a centrifugación en dos fases. La concentración de proteínas se determinó mediante lecturas de absorbancia a una longitud de onda de 540 nm, utilizando un espectrofotómetro

Spectronic 20 Milton Roy. La concentración de proteínas se calculó empleando el método calorimétrico de Biuret, según laboratorios Wiener (Wiener, 2000).

Se trabajó con un diseño de bloques completos al azar, con arreglo factorial del tipo 3A3B, con 9 tratamientos, 4 repeticiones y 36 parcelas (Tabla 1). Para la comparación de medias se empleó la prueba de comparación de medias de Duncan con un nivel de significación del 5 %.

Tabla 1

Variedades y dosis de fertilización para el experimento

Cultivares de kiwicha	Dosis de fertilización (N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)		
	40-40-40 (f1)	100-90-60 (f2)	120-150-80 (f3)
Oscar blanco (v1)	T1	T2	T3
Centenario (v2)	T4	T5	T6
Caracino (v3)	T7	T8	T9

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las variables ‘altura de planta’, ‘rendimiento’ y ‘contenido de proteínas’ resultaron significativas ($\alpha = 0.05$) en cuanto a los niveles de la variedad y los niveles de fertilización. Asimismo, la interacción de los dos factores resultó no significativo ($\alpha = 0.05$), el cual es un indicativo de que los efectos de cada factor fueron independientes y no fue necesario realizar el análisis de efectos simples (Tabla 2).

Tabla 2

Cuadrados medios, significancia y coeficientes de variación (CV) de rendimiento (Ka ha -1), altura de planta (m) y contenido de proteína (%)

Variables	Cuadrado de Medios							C.V. (%) [*]
	Bloque	Variedad(V)	Fertilización (F)	VXF	Error			
Rendimiento	318739.04	747659.06	* 960421.10	* 8653.94	* 76191.22			12.34
Altura de planta	0.000818	0.067453	* 0.045219	* 0.000461	* 0.006847			7.38
Proteína de grano (%)	11.48	5.61	* 11.04	* 1.70	n.s. 1.47			6.97

^{*}, significativo con $P \leq 0.05$, ns: no significativo, CV: coeficiente de variación

Los coeficientes de variación de las variables ‘rendimiento’, ‘altura de planta’ y ‘porcentaje de proteína’ fueron de 12.34 %, 7.38 % y 6.97 %, respectivamente, que da la confiabilidad de resultados. Según Calzada (1977) el coeficiente de variabilidad no debe de exceder al 20 % para que sean confiables.

- **Altura de planta (m)**

En la Tabla 3, se presenta la prueba de comparación de medias de Duncan ($\alpha = 0.05$) para la altura de planta de los tres cultivares estudiados de kiwicha. Se encontró que, entre la variedad Oscar blanco y Centenario, no existe diferencias estadísticas, pues obtuvieron 1.15 m y 1.18 m. Del mismo modo, se observa que el cultivar Caracino es el que obtuvo menor tamaño (1.04 m).

Tabla 3

Medias de altura de planta, rendimiento y porcentaje de proteína de las variedades

Tratamiento	Altura de planta (m)	Rendimiento Kg ha ⁻¹	Proteína grano (%)
Oscar blanco	1.15 a	2408.10 a	14.88 a
Centenario	1.18 a	2350.30 a	14.64 a
Caracino	1.04 b	19.49 b	13.59 b

Los datos observados para altura de planta en las dosis de fertilización evaluadas variaron de 1.05 m a 1.17 m. El dato más alto y estadísticamente igual correspondió a los niveles 120-150-80 y 100-90-60, quienes alcanzaron 1.17 m y 1.14. El peor tratamiento fue la dosis 40-40-40, con 1.05 m de elevación de planta.

Tabla 4

Medias de rendimiento, altura de planta y porcentaje de proteína de las variedades

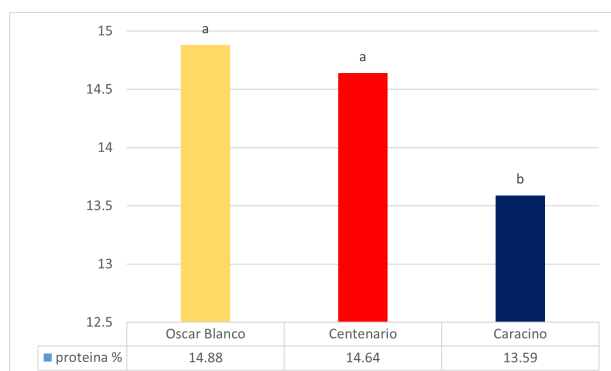
Tratamiento	Altura de planta (m)	Rendimiento Kg ha ⁻¹	Proteína grano (%)
F3 (120-150-80)	1.17 a	2415.40 a	14.97 a
F2 (100-90-60)	1.14 a	2382.30 a	14.88 a
F1 (40-40-40)	1.05 b	1009.90 b	13.26 b

El resultado más bajo correspondió a las dosis 40-40-40 de NPK y el superior a las dosis 120-150-80 y 100-90-60 de NPK. Estos resultados, en promedio de las variedades, no difieren estadísticamente de acuerdo a la prueba de comparación de medias de Duncan ($\alpha = 0.05$).

- **Proteína del grano (%)**

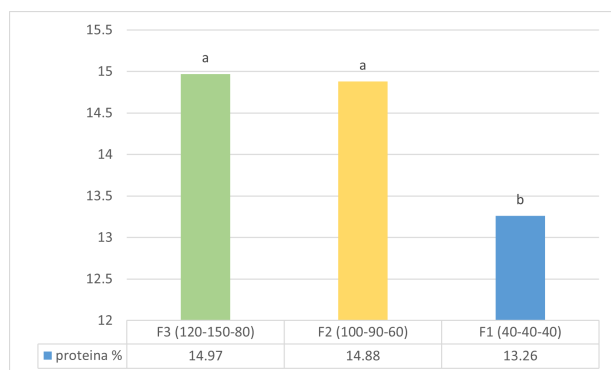
El resultado de contenidos de proteína para las variedades (Tabla 3) de los granos obtuvo un rango de 13,59 a 14,88 %, correspondiendo al valor más alto y estadísticamente igual a las variedades Oscar Blanco y Centenario, con 14,88 % y 14,64 % de proteína. Estas variedades superaron estadísticamente a la variedad Caracino, con 13,59 %. Estos resultados fueron obtenidos de la prueba de comparación de medias de Duncan ($\alpha = 0.05$).

Figura 1
Contenido de proteínas en las variedades



También en la Tabla 3 se presentan los datos de contenidos de proteína de granos de los niveles de fertilización. La prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$) muestra que no existen diferencias estadísticas entre las dosis 120-150-80 y 10-90-60, quienes obtuvieron 14.97 y 14.88 % de proteína. Asimismo, las dosis 40-40-40 con 13.26 % de proteína fue el peor tratamiento.

Figura 2
Contenido de proteínas en las dosis de fertilización



- **Rendimiento de granos (kg/ha)**

El rendimiento de grano varió entre 1949.70 y 2408.10 kg/ha. Según la prueba de comparación de medias de Duncan ($\alpha = 0.05$), no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre las variedades Oscar Blanco y Centenario, que registraron rendimientos de 2408.10 y 2350.30 kg/ha, respectivamente. Por otro lado,

el cultivar Caracino presentó un rendimiento estadísticamente inferior, alcanzando 1949.70 kg/ha. León y Rossel (2007) señalan que, bajo condiciones de manejo y fertilización óptimos, las variedades Oscar Blanco y Centenario pueden llegar a rendir entre 3 y 5 toneladas por ha.

Una posible limitante para alcanzar estos rendimientos es la calidad del suelo en el centro de investigación y experimentación de Allpa Rumi, ya que se trata de suelos superficiales y con baja cantidad de materia orgánica. Además, el cultivar Caracino no alcanza todo su potencial, lo cual podría estar relacionado con su origen en Caraz, Áncash, donde el clima es más cálido en comparación con el lugar de ejecución de este estudio.

En la Tabla 4 se presentan los datos de rendimiento según las dosis de fertilización aplicadas. La prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$) muestra que no existen diferencias significativas en el rendimiento de grano entre los tres niveles de fertilización evaluados: 120-150-80 y 100-90-60, con rendimientos de 2415.40 y 2382.3 kg/ha, respectivamente. En cambio, la dosis 40-40-40 alcanzó un rendimiento de 1909.9 kg/ha. Según los resultados obtenidos, se puede inferir que, a medida que aumenta la dosis de fertilización, también aumentan los rendimientos; sin embargo, al llegar a dosis más altas, los rendimientos tienden a estancarse. La fórmula de fertilización 100-90-60 de NPK reporta un rendimiento promedio de 3040 kg/ha para las variedades Oscar Blanco y Centenario. En contraste, Romero (2001) reporta un rendimiento de 2729 kg/ha para la variedad Oscar Blanco en la comunidad de Mato, con una dosis de 120-80-60. Por otro lado, Henostroza (2010), utilizando 12 toneladas de materia orgánica y un 6 % de microorganismos eficaces, encontró el mayor rendimiento con 2495.91 kg/ha en la variedad Oscar Blanco, sugiriendo que el uso de materia orgánica mejora las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos.

CONCLUSIONES

La aplicación de los niveles de fertilización aumentó el rendimiento y el porcentaje de proteína en los cultivares de kiwicha. Los cultivares Oscar blanco y centenario alcanzaron mayor rendimiento y porcentaje de proteína, independientemente de los niveles de fertilización inorgánico. Los niveles de fertilización 120-150-80 y 100-90-60 obtuvieron los mejores rendimientos y calidad de los granos, independientemente de los cultivares evaluados. La menor dosis de fertilización desarrolló un menor rendimiento y calidad proteica de los granos. Para condiciones desarrolladas en esta investigación, el comportamiento de los cultivares y los niveles de fertilización fueron independientes.

AGRADECIMIENTOS

En memoria de los colegas fallecidos por el Covid 19: Leopoldo Mejía Valvas y Francisco

Espinoza Montesinos, quienes participaron activamente en la ejecución de este proyecto.

REFERENCIAS

- Mamani, Y., & Quispe, M. (2017). *Efecto de la calidad proteica de la mezcla de harinas de kiwicha germinada y garbanzo (2:1) en la recuperación nutricional y en los diversos órganos en ratas albinas inducidos a desnutrición, Arequipa 2016* [Tesis para optar el Título Profesional de Licenciado en Nutrición Humana, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. <https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/147be7ce-75d1-4319-a001-e80adcc67ce0/content>
- Mejía, R., Gómez L., Pinedo, R., Mendoza, H., & Pajuelo, C. (2020). Niveles de fertilización inorgánica en tres variedades de kiwicha (*Amaranthus caudatus* L.) en Áncash, Perú. *IDESIA*, 38(1): 75-84. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292020000100075>
- Mejía, R.L. (2020). *Sostenibilidad de las unidades de producción de kiwicha (Amaranthus Caudatus L.) en las provincias de Yungay, Huaylas y Carhuaz, Áncash* [Tesis de doctorado, Universidad Agraria la Molina]. hdl.handle.net
- Mejía-Valvas, R., Mendoza-Vilcahuaman, H., Gomez-Pando, & Pinedo-Taco (2022). Comportamiento agronómico y calidad de kiwicha (*Amaranthus caudatus* L.) en función del cultivar y la dosis de fertilización. *Research Gate*, 40(1), 87-94. <https://www.researchgate.net/publication/362259146> Comportamiento agronomico y calidad de kiwicha *Amaranthus caudatus* L en funcion del cultivar y la dosis de fertilizacion.
- Ministerio de Agricultura y Riego [MIDAGRI] (2018). *Tablas peruanas de composición de alimentos*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/ <https://repositorio.ins.gob.pe/server/api/core/bitstreams/2ee9e34b-d816-4f34-8fb9-81ae3b0fd3e5/content>
- Miranda, L., Huillca, J., & Marques-Pérez, I. (2023). El cultivo reciente de kiwicha (*Amaranthus caudatus* L.) en el Perú: expansión de producción y comercialización. *AGROALIMENTARIA*, 30(58), <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/9563706.pdf>

Tiempos improductivos en el proceso de minado de la Compañía Minera “AC Agregados S.A.” Unidad Arequipa M


RESUMEN

Manuel Rashta Lock

Docente nombrado de la Facultad de Ingeniería de Minas y Geología

Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo - Huaraz - Perú.

mrashstal@unasam.edu.pe

 <https://orcid.org/0009-0002-9659-153X>

El objetivo del estudio fue determinar los tiempos improductivos aplicando herramientas estadísticas en el proceso de minado en la Compañía Minera “AC Agregados S.A.” Unidad Arequipa M. Es una investigación descriptiva, con diseño no experimental, transversal. La población estuvo conformada por 16 trabajadores que laboran dentro del proceso de minado de la compañía. Se utilizó la técnica de la observación y como instrumentos el cronómetro, la ficha de control de tiempos y el tablero de observaciones. Los resultados muestran tres tipos tiempo en la duración del turno de trabajo: a) Tiempo improductivo (36 %); b) Tiempo productivo (56%) y c) Tiempo autorizado (8 %). Se concluye que la Compañía Minera “AC Agregados S.A.” - Unidad Arequipa M presenta un 36 % de tiempos improductivos en sus operaciones. De este total, tres actividades clasificadas como de bajo valor agregado concentran el 85 % del tiempo improductivo. Se concluye que la Compañía Minera “AC Agregados S.A.” - Unidad Arequipa M cuenta con 36 % de tiempos improductivos, de los cuales tres actividades (pocos vitales) representan el 85% de las actividades improductivas y cuatro actividades triviales o sin importancia, ocasionados por la falta de estándares de trabajo de cada tarea u operación unitaria y estudio de métodos.

Palabras clave: tiempo improductivo, tiempo productivo, tiempo autorizado, minería

Cómo citar este artículo: Rashta Lock, M. (2025). Tiempos improductivos en el proceso de minado de la Compañía Minera “AC Agregados S.A.” Unidad Arequipa M: Comparative yield and protein levels of three varieties of kiwicha (*Amaranthus caudatus*) under the effect of three fertilization levels in the town of Marcará, Carhuaz - Ancash 2018. *Aporte Santiaguino*, 18(1), 49–66. <https://doi.org/10.32911/as.2025.v18.n1.1234>

Recibido: 2025-03-17 | Aceptado: 2025-05-15

Non-productive times in the mining process of the Mining Company “AC Agregados S.A.” Arequipa M Unit

The objective of the study was to determine non-productive times by applying statistical tools in the mining process at the “AC Agregados S.A.- Unidad Arequipa M Mining Company. It is a descriptive-explanatory research, with a non-experimental, cross-sectional design. The population was made up of 16 workers who work within the company’s mining process. The technique of observation and timing was used. The instruments were the stopwatch, the time control sheet and the observation board. The results show three types of time in the duration of the work shift: a) Unproductive time (36%); b) Productive time (56%) and c) Authorized time (8%). It is concluded that Compañía Minera “AC Agregados S.A.” – Unidad Arequipa M has 36% of non-productive times in its operations. Of this total, three activities classified as low value-added account for 85% of non-productive time. It is concluded that the Mining Company “AC Agregados S.A.C.-Unidad Arequipa M” has 36% of non-productive times, of which three activities (few vital) represent 85% of the unproductive activities and four trivial or unimportant activities, caused by the lack of work standards of each task or unitary operation and study of methods.

Keywords: downtime, uptime, authorized time, mining

INTRODUCCIÓN

Los tiempos improductivos son aquellos donde no se ejerce ningún acto de producción, es decir, momentos donde no hay actividad de trabajos, ya sea, por ineficiencia de los operadores, fallas repentinas de los equipos, temas logísticos o de mantenimiento. En minería, el tiempo improductivo se refiere a cualquier período en el que los recursos (equipos, trabajadores, etc.) no están siendo utilizados para la producción

directa de minerales. Este tiempo puede incluir paradas de equipos (malos mantenimientos, fallas mecánicas o necesidades de repuestos que detienen la producción), demoras en el transporte (tráfico, problemas en las vías de acceso o falta de personal para la gestión del transporte), tiempo de espera (carga de equipos, a espera de personal, o de permisos para comenzar una actividad), tiempo de inactividad de los trabajadores (ausencias no justificadas, descanso no planeado o falta de trabajo disponible), reuniones no relacionadas directamente con la producción (si las reuniones no llevan a resultados concretos, pueden considerarse tiempos improductivos).

En la minería, la eficiencia de los procesos productivos depende fundamentalmente de la identificación y eliminación de los tiempos improductivos (Oscátegui & Flores, 2023), entendidos como aquellos periodos en los que no se genera valor agregado debido a causas atribuibles tanto al trabajador (ausencias, ritmo lento, reprocesos) como a la dirección (falta de estandarización, diseños inadecuados, planificación deficiente) (Caso, 2006). La identificación de factores determinantes de los tiempos improductivos y proceder con su corrección, contribuye con la mejora de los tiempos operativos. Como consecuencia, se disminuye los tiempos de demora y se mejora la eficiencia en la ejecución del proceso en mina (Oscátegui & Flores, 2023).

El Estudio de Tiempos, según la Organización Internacional del Trabajo (1996), consiste en medir el tiempo y ritmo de cada elemento de una tarea bajo condiciones establecidas, con el fin de establecer normas de ejecución y detectar cuellos de botella que estén afectando la producción. Complementariamente, la Medición del Trabajo busca cuantificar el contenido de trabajo de un método definido, de modo que, al analizar el tiempo improductivo, se puedan diseñar acciones concretas para minimizarlo o eliminarlo (Caso, 2006).

Diversos estudios se han realizado sobre el uso del tiempo en operaciones mineras. En la mina Retamas (Pataz, Perú), Acuña (2023) identificó que solo el 50 % y 47 % del tiempo en los turnos nocturno y diurno, respectivamente, correspondía a trabajo efectivo, recomendando reducir tiempos de espera y charlas de seguridad, que sumaban en promedio 45 min de los 71 min no productivos. Asimismo, Oscátegui y Flores (2023) identificaron que las mayores pérdidas de tiempo en el proceso de carguío y acarreo se concentran en tres etapas clave. La primera corresponde al tiempo de carga del mineral, donde se generan colas de espera por parte de los volquetes, consumiendo un promedio de 1,5 minutos, lo que representa el 5,82 % del tiempo total del ciclo. La segunda etapa crítica es el tiempo de acarreo, que requiere aproximadamente 8 minutos, equivalentes al 35,87 % del tiempo del ciclo. Finalmente, el tiempo de descarga del mineral acarreado demanda 1 minuto por volquete, lo que representa el 4,48 % del total del ciclo operativo. Estos resultados evidencian cuellos de botella que, de ser optimizados, podrían mejorar significativamente la eficiencia del proceso. Por su parte, Yarleque (2018) documentó en la Unidad Salinas de Arequipa una utilización de equipos de extracción y acarreo (49,7 %–76,3 %) muy inferior a su disponibilidad técnica (> 94 %), atribuyendo este desfase principalmente a paradas operacionales. Apaza (2017), en Minera Shahuindo (Trujillo), aplicó un plan de mejora continua que redujo los retrasos en carguío en un 65,6 % y en acarreo en un 47,8 %, lo cual incrementó la producción de mineral hasta en un 67,6 % respecto al stockpile planificado. Asimismo, Arriel et al. (2016) emplearon la metodología Lean Mining en la mina subterránea Cerro Lindo (Milpo), hallando que los tiempos improductivos representaban hasta el 25 % en perforación de taladros largos y el 11,1 % en carguío y acarreo, lo que permitió priorizar intervenciones de optimización.

Pese a estos avances de investigación sobre tiempo improductivo en operaciones mineras,

existe una laguna de conocimiento en torno al análisis estadístico de los tiempos improductivos en empresas de mediana escala del sur del Perú que combinan mecanización con mano de obra directa. En particular, no se han documentado estudios sistemáticos que cuantifiquen y clasifiquen los tiempos improductivos en la Compañía Minera "AC Agregados S.A." – Unidad Arequipa M, lo cual impide conocer con precisión los cuellos de botella operativos y diseñar estándares de trabajo adaptados a su realidad.

Por lo tanto, el presente estudio se propuso determinar los tiempos improductivos aplicando herramientas estadísticas en el proceso de minado en la Compañía Minera "AC Agregados S.A." Unidad Arequipa M, que se desglosó en los siguientes objetivos específicos: OE1.- Determinar las principales causas de los tiempos improductivos en el proceso de minado de la Compañía Minera "AC Agregados S.A." - Unidad- Arequipa M; OE2. Determinar en qué etapa se dan los tiempos improductivos en el proceso de minado de la Compañía Minera "AC Agregados S.A." -Unidad Arequipa M. OE3. Determinar las acciones que reducirían los tiempos improductivos en el proceso de minado de la Compañía Minera "AC Agregados S.A." -Unidad Arequipa M.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación realizada en este trabajo es descriptiva. La muestra se conformó con todo el personal de los dos turnos de trabajo de las operaciones unitarias (16 cuadrillas por dos turnos) de la Compañía Minera "AC Agregados S.A." -Unidad Arequipa M. Para el recojo de información de los procesos y actividades del trabajo *in situ*, se utilizó la técnica de la observación y para establecer los tiempos de duración de las actividades de cada operación unitaria, con la finalidad de establecer los cuellos de botella o tiempos improductivos y, además, para establecer un tiempo tipo o estándar que establezca la duración de cada una de las operaciones unitarias que se realizan en la mina, se utilizó la técnica

del cronometraje. Se siguió los pasos establecidos por Ortiz (1999) para un estudio de tiempo por cronómetro:

1. Se seleccionó un trabajador promedio, es decir, ni el más experto ni el más inexperto.
2. Se determinó el ciclo de trabajo (tarea a cronometrar).
3. Se dividió el ciclo de trabajo en elementos, identificando claramente momentos de inicio y de finalización.
4. Se determinó el número de ciclos (observaciones) a registrarse para contar con información suficiente para obtener una estimación más confiable de la duración de la tarea.
5. Se registró los datos.
6. Se calculó el promedio del tiempo observado.
7. Se calculó el tiempo normalizado por elemento.
8. Se asignó suplementos y se obtuvo el tiempo tipo.

A continuación, se describe los instrumentos utilizados en la investigación:

- a) Cronómetro mecánico acumulativo. - Se empleó para registrar el tiempo transcurrido en las distintas etapas del trabajo en la mina, permitiendo acumular los intervalos medidos y calcular así el tiempo total invertido en cada jornada operativa.
- b) Ficha de Control de Tiempos (Hoja de recopilación de datos). - Se utilizó para recoger información de los tiempos de cada actividad.
- c) Tablero de observaciones. - Es un tablero liso (triplay acrílico o plástico) de tamaño A4. Se usó para fijar los formularios y anotar las observaciones.

El estudio de tiempos es una técnica de medición del trabajo, empleada para registrar los tiempos y ritmos del trabajo correspondientes a los elementos de una tarea definida.

Los tiempos que se tomaron antes y durante las operaciones son dos:

- Tiempo en el cronómetro (TC): son las lecturas del cronómetro.
- Tiempo observado (TO): Es la diferencia en los tiempos entre lecturas sucesivas del cronómetro.

El procedimiento que se aplicó para tomar el tiempo con cronómetro fue el cronometraje acumulativo. Se registraron tiempos continuos. Es decir, el reloj funcionó de modo ininterrumpido durante todo el estudio. Se puso en marcha al inicio del primer elemento (inicio de guardia) del ciclo y no se detuvo hasta que acabó el estudio (término de la guardia).

Al final de cada elemento o actividad se registró el tiempo que marcaba el cronómetro (TC) y los tiempos observados de cada tarea o elemento (TO) se obtuvo haciendo las respectivas restas después de terminar el estudio.

$$TO = TC_n - TC_{n-1}$$

Este procedimiento nos dio la seguridad de registrar todo el tiempo en que el trabajo estuvo sometido a observación, ya que se incluyeron los retrasos y los elementos o tareas extrañas (este método es mejor cuando las tareas tienen duración muy corta).

RESULTADOS

En esta sección se presentan los hallazgos relativos a los tiempos improductivos identificados en el proceso de minado, obtenidos a partir de la observación directa en campo y del análisis estadístico de los datos operativos. Mediante un diagrama de Pareto, se destacan las principales fuentes de pérdida de tiempo, en línea con el objetivo de este estudio: determinar los tiempos improductivos utilizando herramientas estadísticas para mejorar la productividad en

la Compañía Minera "AC Agregados S.A.". – Unidad Arequipa M. Además, se analizan las causas de dichas pérdidas y se proponen acciones de mejora dirigidas a eliminarlas y, de este modo, optimizar la eficiencia del proceso.

reflejan el tiempo invertido por cada trabajador en las distintas fases de la operación, diferenciando los períodos "antes de la operación" y "durante la operación". En la hoja de control se registraron dos tipos de tiempos:

En la Tabla 1, se presenta el resumen de las mediciones diarias del tiempo dedicado al movimiento rutinario del personal en el proceso productivo, para ambas guardias. Estas mediciones se obtuvieron mediante cronómetro y

a) Tiempo de cronómetro (TC): lecturas directas tomadas del cronómetro.

b) Tiempo observado (TO): cálculo de los intervalos entre lecturas sucesivas del cronómetro.

Tabla 1

Resumen del control del tiempo de las operaciones

CONTROL DE TIEMPOS (RESUMEN)					
Mina: Compañía Minera "AC AGREGADOS S.A."			Labor:		
Nivel:			Personal:		
Guardia:			Fecha:		
Equipo: Guardias de trabajo		Investigador:			
Ítem.	Antes/Durante/después DE:	(TC)min	(TO)min	Minutos	Horas
Antes de las operaciones					
	Reunión de gerencia: De 5:40 am a 6:30 am	5:40-6:30	40	40	0.67
	Despacho de guardia y charla de seguridad	6:30-7:10	40	40	0.67
	Inicio de la guardia de trabajo: 7:00 Am				
A	Traslado a mina (de oficina a la mina de 7:10 a 8:00)	50 min	50	50	0.83
B	Boleo de coca en puntos de concentración	110	60	60	1.00
C	Traslado a su labor	120	10	10	0.17
D	Ventilación	130	10	10	0.17
Durante la operación					
E	Desate rocas	150	20	20	0.33
F	Enmaderado	260	110	110	1.83
G	Instalación de Maq.perf	290	30	30	0.50
H	Traslado al comedor	300	10	10	0.17
I	ALMUERZO O DESCANSO (Tiempo autorizado)	350	50	50	0.83
J	Regreso al tajo (traslado a su labor)	360	10	10	0.17
K	Boleo luego del almuerzo	410	50	50	0.83
L	Perforación de taladros	590	180	180	3.00
M	Recojo de la Máquina	600	10	10	0.17
N	Carguío y chispeo de los taladros	660	60	60	1.00
O	Salida (fin de guardia): 7:00 PM	720	60	60	1.00
Tiempo total de la guardia				720	12.00

Nota. TC= Tiempo Cronómetro; TO=Tiempo Observado

TO = TCn-TCn-1

La Tabla 1 presenta un control detallado de los tiempos invertidos por el personal en un turno de 12 horas (720 minutos) de la “Unidad Arequipa M”. En la fase previa a la operación, que abarca aproximadamente 210 minutos (29 % del turno), se concentran actividades como la reunión de gerencia y la charla de seguridad (40 minutos cada una), el traslado de la oficina a la mina (50 minutos) y breves intervenciones de ajuste de equipo y ventilación. Estos periodos, aunque necesarios para la coordinación y el cumplimiento de protocolos, suponen un alto consumo de tiempo que podría reducirse mediante estrategias controladas.

Durante la operación propiamente dicha, el personal dedicó alrededor de 490 minutos (68 % del turno) a tareas de valor agregado. La perforación de taladros ocupó la mayor parte de este bloque (180 minutos, 25 % del turno), seguida del enmaderado o armado de soportes (110 minutos, 15 %) y el carguío y chispeo (60 minutos, 8,3 %). Actividades complementarias como la instalación de maquinaria de perforación, el desate de rocas y otros procesos menores

sumaron otros 80 minutos. A estas se añaden pausas autorizadas para almuerzo (50 minutos, 7 %) y desplazamientos internos breves (10 minutos cada uno, 1,4 %), cuya correcta planificación resulta clave para maximizar el tiempo efectivo de trabajo.

Finalmente, el cierre de turno, que incluye el ordenamiento del área y el retiro del personal, consumió 60 minutos (8 % del total). En conjunto, los datos revelan cuellos de botella claros en la etapa preparatoria y en los desplazamientos rutinarios, así como oportunidades de mejora en la gestión de pausas y traslados internos. Reducir estos tiempos improductivos, estableciendo normas de trabajo más precisas y optimizando los flujos de desplazamiento, permitirá incrementar la proporción de horas dedicadas a las actividades de mayor valor agregado —especialmente la perforación y el enmaderado— y, con ello, mejorar la productividad global del proceso de minado.

En la Tabla 2, se presenta la clasificación de los tiempos encontrados en el muestreo del control del tiempo.

Tabla 2
Clasificación de los tipos de tiempos encontrados por guardia

Tiempos	Descripción	Tiempos x actividad (min)	Total Tiempos (horas)
Tiempo improductivo	- Traslado del personal de Of. mina a mina	50	0.83
	- Boleo de coca	60	1.00
	- Traslado a su labor	10	0.17
	- Ventilación	10	0.17
	- Traslado al comedor	10	0.17
	- Traslado a su labor (luego del almuerzo)	10	0.17
	- Boleo de coca (luego del almuerzo)	50	0.83
	- Salida (6:00-7:00) pm	60	1.0
	Total	260	4.33

Tiempos	Descripción	Tiempos x actividad (min)	Total Tiempos (horas)
Tiempo productivo	- Despacho de guardia (órdenes de trabajo)	10	
	- Preparación para la tarea (inspección y desate de rocas)	10	
	- Ejecución de la tarea (enmaderado, perforación, carguío de los taladros y chispeo o encendido para la voladura)	360	
	Total	400	6.66
Tiempo autorizado	Almuerzo o descanso (12 a 13 horas)	60	1:00
	Total de horas por guardia	720	12:00

La Tabla 2 muestra la distribución de un turno de 12 horas (720 minutos) en tres categorías: tiempo improductivo, tiempo productivo y tiempo autorizado. El tiempo improductivo asciende a 260 minutos (4,33 horas), equivalente al 36 % del turno. Este bloque incluye desplazamientos rutinarios (traslado de la oficina a la mina y al comedor), pausas informales (boleo de coca antes y después del almuerzo) y el cierre de jornada (salida). La alta proporción de minutos dedicados a estas actividades de bajo valor sugiere la necesidad de optimizar la logística de traslados y revisar la estructura de las pausas para reducir el tiempo no productivo.

Por su parte, el tiempo productivo suma 400 minutos (6,66 horas), lo que representa aproximadamente el 56 % del turno. Dentro de este bloque, la mayor parte corresponde

a la ejecución de tareas de valor agregado — enmaderado, perforación de taladros, carguío y chispeo— que ocupan 360 minutos. La fase de preparación previa (inspección y desate de rocas) añade 30 minutos, y la recepción de órdenes de trabajo 10 minutos. Estos datos ponen de relieve que la continuidad y eficiencia de estas actividades son cruciales para maximizar la productividad diaria.

El tiempo autorizado, correspondiente al almuerzo o descanso reglamentario, asciende a 60 minutos (1 hora), lo que equivale al 8 % del turno. Aunque este periodo está dentro de los límites normativos y resulta indispensable para el bienestar del personal, es fundamental coordinarlo de modo que no genere extensiones informales adicionales del tiempo improductivo.

Tabla 3*Actividades donde se pierde tiempo*

Selección de actividades donde se pierden tiempo					
Ítem	Antes y durante de las operaciones	(TC)min	(TO)min	min	Horas
A	-Traslado a la mina (de Of. Mina a La Mina)	0 a 50 min	50	50	0.83
B	-Boleo de coca (a inicio de guardia)	110	60	60	1.00
C	-Traslado a su labor	120	10	10	0.17
D	-Ventilación	130	10	10	0.17
E	Almuerzo y/o descanso (Tiempo autorizado)			(60)	(1.0)
H	-Traslado al comedor	300	10	10	0.17
J	-Traslado a su labor (luego del almuerzo)	360	10	10	0.17
K	-Boleo de coca (luego del almuerzo)	410	50	50	0.83
O	-Salida (fin de guardia)	720	60	60	1.00
				TOTAL	4.33

Nota. TC= Tiempo Cronómetro; TO=Tiempo Observado $TO = TCn - TCn - 1$

La Tabla 3 muestra que, de los 720 minutos de un turno de 12 horas, 260 minutos (4,33 horas) se destinan a actividades que no aportan valor agregado al proceso de minado. En la fase inicial de la jornada, el traslado desde la oficina de mina a su punto de trabajo acumula 50 minutos, seguido por el tradicional “boleo de coca” al inicio de guardia con 60 minutos, y desplazamientos menores —traslado a la labor y ventilación— que suman 20 minutos adicionales. Estas tareas preliminares representan más de la mitad del tiempo improductivo total, lo que sugiere la necesidad de optimizar tanto las rutas como la organización de las pausas iniciales.

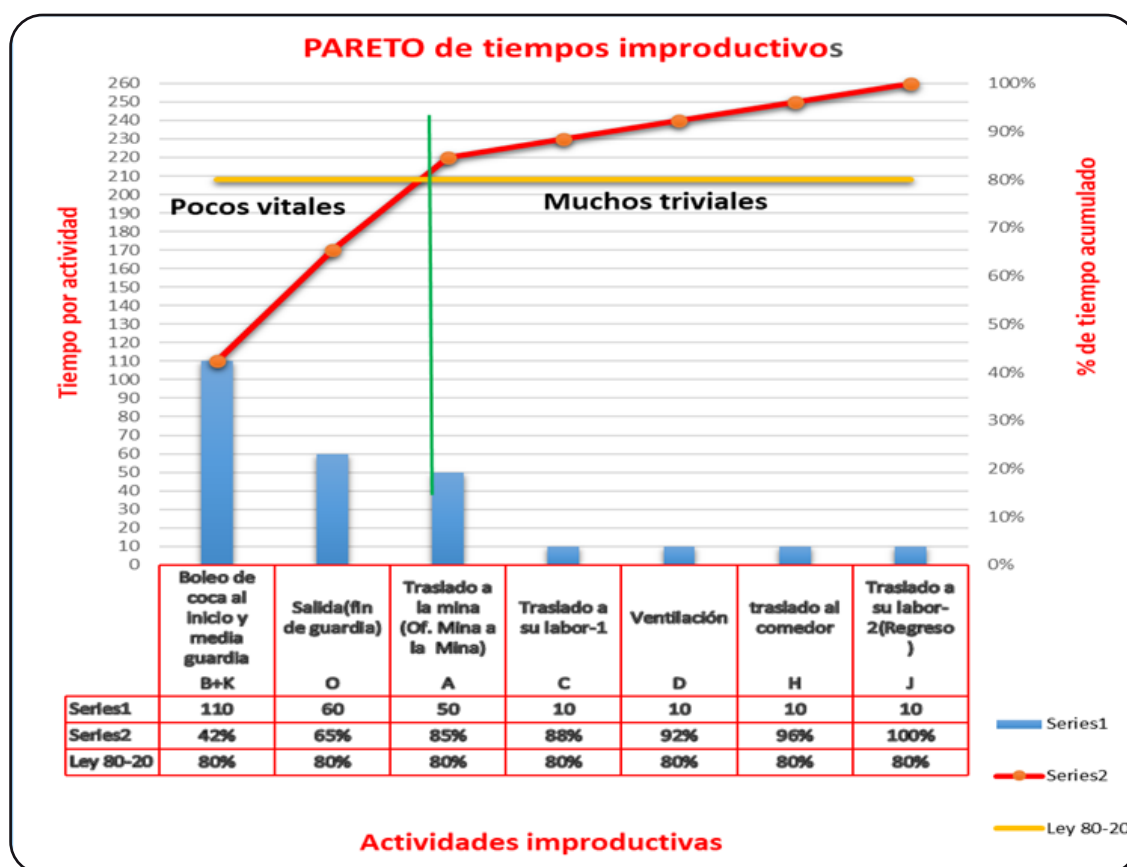
Durante y después de la pausa de almuerzo, el personal invierte 70 minutos en nuevas actividades de transición: 10 minutos para llegar al comedor, 10 minutos para regresar al puesto de trabajo y 50 minutos en un segundo “boleo de coca”. Aunque la hora de almuerzo

reglamentaria se considera tiempo autorizado, estos traslados y descansos adicionales incrementan significativamente las pérdidas. Finalmente, al cierre de la guardia, el proceso de salida ocupa 60 minutos, completando así el 36 % del turno dedicado a tareas de bajo valor.

Estos resultados ponen de relieve cuellos de botella claros en el manejo de los desplazamientos y pausas informales. Para reducir este tiempo improductivo, se recomienda consolidar los “boleos” en un único momento, reorganizar los recorridos internos mediante rutas más directas o asistencia mecanizada, y revisar los procedimientos de ventilación para minimizar esperas sin comprometer la seguridad. Implementar estas mejoras liberaría hasta 4,33 horas por guardia, incrementando de manera apreciable el tiempo disponible para las actividades de alto valor agregado en el proceso productivo.

Figura 1

Diagrama de Pareto –Pocos vitales y los muchos triviales, unificado por actividad



En la Figura 1, se observa siete actividades improductivas, de las cuales tres son las vitales y cuatro triviales. La actividad de “boleo” (B+K) suma 110 minutos; la actividad “salida del trabajo(O)”, 60 min; la actividad “traslado a la mina de la oficina de la mina” (A), 50 min. También se observa cuatro actividades con 10 min. de tiempo improductivo: actividad de traslado a su labor a primera hora (C), actividad de ventilación (D), actividad de traslado al comedor (H) y actividad (J) de traslado a su labor luego del almuerzo. También se aprecia que estas tres actividades (pocos vitales) representan el 85% (210 min) de las actividades

improductivas (260 min). Solucionando las dos actividades con pérdida de tiempo que se dan al inicio de guardia (boleo y traslado del personal a mina), estaríamos incrementando el tiempo productivo en 160 minutos. En consecuencia, mejoraríamos la productividad. La gráfica lineal, % de tiempo acumulado (color rojo) y la línea 80-20 (color amarillo) se interceptan en un punto y trazando una línea vertical (color verde) por dicho punto logramos discriminar las actividades más importantes de las actividades triviales o de poca trascendencia.

Tabla 4*Propuesta de soluciones a los tiempos improductivos*

Problemas	Soluciones propuestas
Holgura de trabajo	Es urgente cambiar el método de trabajo por la especialización del trabajo (de las tareas). La empresa tiene que optar por el sistema de trabajo especializado, donde cada tarea sea desarrollada por un especialista. Es decir, las operaciones unitarias principales del proceso productivo (enmaderado, perforación y voladura) deben ser asignadas a diferentes individuos, grupos o parejas de trabajo atendiendo a sus características, habilidades o recursos.
Falta de un estudio de medición del trabajo	El estudio del trabajo tiene por objetivo estandarizar el rendimiento de cada uno de las tareas que componen el proceso productivo, por lo que se tiene que realizar experimentalmente en las tres tareas principales (enmaderado, perforación y voladura) seleccionando la pareja de trabajadores convenientemente.
Costumbre de boleo	Una vez cambiado el método de trabajo por el sistema especializado y teniendo la medición del trabajo (estándares), la costumbre de boleo irá desapareciendo automáticamente, ya que la holgura de trabajo se verá reducido adecuadamente.
Mal uso del camión porta tropa	Se sugiere el control estricto en cuanto al cumplimiento de los horarios de traslado al personal. De igual manera, se debe realizar un control estricto del horario de ingreso del personal a interior mina, incluyendo a los supervisores.
Tiempo de ventilación de labores	Urgente el monitoreo del tiempo de ventilación de las labores y tener el tiempo real, para reducir el tiempo improductivo. Debe ser a lo más de treinta minutos.

DISCUSIÓN

El objetivo general de este estudio fue determinar los tiempos improductivos aplicando herramientas estadísticas en el proceso de minado de la Compañía Minera “AC Agregados S.A.” – Unidad Arequipa M, con el propósito de proponer mejoras que incrementen la productividad. Los hallazgos obtenidos cumplieron dicho objetivo al cuantificar que aproximadamente un 36% de la jornada laboral corresponde a actividades improductivas y al identificar, mediante análisis estadístico (diagrama de Pareto), las fuentes específicas de estas pérdidas de tiempo. En consecuencia, el estudio proporciona un diagnóstico claro de cuellos de botella operativos

en la compañía minera e insumos para formular intervenciones basadas en datos objetivos, algo inédito hasta ahora en la Compañía Minera “AC Agregados S.A.” – Unidad Arequipa M. Estos resultados globales son consistentes con la literatura previa que subraya la magnitud del tiempo improductivo en minería. Por ejemplo, Acuña (2023) reportó que solo el 47–50% del tiempo de turno en mina Retamas correspondía a trabajo efectivo, mientras que el resto eran pausas o esperas no productivas, lo que coincide en esencia con el porcentaje de improductividad aquí encontrado. No obstante, el 36% de tiempo improductivo en la compañía en estudio se sitúa

por debajo del nivel de inactividad reportado por Acuña, posiblemente debido a diferencias en las operaciones (el presente estudio distingue tiempo “autorizado” de descanso reglamentario, que Acuña incluía dentro del tiempo no productivo). En cualquier caso, la evidencia refuerza la relevancia de abordar los tiempos muertos en la jornada minera, ya que constituyen un componente sustancial del día laboral que podría reorientarse a tareas productivas.

En cuanto al objetivo específico 1 (OE1), referido a *determinar las principales causas de los tiempos improductivos*, el análisis identificó claramente tres actividades de bajo valor agregado que acaparan el 85% del tiempo improductivo total del turno. Estas son: (i) el “boleo” de coca al inicio de la guardia, (ii) el traslado inicial del personal de la oficina a la mina, y (iii) la salida o cierre de jornada. Cada una de estas actividades individuales supone decenas de minutos de inactividad por turno (110 min el boleo inicial, 50 min el traslado matutino, 60 min la salida). El predominio de estas tres fuentes confirma el principio de Pareto en el contexto operativo: unos pocos factores “vitales” explican la mayor parte de las pérdidas. Las causas últimas detrás de estas actividades improductivas se relacionan básicamente con factores organizacionales y culturales. Por ejemplo, la prolongada pausa de *boleo* (masticación de hoja de coca) al inicio y durante el almuerzo responde a factores culturales y, en parte, a una falta de estándares de trabajo y disciplina operativa que permite holguras excesivas. De igual manera, los retrasos en el transporte del personal sugieren ineficiencias logísticas y escaso control de horarios (uso inadecuado del camión portatropa), mientras que la larga duración del proceso de salida evidencia ausencia de procedimientos optimizados para el fin de turno. Estos hallazgos coinciden con los señalados por Yarleque (2018), quien en una operación de Arequipa atribuyó la baja utilización de equipos (49–76% frente a 94% de disponibilidad) principalmente a paradas

operacionales prolongadas. En esencia, tanto en nuestro estudio como en el de Yarleque se observa que un elevado porcentaje de los recursos permanece inactivo debido a *ineficiencias operativas internas* más que a averías o mantenimiento. Asimismo, Acuña (2023) destacó que las charlas de seguridad y esperas iniciales representaban una porción considerable del tiempo no productivo en Retamas (45 minutos de un total de 71 minutos improductivos por turno), lo cual guarda paralelismo con nuestro caso donde la charla matutina y preparación antes de iniciar labores (incluyendo traslados y boleo) consumen una parte importante de la mañana.

Respecto al segundo objetivo específico (OE2), orientado a *determinar en qué etapas del proceso de minado se manifiestan los tiempos improductivos*, nuestros resultados indican que los periodos de transición de la jornada – principalmente el comienzo y el cierre de cada guardia de trabajo– concentran la mayor parte del tiempo perdido. Específicamente, al inicio del turno se acumula un bloque significativo de inactividad debido al transporte del personal subterráneo y a las pausas antes de comenzar efectivamente las labores (como el boleo de coca inicial). Durante la mitad de la jornada, si bien se cuenta con un periodo autorizado de almuerzo de 60 minutos, se detectaron *tiempos adicionales improductivos* asociados: por ejemplo, 10 minutos de traslado hacia el comedor, 10 minutos de regreso al tajo tras la comida, y un segundo boleo después del almuerzo (50 min) que excede el tiempo estrictamente reglamentado de descanso. Finalmente, al final del turno, el proceso de salida de la mina y entrega de guardia involucra aproximadamente 1 hora (60 min) de actividades no productivas. De este modo, se evidencia que las etapas de preparación y conclusión de la jornada laboral son las más críticas, dado que en ellas se dilapidan tiempo. Tal como señalan otros estudios, los cambios de turno y las movilizaciones de personal suelen ser focos de tiempo improductivo (Acuña, 2023; Arriel et al., 2016).

En lo que respecta al tercer objetivo específico (OE3) –*determinar las acciones que reducirían los tiempos improductivos*–, a partir de los análisis anteriores se formularon propuestas concretas de mejora dirigidas a atacar las causas raíz de los tiempos improductivos. Entre las acciones recomendadas destacan: (a) *La especialización de tareas operativas*, de modo que cada cuadrilla o trabajador se dedique a una función específica (enmaderado, perforación, voladura, etc.) en lugar de rotar por múltiples actividades. Esto busca eliminar la holgura de trabajo que surge cuando el personal polifuncional pierde tiempo reorganizándose para distintas labores. Al asignar especialistas, se espera una ejecución más ágil y continua de cada proceso unitario. (b) *El control estricto de los traslados y cumplimiento de horarios*, particularmente en el transporte del personal a interior mina al inicio del turno y en el retorno a superficie al final. Se propone optimizar el uso del camión portatropa, asegurando salidas puntuales y rutas directas, así como supervisar el ingreso oportuno del personal (incluyendo supervisores) a sus puestos. Con ello se pretende acortar drásticamente los minutos improductivos de movilización. (c) *El monitoreo y reducción del tiempo de ventilación* tras las voladuras u otras labores críticas, empleando registros fiables para determinar el tiempo mínimo seguro de espera (idealmente no más de 30 minutos) y coordinando las actividades de modo que ese tiempo de ventilación no prolongue innecesariamente la inactividad del personal. (d) *La estandarización de los tiempos de trabajo mediante estudios de tiempo y movimiento*, estableciendo normas claras de duración para cada actividad clave. En conjunto, estas acciones abordan tanto los síntomas como las causas subyacentes. Estudios previos sugieren que dichas medidas pueden tener impactos positivos. Apaza (2017) documentó en la Minera Shahuindo que la implementación de un plan de mejora continua –similar a nuestras propuestas– disminuyó los tiempos improductivos en más de 50%, lo que a su vez permitió incrementar la producción de mineral en un 67.6% respecto a la

meta original. Del mismo modo, la filosofía Lean Mining aplicada por Arriel et al. (2016) logró aumentar la eficiencia en procesos subterráneos. Por lo tanto, si “AC Agregados S.A.” adopta las iniciativas propuestas, podría reducir sustancialmente el tiempo improductivo.

CONCLUSIONES

La aplicación de herramientas estadísticas permitió cuantificar que el 36 % del tiempo total en el proceso de minado de la Compañía Minera “AC Agregados S.A.” – Unidad Arequipa M corresponde a actividades improductivas. Esta proporción representa una pérdida significativa de eficiencia operativa que limita el aprovechamiento del recurso humano y técnico disponible.

Las principales causas del tiempo improductivo son el boleado de coca, el traslado inicial a la mina y la salida al final del turno. Estas tres actividades acumulan el 85 % del tiempo improductivo total, lo que evidencia que las pérdidas se concentran en pocos factores clave y, por lo tanto, son susceptibles de intervención focalizada.

Se identificó acciones concretas para reducir los tiempos improductivos: la especialización de tareas, el control estricto de horarios de transporte, la reducción del tiempo de ventilación, y la estandarización del trabajo mediante estudios de tiempo y métodos. Estas acciones permitirían mejorar la productividad sin requerir grandes inversiones, simplemente optimizando el uso del tiempo operativo.

Los tiempos improductivos se concentran mayoritariamente en las etapas inicial y final de la jornada laboral, es decir, durante el ingreso, preparación y salida del personal. Esta identificación permite focalizar la planificación y control operativo en los momentos de mayor pérdida de eficiencia.

REFERENCIAS

- Acuña, E. D. (2023). *Evaluación de la distribución de tiempos en el ciclo de minado de la Cámara 1 – Nivel 3175 Marsa en el año 2021* [Tesis de titulación, Universidad Nacional de Cajamarca]. <https://goo.su/8Q1QO>
- Apaza, E. (2017). *Disminución de tiempos improductivos para incrementar la utilización de los equipos de carguío y acarreo en la mejora continua de la productividad en el tajo Chalarina en Minera Shahuindo S.A.C.* [Tesis para optar el título de Ingeniero de Minas, Universidad Nacional de Trujillo]. <https://goo.su/exGhO>
- Arriel, M., Vela, L., & Rojas, J. (2016). *Identificación y análisis de los tiempos improductivos en equipos de las principales actividades operativas del ciclo de producción de una mina subterránea Sublevel Stopping (Tajeo por Subniveles)* [Trabajo de Investigación, Escuela de Postgrado GERENS]. <https://ideas.repec.org/p/ger/tesmgm/0002.html>
- Caso, A (2006). *Técnicas de medición del trabajo* (Segunda edición). Editorial Fundación Confemetal.
- Organización Internacional del Trabajo (1996). *Introducción al estudio del trabajo* (cuarta edición). <https://goo.su/HYRKjy4>
- Ortiz, N. R. (1999). *Análisis y mejoramiento de los procesos de la empresa*. Publicaciones UIS.
- Oscátegui, J. E., & Flores, J. D. (2023). *Modelo de control de tiempos improductivos en el proceso de carguío y acarreo mediante el uso de software de simulación Arena en una unidad minera superficial del centro del Perú* [Trabajo de titulación, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. <https://goo.su/GVjdxU>
- Yarleque, C. A. (2018). *Identificación y análisis de los tiempos improductivos en equipos de explotación de Ulexita – Unidad de Operaciones Salinas, INKABOR S.A.C.* [Tesis de titulación, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. <https://goo.su/6XPGfFf>

Figura 2

Arequipa, una de las regiones mineras más importantes de Perú



Fuente: <https://sectorminero.com.pe/wp-content/uploads/2023/09/Foto-58-SME-1536x1129.webp>

Radio enlace y la alerta temprana ante un aluvión de la Laguna Palcacocha en Huaraz - 2025

Luis Alvarado Cáceres

Ingeniero Electrónico, con experiencia en el territorio nacional en Gestión de Proyectos, Asesoría, Consultoría, Instalación y Soporte en los campos de la Ingeniería Electrónica, Telecomunicaciones y Redes, Computación e Informática, Eléctrica. Así como en la Docencia Universitaria y Superior Tecnológico. Con capacidad analítica, creativa, solución de problemas, con actitudes de pro actividad, emprendimiento y trabajo en equipo.

lalvaradoc@unasam.edu.pe

 <https://orcid.org/0000-0002-9686-9434>

Henry Garrido Angulo

Dr. Henry Garrido, es Doctor en Ciencias e Ingeniería de la Computación y de profesión Licenciado en Matemática, tiene experiencia en diversos estudios en decisiones multicriterio y problemática en glaciares de montaña en los Andes Peruanos. Tiene publicaciones de impacto en la problemática del riesgo de desastre entre el que resalta el estudio de vulnerabilidades en la Comunidad de Santa Cruz en Ancash.

lhgarridoa@unasam.edu.pe

 <https://orcid.org/0000-0002-1541-2660>

Oscar Alvarado Mendoza

Ingeniero de Sistemas e Informática, Magister en Gestión Tecnológica de la Información con experiencia en labores de dirección, gestión, asesoría, supervisión y fiscalización de actividades informáticas, conocimientos de informática, ofimática, telecomunicaciones y redes de computadoras.

 <https://orcid.org/0000-0003-3326-163X>

RESUMEN

El objetivo del estudio fue determinar la relación entre el radio enlace y la alerta temprana ante un aluvión de la Laguna Palcacocha, en Huaraz. La metodología fue cuantitativa, con un diseño no experimental, transversal y de tipo correlacional. El instrumento fue el cuestionario que se aplicó a 68 habitantes de la ciudad de Huaraz. El resultado obtenido fue 0,595 para el coeficiente de correlación Rho de Spearman, con un nivel de significancia de 0.000, menor que 5%, por lo que se rechazó la hipótesis nula y se aceptó la hipótesis alterna, lo que demostró que hubo una relación positiva media entre radio enlace y la alerta temprana ante aluvión. Asimismo, se observó una correlación positiva media entre radio enlace autónomo y la dimensión de aviso temprano ante un aluvión según el Rho de Spearman de 0,628. Finalmente, se observó una correlación positiva baja entre radio enlace autónomo y la dimensión de respuesta temprana ante un aluvión según el Rho de Spearman de 0,445. Para garantizar la confiabilidad del cuestionario, se aplicó el Alfa de Cronbach, obteniendo 0.945 para la variable radio enlace y 0.845 para alerta temprana. Se concluye que un buen sistema de radio enlace mejorará la alerta temprana ante aluvión de la Laguna Palcacocha en Huaraz. Las Tecnologías de la Información y Comunicación, mediante dispositivos de radio enlace permiten la comunicación a larga distancia. En la sociedad, ha revolucionado la forma en que vivimos, trabajamos y nos comunicamos, en particular la ciudad de Huaraz y los nevados de la Cordillera Blanca (Laguna Palcacocha). Se propone solución ante desastres naturales, implementando Sistema de Alerta Temprana, que permita el desarrollo sostenible, enfrentando los desafíos actuales y futuros.

Palabras clave: alerta temprana, aluvión, radio enlace, desastre natural

Cómo citar este artículo: Alvarado Cáceres, L. ., Garrido Angulo, H., & Alvarado Mendoza, O. (2025). Radio enlace y la alerta temprana ante un aluvión de la Laguna Palcacocha en Huaraz - 2025. *Aporte Santiaguino*, 18(1), pp. 67–94. <https://doi.org/10.32911/as.2025.v18.n1.1236>

Recibido: 2025-03-17 | Aceptado: 2025-05-15

Radio link and early warning against an alluvium of Palcacocha Lagoon in Huaraz - 2025

INTRODUCCIÓN

The objective of this study was to determine the relationship between radio link and early warning in the event of a flood in the Palcacocha Lagoon in Huaraz. The methodology was quantitative, with a non-experimental, cross-sectional, and correlational design. The instrument was a questionnaire, administered to 68 residents of the city of Huaraz. The Spearman's Rho correlation coefficient was 0.595, with a significance level of 0.000, less than 5%. Therefore, the null hypothesis was rejected and the alternative hypothesis accepted. This showed a medium positive relationship between radio link and early warning in the event of a flood. Likewise, a medium positive correlation was found between autonomous radio link and the early warning dimension in the event of a flood according to Spearman's Rho of 0.628. Finally, a low positive correlation was found between autonomous radio link and the early response dimension in the event of a flood according to Spearman's Rho of 0.445. To ensure the reliability of the questionnaire, Cronbach's alpha was applied, obtaining 0.945 for the radio link variable and 0.845 for early warning. It is concluded that a good radio link system will improve early warning for the Palcacocha Lagoon flood in Huaraz. Information and Communication Technologies, through radio link devices that allow long-distance communication. In society, they have revolutionized the way we live, work and communicate, particularly in the city of Huaraz and the snow-capped mountains of the Cordillera Blanca (Palcacocha Lagoon), proposing solutions to natural disasters, implementing an Early Warning System, which allows for sustainable development, facing current and future challenges.

Keywords: early warning, flood, radio link, natural disaster

Actualmente, la amenaza constante de un aluvión debido al posible desborde de la Laguna Palcacocha, ubicada en la Quebrada Cojup, pone en riesgo la seguridad física de la ciudad de Huaraz. Este riesgo se ve exacerbado por el cambio climático, lo que incrementa la vulnerabilidad de las poblaciones asentadas en el cauce del Río Quillcay, que atraviesa la ciudad. En este contexto, resulta fundamental determinar la relación entre el radio enlace y un sistema de alerta temprana (SAT) ante un aluvión en tiempo real en la zona de la Laguna Palcacocha.

En el marco de la gestión del riesgo de desastres, el SAT es un elemento clave para mitigar la pérdida de vidas humanas y reducir el impacto económico y material en las poblaciones vulnerables afectadas por eventos naturales destructivos. La efectividad de estos sistemas depende del conocimiento de los riesgos, de la participación activa de la comunidad y del compromiso de las instituciones y autoridades, lo cual implica la educación como factor esencial para fomentar la conciencia ciudadana y la difusión eficiente de las alertas, además de garantizar una constante capacitación e información (UNESCO, 2016).

Por ello, se hace imperativo la instalación de un SAT que involucre a todos los niveles del Estado y a la comunidad, priorizando la alerta ante aluviones, sismos y tsunamis, como ya se está implementando en todo el litoral peruano. El SAT frente a huaycos, sismos y tsunamis tiene como objetivo proteger a más de un millón 400 mil personas, con la cooperación del Gobierno Japonés, y se encuentra alineado con la Red Nacional de Alerta Temprana (RNAT) (INDECI, 2018).

Las áreas cercanas al río Quillcay, consideradas como zona aluvional de alto peligro, requieren especial atención, ya que se encuentran en una zona de muy alto riesgo ante un posible

aluvión. Esta situación exige un enfoque preventivo. En este sentido, el INDECI (2018) subraya la necesidad de incorporar un SAT que conecte los niveles de gobierno con la comunidad, priorizando la alerta ante aluviones, sismos y huaycos.

El objetivo de este estudio es aportar conocimiento sobre el uso del radio enlace y la implementación de un sistema de alerta temprana ante un aluvión de la Laguna Palcacocha en Huaraz, en alta montaña, como parte de la política

MATERIALES Y MÉTODOS

estatal de prevención de desastres.

Tipo y diseño de investigación

La investigación es de tipo básico (Hernández et al., 2014). El enfoque es cuantitativo y el alcance es correlacional. Se midió la relación entre la variable V1 (radio enlace) y la variable V2 (alerta temprana) ante un aluvión. Los estudios cuantitativos se expresan en valores numéricos, siguiendo lo propuesto por Creswell (2018) y Mejía (2005).

La investigación aplicada está dirigida a determinar a través del conocimiento científico, los medios (metodologías, protocolos y tecnologías) por los cuales se puede cubrir una necesidad reconocida y específica (CONCYTEC, 2021). En este estudio, el radio enlace contribuyó en la alerta temprana ante un aluvión de la Laguna Palcacocha en Huaraz. Cozby (2020) describe que este tipo de investigación se lleva a cabo para abordar cuestiones en las que existen problemas prácticos y posibles soluciones. La función correlacional, de acuerdo a Vicencio (2018), busca establecer si existe una relación estadística entre las variables del fenómeno.

El diseño metodológico fue no experimental, según O'Dwyer (2014). Este diseño es apropiado cuando la finalidad es

examinar los atributos, comportamientos o fenómenos naturales como consecuencia de una de las variables que no se va manipular de manera experimental. Asimismo, la investigación respecto al tiempo fue transversal, porque los datos se recopilaron en un momento determinado.

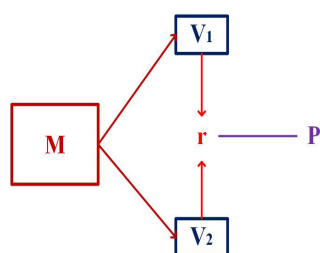
Según Hernández et al. (2010), el estudio es no experimental, porque no hay manipulación de ninguna variable. Los datos se obtienen de manera espontánea, transversal, porque los datos de ambas variables se recogen en un solo momento y correlacional, porque se estableció la relación estadística de las variables.

La metodología de gestión de riesgo de desastre se enfoca en prevenir y mitigar los efectos de eventos peligrosos, como terremotos, inundaciones y otros desastres naturales o tecnológicos. Implementar, mejorar y actualizar el Modelo de Gestión por Escenarios, representa una realidad social, territorial y económica de generación, expresión, afectación y control de riesgo de desastre, para definir, planificar, implementar y controlar las políticas públicas, según www.eird.org. La gestión de riesgo de desastre es un proceso continuo que involucra la identificación de peligros, el análisis del riesgo, la prevención, la preparación, la respuesta y la recuperación con el objetivo de minimizar los impactos negativos de los desastres en las comunidades.

Para una respuesta eficaz ante desastres naturales, es crucial priorizar la prevención y reducción del riesgo, mejorar la información sobre riesgos, alerta temprana y comunicación, respuesta rápida y eficiente, atención a la población afectada, recuperación y rehabilitación. La respuesta a desastres también implica esfuerzos de búsqueda y rescate, atención médica, gestión de alimentos y agua y alojamiento de personas desplazadas.

Huaraz es susceptible a terremotos, por

lo que se deben reforzar las estructuras y contar con protocolos de respuesta para sismos. La zona también puede experimentar lluvias intensas y deslizamientos, por lo que es importante tener sistemas de alerta temprana y planes de evacuación. Es importante fomentar la participación de la población en la planificación y respuesta a desastres, ya que la organización comunitaria es crucial para la resiliencia. En ese sentido, el estudio se refiere a la relación entre radio enlace y alerta temprana ante aluvión, cuyo esquema es el siguiente:



Donde:

- M: Muestra de investigación
- V1: Radio enlace
- V2: Alerta temprana ante aluvión
- r: Relación entre variables

Población y muestra

La población, según Healey (2013) y Hernández et al. (2014), se define como el conjunto total de casos que comparten características similares. En este estudio, la población estuvo compuesta por personas mayores de 18 años de la zona urbana de Huaraz, cuya población aproximada es de 63,721 habitantes, según las proyecciones del INEI (2017).

La academia, incluyendo investigadores, profesores y estudiantes, puede ser una fuente valiosa de información para una investigación, especialmente cuando la problemática abordada requiere conocimientos especializados o

perspectivas académicas. Su aporte puede enriquecer el estudio y contribuir a la eficacia de las conclusiones.

En el contexto de Huaraz, la población académica local podría ser relevante para investigaciones que aborden temas relacionados con la historia, la cultura, el turismo, la geografía, la arquitectura e ingeniería, la sociología o la economía de la región. En resumen, incluir a la academia como población de consulta es una estrategia inteligente para enriquecer una investigación y obtener resultados más efectivos.

La muestra, según Malhotra (2008), es un subgrupo de elementos de la población elegido con el objetivo de tomar parte del estudio. Para el cálculo de la muestra se aplicó la siguiente fórmula.

$$n = \frac{N * z^2 * p * q}{(N - 1) * e^2 + z^2 * p * q}$$

Donde:

- n = Muestra
- N = Población 63,721
- Z = Nivel de confianza 1.65
- e = Error de estimación 0.1
- p = Probabilidad de éxito 0.5
- q = probabilidad de fracaso 0.5

Por lo tanto, la muestra seleccionada fue de n = 68 habitantes.

Técnicas para la recolección de datos

La técnica de investigación, de acuerdo a Arias (2016), se define como el procedimiento de obtener datos o información sobre el objeto que es propósito del estudio. Una vez obtenidos los datos, tienen que ser almacenados, para que posteriormente sean recuperados y procesados, y luego analizados e interpretados.

Técnica

En este estudio, la técnica que se empleó principalmente para obtener los datos fue la encuesta. Debido a las características de la población, que incluye a pobladores que no están muy familiarizados con el uso de formularios electrónicos, las encuestas se realizaron de forma oral.

Instrumento

Se utilizó el cuestionario para registrar la información suministrada por los pobladores. El cuestionario, como instrumento de medición, tuvo que ser validado bajo los parámetros de validez y confiabilidad (Corral, 2009). Respecto a la confiabilidad, el resultado tiene que ser el mismo cuando un instrumento es aplicado en las mismas condiciones y al mismo sujeto varias veces (Arias, 2020; Hurtado, 2000). De acuerdo con Welch (1988) y Barragán (2021), la confiabilidad de la consistencia interna del cuestionario se evalúa con el alfa de Cronbach, el cual asume que las preguntas del cuestionario miden un mismo constructo con un alto grado de correlación entre sí. Para estimar la confiabilidad del cuestionario, que es politómico en esta investigación (escala de Likert con 5 opciones de respuesta), se calculó el alfa de Cronbach. Con respecto a la interpretación del valor de este estadístico, se siguió las recomendaciones de George (2003), como se observa en la siguiente tabla.

Tabla 1

Interpretación del Alfa de Cronbach

Valor del Alfa de Cronbach	Interpretación
Mayor de 0.9	Excelente
Mayor de 0.8	Bueno
Mayor de 0.7	Aceptable
Mayor de 0.6	Cuestionable
Mayor de 0.5	Pobre
Menor de 0.5	Inaceptable

Fuente: Barragán et al. (2021).

La prueba de confiabilidad del cuestionario de 30 preguntas sobre una población de 68 personas reportó que el alfa de Cronbach fue de 0.945 para la variable radio enlace. Por tanto, se concluyó que el instrumento fue altamente confiable como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 2

Resultado de la prueba de confiabilidad, variable radio enlace

Número de elementos	Alfa de Cronbach
30	0.945

La prueba de confiabilidad del cuestionario de 30 preguntas sobre una población de 68 personas reportó que el alfa de Cronbach fue de 0.845, para la variable alerta temprana ante aluvión. Por tanto, se concluyó que el instrumento fue altamente confiable como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 3

Resultado de la prueba de confiabilidad, variable alerta temprana ante aluvión

Número de elementos	Alfa de Cronbach
30	0.845

Confiabilidad:

Para la confiabilidad del instrumento se empleó una prueba piloto a razón de 30 pobladores sujetos de estudio, en base a la muestra determinadas, siendo 1 sujetos por muestra, con la aplicación de un cuestionario de 27 preguntas, a una confiabilidad del 90% ($z=1.65$)

Procedimientos:

Por tratarse de una investigación de enfoque cuantitativo, se elaboró el cuestionario que se aplicó a los pobladores del área urbana de Huaraz.

El instrumento para la recolección de datos fue el cuestionario que operacionalizó las variables objeto de observación e investigación.

El tipo de cuestionario de la encuesta fue de entrevista personal.

El tipo de preguntas del cuestionario fue cerrada, categorizada y de valoración. Según su contenido, fue de información. La escala fue nominal. La encuesta fue anónima.

El instrumento tuvo dos partes. La primera parte estuvo integrada por preguntas vinculadas a medir la variable Radio enlace, en la cual cada pregunta tuvo como alternativas de respuesta las opciones: Conoce bastante, Conoce algo, Neutral, Desconoce y Total desconoce. La segunda parte estuvo conformada por preguntas relacionadas a la variable Alerta temprana ante aluvión en la Laguna Palcacocha en Huaraz, en la cual cada interrogante tuvo como alternativas de respuesta las siguientes opciones: Conoce bastante, Conoce algo, Neutral, Desconoce y Total desconoce.

Validez y confiabilidad de los instrumentos:

La validez del estudio fue dada por tres expertos.

Técnicas para el procesamiento y análisis de los datos:

RESULTADOS

El procesamiento de los datos consiste en el control de calidad, ordenamiento, clasificación, tabulación y gráficos de datos. Se utilizó la estadística descriptiva, mediante la formulación de tablas de frecuencias o histogramas para cada pregunta, que arrojó porcentajes para los resultados, permitiendo establecer las interpretaciones de dichos resultados y presentar los mismos mediante gráficos o histogramas para su mejor comprensión y entendimiento. En la tabla de frecuencias se precisan los indicadores para las variables.

Los criterios del SINAGERD (Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres) se basan en principios, normas, procedimientos, técnicas e instrumentos que aseguran la gestión del riesgo de desastres de manera integral. El SINAGERD tiene como objetivo la identificación, reducción y mitigación de riesgos de desastres, así como la preparación y respuesta ante ellos.

Prueba de Normalidad

Análisis inferencial. La prueba de normalidad se hizo sobre las 68 encuestas, y puesto que el número es mayor a 30, se utilizó la prueba de Kolmogorov-Smirnov.

Tabla 4

Prueba de normalidad de datos de las variables de estudio

	Kolmogorov-Smirnov ^a		
	Estadístico	gl	Sig.
Aviso temprano ante aluvión	,189	68	,000
Respuesta temprana ante aluvión	,206	68	,000
Alerta temprana ante aluvión	,162	68	,000
Radio enlace fijo	,204	68	,000
Radio enlace	,204	68	,000

En la Tabla 4, se observa que el valor de significancia alcanzada es de 0.000, ubicada por debajo del valor de significancia considerada como no paramétrica, por lo cual se seleccionó el método de Rho de Spearman para determinar la relación entre los objetivos.

Un valor de significancia de 0,000 menor que 0% mostró que la distribución es paramétrica, es decir, que sigue una distribución normal.

Tabla 5

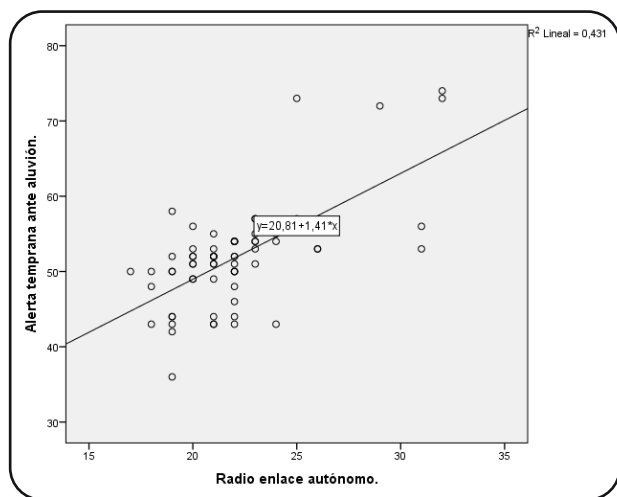
Rho de Spearman. Correlación que existe entre las variables radio enlace y alerta temprana ante aluvión

		Alerta temprana ante aluvión	Radio enlace
Alerta temprana ante aluvión	Coefficiente de correlación	1,000	,595**
	Sig. (bilateral)	.	,000
	N	68	68
Radio enlace.	Coefficiente de correlación	,595**	1,000
	Sig. (bilateral)	,000	.
	N	68	68

** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

Figura 1

Diagrama de dispersión de radio enlace autónomo y alerta temprana ante aluvión



Con en los datos de la Tabla 5, se describe una correlación positiva media, con un valor de 0,595, se considera que radio enlace autónomo tiene una correlación con alerta temprana ante aluvión. Estos datos confirman la hipótesis general, con significancia de 0,000, mostrado en la Figura 1.

Tabla 6

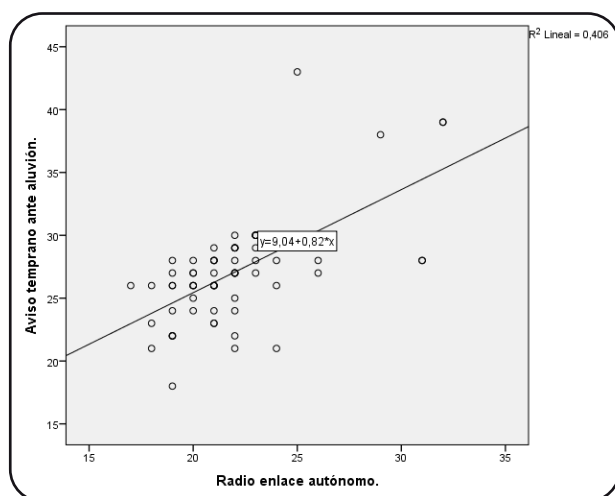
Correlación que existe entre radio enlace autónomo y la dimensión aviso temprano ante aluvión

		Radio enlace autónomo	
		Coefficiente de correlación	,628**
Rho de Spearman	Aviso temprano ante aluvión	Sig. (bilateral)	,000
		N	68

** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

Figura 2

Diagrama de dispersión de radio enlace autónomo y dimensión aviso temprano ante aluvión



Con los datos de la Tabla 6 describen una correlación positiva media, con un valor de 0,628, se considera que radio enlace autónomo tiene una correlación con la dimensión aviso temprano ante aluvión, con lo que se confirma la hipótesis específica Hi1, con significancia de 0,000, mostrado en la Figura 2.

Tabla 7

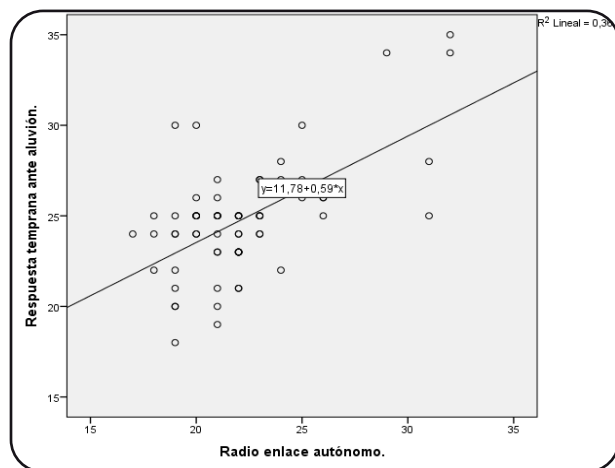
Correlación que existe entre radio enlace autónomo y la dimensión respuesta temprana ante aluvión

		Radio enlace autónomo.	
		Coefficiente de correlación	,445**
“Rho de Spearman”	Respuesta temprana ante aluvión.	Sig. (bilateral)	,000
		N	68

** . “La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral)”.

Figura 3

Diagrama de dispersión de radio enlace autónomo y dimensión respuesta temprana ante aluvión



Los datos de la Tabla 7 describen una correlación positiva baja, con un valor de 0,445, por lo que se considera que radio enlace autónomo tiene poca correlación con la dimensión respuesta temprana ante aluvión, datos con lo que se afirma la hipótesis específica Hi2, con significancia de 0,000, mostrado en la Figura 3.

Resultados descriptivos por variables y dimensiones

Variable radio enlace

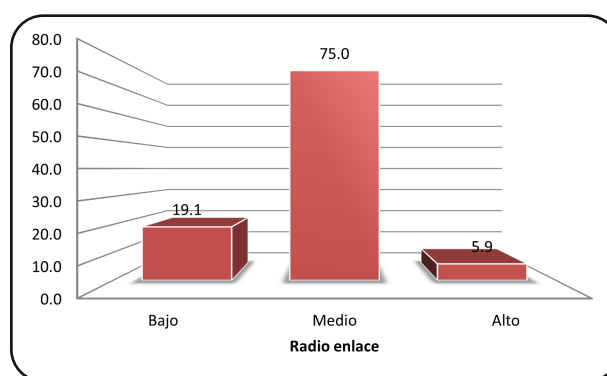
Tabla 8

Frecuencia de la variable radio enlace

Niveles	Habitantes	%
Bajo	13	19.1
Medio	51	75.0
Alto	4	5.9
Total	68	100.0

Figura 4

Distribución de frecuencias porcentuales de la variable radio enlace autónomo



En la Tabla 8, se aprecia los resultados de las opiniones de las personas entrevistadas. Un 75,0% consideró en un nivel medio el radio enlace autónomo, mientras que un 19,1% estimó en un nivel bajo. En cambio, solo un 5,9% lo situó en un nivel alto. Por tanto, se considera como desfavorable las percepciones de los habitantes de Huaraz con respecto a conocer la existencia de radio enlace.

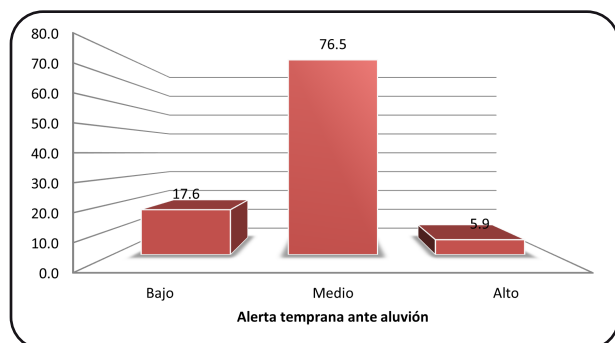
Variable alerta temprana ante aluvión

Tabla 9

Distribución de frecuencias de la variable alerta temprana ante aluvión

Niveles	Habitantes	%
Bajo	12	17.6
Medio	52	76.5
Alto	4	5.9
Total	68	100.0

Figura 5
Distribución de frecuencias porcentuales de la variable alerta temprana ante aluvión



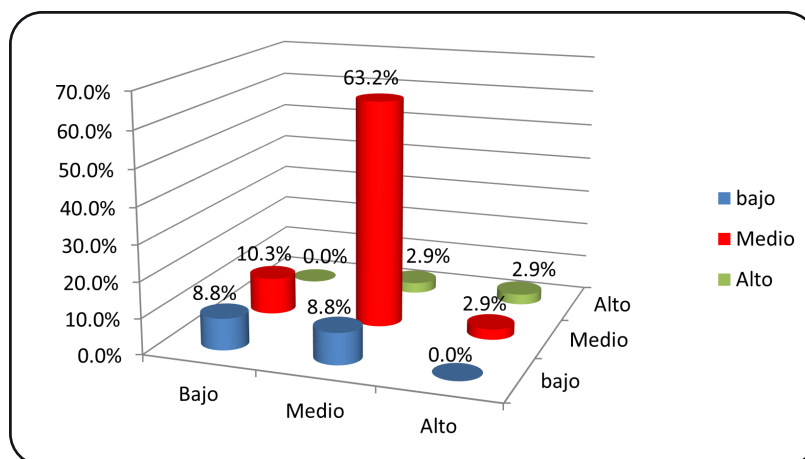
En la Tabla 9 y Figura 5, se aprecia los resultados de las opiniones de las personas entrevistadas. Un 76,5% consideró en un nivel medio la alerta temprana ante aluvión, mientras que un 17,6% estimó en un nivel bajo. En cambio, solo un 5,9% lo situó en un nivel alto. Por tanto, se consideran como desfavorables las percepciones de los habitantes de Huaraz con respecto a conocer si se tiene alerta temprana ante aluvión de la Laguna Palcacocha en Huaraz.

Tablas cruzadas por variables y dimensiones

Tabla 10
Tabla cruzada de variables Radio enlace y Alerta temprana ante aluvión

		Radio enlace			Total	
		Bajo	Medio	Alto		
Alerta temprana ante aluvión	Bajo	Recuento	6	6	0	12
		% del total	8,8%	8,8%	0,0%	17,6%
	Medio	Recuento	7	43	2	52
		% del total	10,3%	63,2%	2,9%	76,5%
	Alto	Recuento	0	2	2	4
		% del total	0,0%	2,9%	2,9%	5,9%
Total	Recuento	13	51	4	68	
	% del total	19,1%	75,0%	5,9%	100,0%	

Figura 6
Gráfica de la tabla cruzada de variables



De acuerdo con la Tabla 10 y Figura 6, la percepción de encuestados de ambas variables es 63,2%, de nivel medio.

Contrastación de las hipótesis de investigación

Hipótesis general

H0: No existe relación significativa entre las variables radio enlace y alerta temprana ante aluvión en la Laguna Palcacocha en Huaraz - 2019.

Hi: Existe relación significativa entre las variables radio enlace y alerta temprana ante aluvión en la Laguna Palcacocha en Huaraz - 2019.

Hipótesis específica Hi1

Ho1: No existe relación significativa entre radio enlace y la dimensión aviso temprano ante aluvión.

Hi1: Existe relación significativa entre radio enlace y la dimensión aviso temprano ante aluvión

Hipótesis específica Hi2

Ho2: No existe relación significativa entre radio enlace y la dimensión respuesta temprano ante aluvión.

Hi2: Existe relación significativa entre radio enlace y la dimensión respuesta temprano ante aluvión.

DISCUSIÓN

En relación a la hipótesis general Hi: Existe relación significativa entre las variables alerta temprana ante aluvión y radio enlace en la Laguna Palcacocha en Huaraz. Según los datos de la Tabla 5, se describe una correlación positiva media con un valor de 0,595, con lo que se considera que Radio enlace tiene una correlación con Alerta temprana ante aluvión, datos que confirman la hipótesis general, con significancia

de 0,000, mostrado en la Figura 2. Estos resultados tienen relación con lo planteado por la UNESCO (2016), que define a “los sistemas de alerta temprana (SAT) como un conjunto de procedimientos e instrumentos a través de los cuales se monitorea una amenaza o evento adverso de carácter previsible, se recolectan y procesan datos e información, ofreciendo pronósticos o predicciones temporales sobre su acción y posibles efectos y que los sistemas de alerta temprana para aluvión, tiene dos modalidades automatizados y operados por las colectividades. En los sistemas automatizados se utilizan instrumentos tecnológicos como radio enlace, satélites, sensores remotos, redes telemétricas y otros que permiten transmitir información directa desde los equipos de medición hasta los centros de análisis y de toma de decisión”. Asimismo, el INDECI prioriza la “alerta temprana frente a sismos, tsunamis, huaycos y aluviones, que permite poner a buen recaudo a la población”. Del mismo modo Valdez (2015) asevera que “las intensas lluvias en el Perú ocasionan flujos de lodo y piedra con gran poder destructivo. Estos flujos de aluvión son conocidos en la costa, sierra y selva del Perú como huaycos”. Además, nuestros hallazgos concuerdan con Borda (2018) quien dice que “uno de los requisitos del SAT es el funcionamiento de una estructura en la que interactúan autoridades, organismos de respuesta y miembros de la comunidad, de manera articulada y según procedimientos consensuados”. También Ortiz (2018) manifiesta que “los pobladores de la cuenca del río Lucre tienen temor de inundación, aún más con el cambio climático, aunándose la vulnerabilidad por la inadecuada planificación y ocupación del territorio a lo largo de este río”. Según Tito (2017), la “participación y seguridad ciudadana en la región Lima durante el período 2012-2014 fue débil, a pesar de su planificación y considerando el desarrollo de las acciones del Sistema de Seguridad Ciudadana”. Por otro lado, INDECI (2015) informa que “los peligros más inminentes que se han identificado en Huaraz son los de origen geológico, climático y geológico-climáticos, los que amenazan la

seguridad física de la ciudad”. Esto está de acuerdo con lo reportado por Dávila (2016) respecto a la “capacidad de respuesta de las poblaciones: es de suma importancia que comprendan el riesgo que corren, respeten el servicio de alerta y sepan cómo reaccionar. Para esto son necesarios programas de educación y preparación ante desastres y emergencias. Junto a ellos se desarrollan planes de gestión de desastres que son practicados y sometidos a pruebas”.

Según los datos de la Tabla 8, el 75,0% de entrevistados consideró en un nivel medio el radio enlace, mientras que el 19,1% estimó en un nivel bajo. Solo el 5,9% lo situó en un nivel alto. Por tanto, se consideran como desfavorables las percepciones de los habitantes de Huaraz con respecto a conocer la existencia de radio enlace, lo cual coincide con Soacha (2024), quien afirma que “respecto al acceso de última milla en zonas rurales, se podrían integrar los planes de fibra óptica con accesos inalámbricos de banda ancha en zonas rurales. Con esto se promovería el uso y acceso de las TIC en zonas rurales y se acrecentaría el desarrollo y crecimiento principalmente de los sectores económico y social del país”. De lo expuesto podemos inferir que radio enlace tiene una relación positiva con alerta temprana ante aluvión.

En relación a la hipótesis específica Hi1: Existe relación significativa entre radio enlace y la dimensión **aviso** temprano ante aluvión, los datos de la Tabla 6 describen una correlación positiva media con un valor de 0,628, con lo que se considera que radio enlace tiene una correlación con la dimensión aviso temprano ante aluvión, con lo que se confirma la hipótesis específica Hi1, con significancia de 0.000, mostrado en la Figura 3. Estos resultados coinciden con lo planteado por Borda (2018) en su investigación en el distrito de Parcona, donde asevera que no presentan conciencia ante una posible emergencia de aluviones, huaycos e inundaciones; evidenciando un vacío en su práctica”. Al respecto, Pañora y

Ramírez (2015) indican que “la simulación de un sistema de alerta temprana de Tsunami consta de un enlace satelital de subida entre un transductor marino en alta mar hacia un satélite y un enlace satelital de bajada desde el satélite hasta el servidor desde donde se efectúa la administración nacional e internacional”.

En relación a la hipótesis específica Hi2: Existe relación significativa entre radio enlace y la dimensión **respuesta** temprano ante aluvión, los datos de la Tabla 7 muestran una correlación positiva baja, con un valor de 0,445, con lo que se considera que radio enlace tiene poca correlación con la dimensión respuesta temprana ante aluvión, con lo que se afirma la hipótesis específica Hi2, con significancia de 0.000, mostrado en la Figura 4. Estos resultados tienen relación con los de Díaz (2015) quien indica que “la finalidad del proyecto es que los datos recogidos por los equipos instalados en la isla puedan ser leídos, tabulados, analizados y posteriormente sirvan para la predicción de movimientos sísmicos”.

CONCLUSIONES

Existe una relación estadísticamente significativa media entre el radio enlace y la alerta temprana ante aluvión en la Laguna Palcacocha. Asimismo, se ha comprobado que la relación entre las variables es positiva ($Rho = 0,595$), por lo que, si se tiene un radio enlace mejorará la alerta temprana ante aluvión.

Existe una relación estadísticamente significativa media entre el radio enlace y el aviso temprano ante aluvión en la Laguna Palcacocha. Asimismo, se ha comprobado que la relación es positiva ($Rho = 0,658$), por lo que, si se tiene un radio enlace mejorará la alerta temprana ante aluvión.

Existe una relación estadísticamente significativa baja entre el radio enlace y la respuesta temprana ante aluvión en la Laguna Palcacocha.

Asimismo, se ha comprobado que la relación es positiva ($Rho = 0,445$), por lo que, si se tiene un radio enlace mejorará la alerta temprana ante aluvión.

El SAT (Sistema de Alerta de Temprana) es un mecanismo tecnológico que permitirá monitorear mediante radio enlace, durante las 24 horas de los 365 días del año, el factor de seguridad de desplazamiento de nieve de la Cordillera Blanca y particularmente del nevado Ranrapalca y probable desbordamiento de la Laguna de Palcacocha, como ocurrió en el área urbana de la ciudad de Huaraz con el aluvión del 13 de diciembre de 1941 y alertar oportunamente en el caso de desastre natural.

REFERENCIAS

- Arias, F. (2016). *El proyecto de investigación: Introducción a la metodología* (2da ed. ed.). El Pasillo.
- Arias, J. (2020). *Técnicas e instrumentos de investigación científica, para ciencias administrativas, aplicadas, artísticas, humanas* (1ra. Ed. ed.). Enfoques Consulting.
- Barragán, A. M.-F. (2021). *Investigación docente e investigación en educación: Nuevos enfoques en la metodología docente*. Dykinson.
- Borda, L. (2018). *Efectividad del sistema de alerta temprana en huaycos e inundaciones en el Distrito de Parcona* [Tesis de maestría, Universidad Cesar Vallejo]. <https://core.ac.uk/download/326616029.pdf>
- Carhuancho, I. N. (2019). *Metodología para la investigación holística* (1ra. Ed. ed.). Universidad Internacional del Ecuador.
- CONCYTEC (1 de Setiembre de 2021). *Reglamento de calificación, clasificación y registro de los investigadores del Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica – Reglamento RENACYT*. https://portal.concytec.gob.pe/images/noticias/Manual_del_Reglamento_RENACYT_1.pdf
- Corral, Y. (2009). Validez y confiabilidad de los instrumentos de investigación para la recolección de datos. *Revista Ciencias de la Educación*, 19(33), 229-247.
- Cozby, P. (2020). *Methods in Behavioral Research*. McGraw-Hill.
- Dávila, D. (2016). *Sistemas de alerta temprana ante inundaciones en América Latina*. Soluciones Prácticas.
- Díaz, R. (2015). *Diseño de radioenlace microondas isla San Lorenzo – Campus PUCP para el Proyecto Perú Magneto* [Tesis para optar el título de Ingeniero de las Telecomunicaciones, Pontificia Universidad Católica del Perú]. <https://tesis.pucp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/03a11c92-fdd2-42ca-a6d9-7bce4d8ebfd1/content>
- George, D. &. (2003). *SPSS for Windows step by step: A simple guide and reference. 11.0 Update*. Allyn and Bacon.
- Healey, J. (2013). *The essential of statistics: A tool for social research*. (3ra ed. ed.). Cengage Learning.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. (2014). *Metodología de la investigación*. México DF: Mac GrawHill.
- Hurtado, J. (2000). *Metodología de la Investigación Holística*. Fundación Sygal.

- INDECI (2015). *Plan de prevención ante desastres: usos del suelo y medidas de mitigación Ciudad de Huaraz. Huaraz: Programa de las naciones unidas para el desarrollo (PNUD). INDECI.*
- INDECI (Enero de 2019). *Lineamientos para la conformación y funcionamiento de la Red Nacional de Alerta Temprana RNAT.* <https://portal.indeci.gob.pe/wp-content/uploads/2019/01/201705101219311.pdf>
- INEI (2017). *Censo Nacional.* <https://www.gob.pe/inei/>
- Instituto Nacional de Defensa Civil (2018). *Compendio estadístico del INDECI 2018, Preparación - Respuesta - Rehabilitación.* Biblioteca del Instituto Nacional de Defensa Civil.
- Malhotra, N. (2008). *Investigación de mercados.* (5ta ed. ed.). Pearson.
- O'Dwyer, L. &. (2014). *Quantitative Research for the Qualitative.* Sage.
- Ortiz, S. (2018). *Propuesta de un sistema de alerta temprana por inundación en la cuenca del río Lucre-Cusco 2018* [Tesis para optar el título de Ingeniero Ambiental, Universidad Andina de Cusco]. <https://repositorio.uandina.edu.pe/item/8c7557e9-bfa4-456d-aa25-c2e00adfa339>
- Pañora, U., & Ramirez, A. (2015). *Diseño y simulación del sistema de alerta temprana de tsunamis para las zonas sensibles de la región costanera del cantón esmeraldas* [Informe previo a obtención de título de ingeniero en electrónica y telecomunicaciones, Escuela Superior Politécnica del Litoral]. <https://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/39723/T-84966%20PA%20c3%2091ORA-RAMIREZ.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Soacha, A. (2014). *Estudio de la viabilidad técnica para integrar los planes de fibra óptica con accesos inalámbricos de banda ancha en zonas rurales en las bandas de 450-470MHz y dividendo digital* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/49466/02822346.2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Tito, A. (2017). *Participación comunitaria y la seguridad ciudadana en la región Lima, 2012-2014.* Centro de Altos Estudios Nacionales.
- UNESCO. (2016). *Manual de sistema de alerta temprana.* Unesco.
- Valdez, A. (2015). *Sistema de monitoreo y alerta temprana de aluviones en la quebrada Huaycoloro para el Instituto Geofísico del Perú y Sedapal* [Tesis para optar el título de ingeniero en electrónico, Universidad Nacional de Ingeniería]. <https://repositorio.igp.gob.pe/server/api/core/bitstreams/4c5145d4-6b00-411b-9bdc-5aae8cd446d9/content>
- Vicencio, O. (2018). *La investigación en las ciencias sociales* (2da ed. ed.). Editorial Trillas.
- Welch, S. (1988). *Quantitative methods for public administration: Techniques and applications.* Dorsey Press.

Efecto de tres dosis de microorganismo eficaces aplicados en dos etapas fenológicas del cultivo de trigo (*Triticum sp.*), variedad Santa Rosa. Centro Poblado de Macashca, Huaraz, Áncash 2023

RESUMEN

Dustin Aguilar Bustamante

daguilarb@unasam.edu.pe

 <https://orcid.org/0009-0004-9615-1336>

Guillermo Castillo Romero

Ingeniero M.Sc. Agrónomo, Docente Ordinario Principal de la Facultad de Ciencias Agrarias de la UNASAM, Director del Departamento de Agronomía, Jefe del Laboratorio de Suelos y Aguas de la FCA- UNASAM, ex- Decano de la Facultad de Ciencias Agrarias - UNASAM.

gcastillor@unasam.edu.pe

 <https://orcid.org/0000-0002-6139-7465>

José Ramírez Maldonado

Egresado de la Universidad Nacional "San Luis Gonzaga" de Ica con el grado de Bachiller en Ciencias Agrícolas (Octubre de 1985), Ingeniero Agrónomo de la Universidad Nacional "San Luis Gonzaga" de Ica (Diciembre de 1985), con Maestría en Ciencias e Ingeniería con mención en Gestión Ambiental dada por la Universidad Nacional "Santiago Antúnez de Mayolo" - Huaraz (Marzo del 2004), Doctor en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible dada por la Universidad Nacional Federico Villarreal - Lima (Marzo del 2006). Experiencia Laboral: Ex - Co-Director del Programa Cordillera Negra, Asesor, Consultor y Supervisor de Proyectos.

jramirez@unasam.edu.pe

 <https://orcid.org/0000-0001-8095-4661>

La investigación se realizó en el Centro Poblado de Macashca ubicado en el distrito de Huaraz, provincia de Huaraz, Región Áncash. El objetivo fue evaluar el efecto de tres dosis de microorganismos eficaces en dos etapas fenológicas del cultivo de trigo (*Triticum sp.*) variedad Santa Rosa. En la investigación se utilizó un Diseño de Bloques Completamente al Azar (DBCA) con Arreglo Factorial de 4 x 2 y con 4 bloques, con la población de cultivo de trigo que fue aplicada con EM y como muestra un metro lineal de trigo. Las variables estudiadas fueron: tamaño de planta, tamaño de espiga, número de granos por espiga, peso de granos por espiga, rendimiento y rentabilidad. Los mejores resultados de la dosis de microorganismos sobre las variables de estudio fueron D3 (dosis 5 % de EM) en cuanto a rendimiento. En cuanto a la etapa fenológica, los factores EFV y EFR obtuvieron los mejores efectos sobre las variables de estudio. Los resultados más relevantes las obtuvieron el tratamiento T4 con una altura de 139.05, peso de granos por espiga 3.36 g., rendimiento de 2146.43 Kg/Ha, rentabilidad de 76.29 y utilidad neta S/ 3,715.46. y el T8 en tamaño de espiga 10.38 cm y número de granos por espiga con 50.38 unds.

Palabras clave: microorganismos eficaces, etapa fenológica y trigo

Cómo citar este artículo: Aguilar Bustamante, D., Castillo Romero, G., & Ramírez Maldonado, J. (2025). Efecto de tres dosis de microorganismo eficaces aplicados en dos etapas fenológicas del cultivo de trigo (*Triticum sp.*), variedad Santa Rosa. Centro Poblado de Macashca, Huaraz, Ancash 2023. *Aporte Santiaguino*, 18(1), 95–104. <https://doi.org/10.32911/as.2025.v18.n1.1257>

Recibido: 2025-03-17 | Aceptado: 2025-05-15

Effect of three doses of effective microorganisms applied at two phenological stages of wheat (*Triticum sp.*), Santa Rosa variety. Macashca rural center, Huaraz, Áncash, 2023

The research was conducted in the rural center of Macashca, located in the district of Huaraz, Huaraz province, Áncash region, with the objective of evaluating the effect of three doses of effective microorganisms (EM) at two phenological stages of the wheat crop (*Triticum sp.*), Santa Rosa variety. A Completely Randomized Block Design (CRBD) with a 4 x 2 factorial arrangement and 4 blocks was used, applying EM to the wheat crop population and sampling one linear meter of wheat. The variables studied were plant height, spike length, number of grains per spike, grain weight per spike, yield, and profitability. The best results for microorganism doses were observed with D3 (5% EM dose) in terms of yield, while the phenological stages EFV and EFR showed the most significant effects on the variables. Treatment T4 achieved the most notable results, with a plant height of 139.05 cm, grain weight per spike of 3.36 g, yield of 2146.43 kg/ha, profitability of 76.29%, and net profit of S/ 3,715.46. Treatment T8 stood out for spike length (10.38 cm) and the number of grains per spike (50.38 units).

Keywords: effective microorganisms, phenological stage, wheat

INTRODUCCIÓN

El trigo (*Triticum sp.*) es uno de los cultivos más relevantes en la región andina, especialmente porque constituye la principal fuente alimenticia para los habitantes de estas áreas. Además, su comercialización genera ingresos económicos que contribuyen a la estabilidad financiera de las familias andinas. No obstante, la producción de trigo enfrenta diversas limitaciones, tales

como la escasez de semillas de calidad, el manejo inadecuado del cultivo y la falta de control efectivo sobre plagas y enfermedades (Estrada & Altamirano, 2008).

Con el fin de mejorar la producción de trigo, se ha recurrido al uso de tecnologías y biotecnología aplicadas al cultivo. Se ha demostrado que el aumento de la productividad no depende únicamente de la manipulación genética del cultivo, sino también de la conservación del entorno ecológico. El medio ambiente en el que se desarrolla la planta influye significativamente tanto en su productividad como en su contenido nutricional. Por ello, se busca implementar alternativas que no dañen el entorno, como el control natural de plagas y enfermedades, evitando el uso de agroquímicos, y promoviendo la remediación de suelos agrícolas deteriorados, muchos de los cuales contienen productos tóxicos (Camarena et al., 2012).

La adopción de métodos que contribuyan simultáneamente a la producción y a la regeneración ambiental se considera una alternativa eficiente. Un ejemplo destacado es el uso de la tecnología EM (Microorganismos Eficaces), desarrollada por el Dr. Teruo Higa. Esta tecnología beneficia tanto al suelo como a la planta, ya que, mediante su aplicación, se puede regenerar la ecología del suelo, mejorando la microflora y fauna. Además, el uso de este caldo de microorganismos facilita la descomposición adecuada de la materia orgánica, lo que favorece la liberación de micronutrientes y macronutrientes, permitiendo una rápida absorción por parte de las plantas, lo que a su vez beneficia la producción (Luna & Mesa, 2016).

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se realizó en el Centro Poblado de Macashca, ubicado en el distrito de Huaraz, provincia de Huaraz, Región Áncash, a una altitud de 3500 m.s.n.m. Se empleó un Diseño de Bloques Completamente al Azar (DBCA) con un arreglo factorial 2x4, donde el primer factor consistió en dos etapas fenológicas y el segundo factor en cuatro dosis distintas de microorganismos eficaces. Los tratamientos evaluados fueron: T1 (0% de dosis, etapa fenológica vegetativa), T2 (3% de dosis, etapa fenológica vegetativa), T3 (4% de dosis, etapa fenológica vegetativa), T4 (5% de dosis, etapa fenológica vegetativa), T5 (0% de dosis, etapa fenológica reproductiva), T6 (3% de dosis, etapa fenológica reproductiva), T7 (4% de dosis, etapa fenológica reproductiva) y T8 (5% de dosis, etapa fenológica reproductiva).

La semilla utilizada fue de trigo (*Triticum sp.*), variedad Santa Rosa, obtenida del mismo centro poblado donde se llevó a cabo la investigación. El área de cultivo fue de 641 m², en la cual se delimitó 32 unidades experimentales de 5 metros de largo y 3 metros de ancho, dejando un camino de 0.5 metros entre cada unidad. La siembra se realizó por surcos, con una distancia de 35 cm entre ellos, y la cantidad de semilla utilizada por unidad experimental fue de 153 g.

La siembra se llevó a cabo entre los meses de noviembre y diciembre, periodo considerado adecuado para la siembra en la zona debido a las fluctuaciones fluviales constantes, que proporcionan suficiente humedad para la germinación y el crecimiento del trigo. Para asegurar el establecimiento adecuado de los microorganismos, se incorporó materia orgánica en los surcos, utilizando compost a razón de 1.5 kg por unidad experimental.

La solución de EM activo fue preparada 10 días antes de cada aplicación. La aplicación de EM activo se realizó periódicamente según la

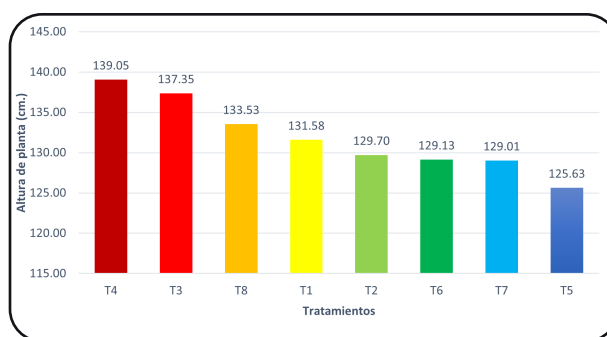
etapa fenológica del cultivo. En la etapa vegetativa, la primera aplicación se realizó al momento de la siembra, la segunda 10 días después, y la tercera a los 30 días posteriores. En la etapa reproductiva, la primera aplicación se efectuó cuando más del 50% de las plantas presentaban espigas formadas, la segunda 10 días después, y la tercera a los 30 días posteriores a la primera aplicación.

La evaluación y recopilación de datos se llevaron a cabo cuando las espigas y los granos alcanzaron la etapa de grano seco. Este estado se comprobó mediante la presión de los granos con las uñas, observando que tenían una estructura dura y se desprendían fácilmente de la espiga. Para la evaluación, se seleccionó aleatoriamente un surco intermedio de cada unidad experimental, del cual se midieron las espigas. Luego, se procedió al segado del trigo, al corte de las espigas y a la evaluación del tamaño y el número de granos por espiga, así como al pesaje de los granos. Finalmente, se evaluó el rendimiento total de grano de trigo obtenido en cada unidad experimental, y se calculó la rentabilidad del cultivo según los tratamientos aplicados.

RESULTADOS

Altura promedio de la planta de trigo (cm.)

Figura 1
Promedio de altura de planta

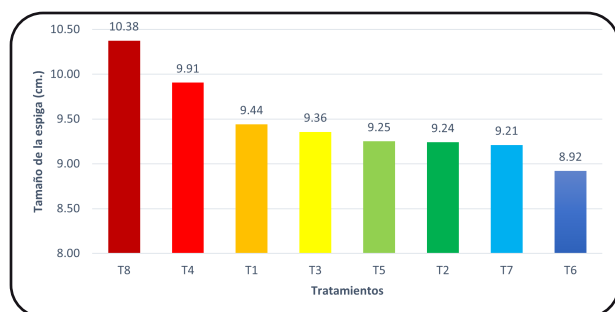


En la Figura 1 se observa que el tratamiento T4 (5 % de EM + Etapa Fenológica Vegetativa) obtuvo la mayor altura de planta con 139.05 cm., seguida del tratamiento T3 (4 % de EM + Etapa Fenológica Vegetativa) con 137.05 cm. y seguida del tratamiento T8 Y T1 respectivamente.

Tamaño de espiga de trigo (cm.)

Figura 2

Tamaño promedio de la espiga de trigo

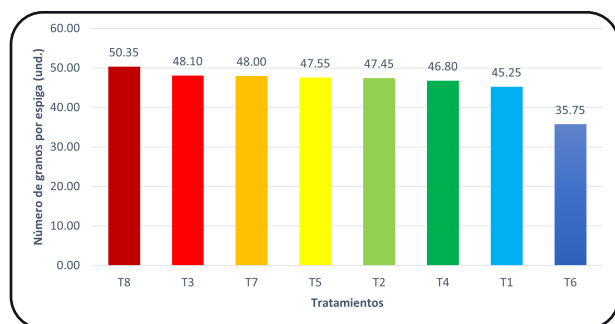


En la Figura 2, se observa que el tratamiento T8 (5 % de EM + Etapa Fenológica Reproductiva) obtuvo el mayor tamaño promedio de espiga con 10.38 cm., seguida del tratamiento T4 (5 % de EM + Etapa Fenológica Vegetativa) con 9.91 cm. y seguida del tratamiento T1 Y T3 respectivamente.

Número de granos por espiga (unds.)

Figura 3

Promedio de número de granos por espiga de trigo

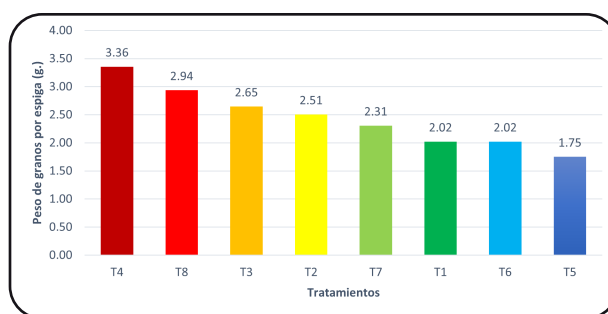


En la Figura 3, se observa que el tratamiento T8 (5 % de EM + Etapa Fenológica Reproductiva) obtuvo el mayor número de granos por espiga, con 50.35 und., seguida del tratamiento T3 (4 % de EM + Etapa Fenológica Vegetativa), con 48.10 und. y seguida del tratamiento T7 Y T5, respectivamente.

Peso de granos por espiga (g.)

Figura 4

Promedio de peso de granos por espiga de trigo

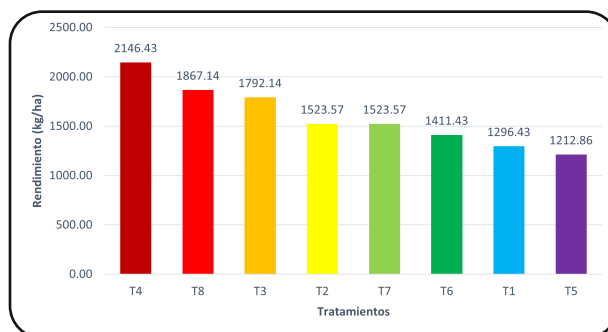


En la Figura 4, se observa que el tratamiento T4 (5 % de EM + Etapa Fenológica Vegetativa) obtuvo el mayor peso de granos por espiga, con 3.36 g., seguido del tratamiento T8 (5 % de EM + Etapa Fenológica Reproductiva), con 2.94 g. y seguido del tratamiento T3 Y T2, respectivamente.

Rendimiento del cultivo de trigo (kg/ha)

Figura 5

Rendimiento del cultivo de trigo



En la Figura 5, se observa que el tratamiento T4 (5 % de EM + Etapa Fenológica Vegetativa) obtuvo el mayor rendimiento, con 2146.43 kg/Ha., seguido del tratamiento T8 (5 % de EM + Etapa Fenológica Reproductiva), con 1867.14 kg/Ha. y seguido del tratamiento T3 Y T2, respectivamente.

Rentabilidad del cultivo de trigo

Tabla 1

Rentabilidad del cultivo de trigo aplicadas con EM en dos etapas fenológicas

Trat.	Rendimiento Kg/Ha	Costo de producción	Valor bruto de producción	Beneficio o utilidad	Rentabilidad (%)
T4	2146.43	S/4,870.25	S/8,585.71	S/3,715.46	76.29 %
T8	1867.14	S/4,870.25	S/7,468.57	S/2,598.32	53.35 %
T3	1792.14	S/4,773.65	S/7,168.57	S/2,394.92	50.17 %
T2	1523.57	S/4,677.05	S/6,094.29	S/1,417.24	30.30 %
T7	1523.57	S/4,773.65	S/7,468.57	S/1,320.64	27.67 %
T6	1411.43	S/4,677.05	S/5,645.71	S/968.66	20.71 %
T1	1296.43	S/4,387.25	S/5,185.71	S/798.46	18.20 %
T5	1212.86	S/4,387.25	S/4,851.43	S/464.18	10.58 %

De la Tabla 1, se concluye que el tratamiento T4 (5 % EM + Etapa fenológica vegetativa) obtuvo la mayor utilidad, de S/ 3,715.46. El tratamiento T8 (5 % EM + Etapa fenológica reproductiva) obtuvo la segunda utilidad más alta, de S/ 2,598.32. El tratamiento T3 (4 % EM + Etapa fenológica vegetativa) obtuvo el tercer nivel de utilidad, de S/ 2,394.92. El tratamiento T2 (3 % EM + Etapa fenológica vegetativa) obtuvo el cuarto nivel de utilidad, con S/ 1,417.24. El tratamiento T7 (4 % EM + Etapa fenológica

reproductiva) obtuvo el quinto nivel de utilidad, con S/ 1,320.64. El tratamiento T6 (3 % EM + Etapa fenológica reproductiva) obtuvo el sexto nivel de utilidad, con S/ 968.66. Las más bajas utilidades fueron obtenidas por los tratamientos T1 (0 % EM + Etapa fenológica vegetativa) y T5 (0 % EM + Etapa fenológica reproductiva), con S/ 798.46 y S/ 464.18, respectivamente.

RESULTADOS

Tamaño de planta de trigo

El resultado más resaltante en tamaño de planta de trigo en la presente investigación fue el tratamiento T4 (5% de EM + Etapa Fenológica Vegetativa) el cual obtuvo una altura promedio de 139.05 cm, lo cual concuerda con los datos obtenidos por Guerrero (2022), quien menciona que la aplicación de dosis altas de microorganismos eficaces durante la siembra y etapas iniciales de producción de soya logran alcanzar alturas mayores de planta, tal como lo demuestra en su investigación, donde el tratamiento T4 (60 lts EM) obtuvo el mayor tamaño promedio: 87 cm. Además, estos resultados también concuerdan con los de Monsalve (2015), quien sostiene que la aplicación de material orgánico, junto con la incorporación de microorganismos eficaces en la producción de maíz, pueden lograr un aumento en la altura de la planta como obtuvo con el tratamiento Rojo (EM + 13 Tn/Ha de guano + 7 Tn/Ha de compost), que alcanzó una altura de 200.50 cm. en maíz.

Tamaño de espiga

El resultado más resaltante en tamaño de espiga en la presente investigación la obtuvo el tratamiento T8 (5 % de EM + Etapa Fenológica Reproductiva), que alcanzó un tamaño promedio de 10.38 cm, lo cual no concuerda con los resultados obtenidos por Ñaupari (2015), quien afirma que tanto dosis altas como dosis bajas de microorganismos eficaces aplicadas al cultivo de maíz no logran un aumento significativo en el tamaño de mazorca.

Número de granos por espiga

El resultado más resaltante de número de granos por espiga en la presente investigación la obtuvo el tratamiento T8 (5 % de EM + Etapa Fenológica Reproductiva), que alcanzó un número

promedio de granos por espiga de 50.35 unds., lo cual no concuerda con los resultados obtenidos por Ñaupari (2015), quien manifiesta que tanto dosis altas como dosis bajas de microorganismos eficaces aplicadas al cultivo de maíz no logran un aumento significativo en el número de granos presentes en la mazorca de maíz.

Peso de granos por espiga

El resultado más resaltante de peso de granos por espiga en la presente investigación lo obtuvo el tratamiento T4 (5 % de EM + Etapa Fenológica Vegetativa), el cual alcanzó un peso promedio de granos por espiga de 3.36 g., lo cual concuerda con los resultados obtenidos por Ñaupari (2015) quien menciona que las dosis altas de microorganismos eficaces aplicadas al cultivo de maíz logran un aumento significativo en el peso de granos presentes en la mazorca de maíz. En el tratamiento que realizó alcanzó 5 l/ Ha de EM y un peso de 185.5 g. de granos por mazorca.

Rendimiento del cultivo de trigo

El tratamiento que obtuvo el mayor rendimiento de trigo por hectárea en la presente investigación fue el T4 (5 % de EM + Etapa Fenológica Vegetativa), con un rendimiento de 2146.43 kg/ha. Este resultado es consistente con los obtenidos por Ñaupari (2015), quien señaló que el uso de dosis altas de microorganismos eficaces en el cultivo de maíz genera un aumento significativo en el rendimiento, alcanzando un rendimiento de 11.59 Tn/ha cuando se aplicaron 5 l/ha de EM. Además, los resultados de este estudio coinciden con los de Guerrero (2022), quien, en su investigación sobre la soja, reportó que la aplicación de dosis elevadas de microorganismos eficaces en las etapas iniciales del cultivo incrementó el rendimiento. En su investigación, el tratamiento T4 (60 l/ha de EM) obtuvo el rendimiento más alto, con 3450 kg/ha de soja.

Rentabilidad del cultivo de trigo

El tratamiento que mostró el mayor resultado en términos de rentabilidad fue el T4 (5 % de EM + Etapa Fenológica Vegetativa), con una rentabilidad promedio de 76.29 % y una utilidad de S/ 3,715.46. Sin embargo, estos resultados no coinciden con los obtenidos por Ñaupari (2015), quien indicó que la incorporación de la tecnología EM en la producción de maíz amarillo duro no generó una diferencia significativa en la rentabilidad ni en el costo-beneficio, ya que no se observó una diferencia considerable entre los tratamientos evaluados.

En cuanto a la relación entre la etapa fenológica de aplicación y el rendimiento del cultivo, se recomienda la aplicación de microorganismos eficaces durante la etapa fenológica vegetativa, ya que este momento favorece el crecimiento de la planta, alcanzando una altura promedio de 134.42 cm, un peso de granos por espiga de 2.63 g, un rendimiento promedio de 1689.64 kg/ha, y una rentabilidad del 76.29 %.

La dosis recomendada para la aplicación es la dosis 3 (5 % de EM), ya que esta presentó los mejores resultados en cuanto a altura de planta (136.20 cm), tamaño de espiga (10.14 cm), número de granos por espiga (48.58), peso de granos por espiga (3.15 g), rendimiento (2006.79 kg/ha) y rentabilidad (76.29 %) cuando se aplicó en la etapa fenológica vegetativa.

En relación con la dosis de microorganismos que favorece el aumento del rendimiento, la dosis 3 (5 % de EM) es la más efectiva, ya que obtuvo los mejores resultados en altura de planta (136.20

cm), tamaño de espiga (10.14 cm), número de granos por espiga (48.58), peso de granos por espiga (3.15 g) y rendimiento (2006.79 kg/ha).

Respecto a la etapa fenológica, la etapa vegetativa es la más adecuada para la aplicación de microorganismos eficaces, ya que produjo los mejores resultados en cuanto a altura de planta (134.42 cm), peso de granos por espiga (2.63 g) y rendimiento promedio (1689.64 kg/ha).

El tratamiento que generó la mayor rentabilidad fue el T4 (5 % de EM + Etapa Fenológica Vegetativa), con una rentabilidad de 76.29 % y un beneficio de S/ 3,715.46. Por lo tanto, se recomienda la aplicación de esta dosis durante la etapa fenológica vegetativa para maximizar los beneficios económicos para los agricultores.

REFERENCIAS

- Estrada, R. y Altamirano, H. (2008). *Cultivo de Trigo en la Sierra Sur del Perú*. INIA. https://repositorio.inia.gob.pe/bitstream/20.500.12955/107/1/Trigo_Sierra_Sur_2008.pdf
- Camarena, F., Chura, J., & Blas, R. (2012). *Mejoramiento Genético y Biotecnológico de las Plantas*. AGROBANCO. https://www.agrobanco.com.pe/wp-content/uploads/2017/07/MEJORAMIENTO_GENETICO_Y_BIOTECNOLOGICO_DE_PLANTAS.pdf
- Luna, M., & Mesa, J. (2016). Microorganismos Eficientes y sus beneficios para los agricultores. *Revista Científica Agroecosistema*, 4(2), 31-40. <https://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes/article/view/84/115>
- Guerrero, R. (2022). Efectos de microorganismo eficaces (EM) aplicados en diferentes dosis sobre el cultivo de la soja. *Revista multidisciplinaria Ciencia Latina*, 6(1). <https://ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/download/1653/2321/>
- Monsalve, J. (2015). *Evaluación de los ME (Microorganismos eficaces) sobre los parámetros físicos, químicos y microbiológicos del suelo en la producción de maíz* [Tesis de grado, Universidad del Azuay]. <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/4846/1/11291.pdf>
- Ñaupari, E. (2015). *Evaluación de diferentes dosis de microorganismos eficientes (ME) en cultivo de Zea mays L. (Maíz amarrillo duro) en la zona de Satipo* [Tesis de grado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. <https://acortar.link/SultEf>

Determinación del ángulo óptimo de inclinación para mejorar la captación solar en instalaciones térmicas y fotovoltaicas en zonas cercanas a latitud 0°

RESUMEN

Segundo Guasumba Codena

sguasumba@espe.edu.ec

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE,
Departamento de Ciencias de la Energía y
Mecánica, Sangolquí, Ecuador

Isidoro Lillo Bravo

isidorolillo@us.es

Universidad de Sevilla, Departamento de
Termodinámica y Energías Renovables,
Andalucía, España

José Díaz Santamaría

jodiaz@espe.edu.ec

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE,
Departamento de Ciencias de la Tierra y la
Construcción, Sangolquí, Ecuador

Hugo Bonifáz García

hfbonifáz@espe.edu.ec

Universidad de las Fuerzas Armadas
ESPE, Departamento de Ciencias Exactas,
Sangolquí, Ecuador

Jerry Tacán Jaya

jatacan@espe.edu.ec

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE,
Departamento de Ciencias de la Energía y
Mecánica, Sangolquí, Ecuador

El objetivo fue determinar los ángulos óptimos de inclinación en la ciudad de Sangolquí-Ecuador que se encuentra a una latitud $-0,3^\circ$ y longitud de $-78,44^\circ$. En zonas cercanas a la línea ecuatorial, existen serias dificultades para la ubicación e inclinación de las instalaciones térmicas y fotovoltaicas debido a la presencia de nubosidad, lluvias intensas, microclimas variables y cambio en la posición angular diaria del sol que forman trayectorias aparentes, las mismas que tomando en cuenta el medio día solar y la vertical de la localidad, forman ángulos de cénit que cambian desde $+23,45^\circ$ el 21 de junio hasta $-23,45^\circ$ el 22 de diciembre de cada año. Estos factores disminuyen de manera significativa la capacidad de captación de la luz solar y por consecuencia el rendimiento de instalaciones fijas que utilizan la energía solar para su funcionamiento. Además, el desconocimiento de estas condiciones climáticas y de radiación solar, pueden afectar de manera significativa al dimensionamiento óptimo de captadores planos o paneles fotovoltaicos con la consecuente baja productividad energética y mínima relación beneficio costo.

Palabras clave: insolación, inclinación, corrección, irradiación

Cómo citar este artículo: Codena, S. G., Bravo, I. L., Santamaría, J. D., García, H. B., & Jaya, J. T. (2025). Determinación del ángulo óptimo de inclinación para mejorar la captación solar en instalaciones térmicas y fotovoltaicas en zonas cercanas a latitud 0° . *Aporte Santiaguino*, 18(1), 105–126. <https://doi.org/10.32911/as.2025.v18.n1.1235>

Recibido: 2025-03-17 | Aceptado: 2025-05-15

Determination of the optimal tilt angle to improve solar capture in thermal and photovoltaic installations in areas close to latitude 0°

In areas near to the equator, there are serious difficulties for the location and inclination of thermal and photovoltaic installations, due to the presence of cloud cover, heavy rainfall, variable microclimates and change in the daily angular position of the sun, that form apparent trajectories, which considering the solar noon and the vertical of the locality, form zenith angles that change from +23.45° on June 21 to -23.45° on December 22 of each year. These factors significantly reduce the capacity to capture sunlight, and consequently the performance of fixed installations that use solar energy for their operation. Also, the lack of knowledge of these climatic conditions and solar radiation can significantly affect the optimal sizing of flat collectors or photovoltaic panels, with the consequent low energy productivity and minimum benefit-cost ratio. Therefore, the objective of this research is to determine the optimal angles of inclination, for which the city of Sangolquí-Ecuador is taken as a reference, which is located at a latitude of -0.3° and a longitude of -78.44°.

Keywords: Sunshine, slope, correction, irradiation

INTRODUCCIÓN

La selección del ángulo de inclinación en instalaciones térmicas y fotovoltaicas en países ubicados en el hemisferio norte o sur no presenta mayores complicaciones, ya que las superficies de captación de luz solar deben orientarse hacia el ecuador. En este contexto, el ángulo de inclinación (+ β) se puede ajustar de acuerdo con las variaciones estacionales (Arribas et al., 1999). Sin embargo, en las regiones cercanas a la línea ecuatorial, los instaladores enfrentan serias dificultades al

colocar captadores planos o paneles fotovoltaicos. En algunos proyectos, se opta por orientar los paneles en dirección norte-sur, inclinando las superficies hacia el ecuador (+ β) o hacia el polo más cercano (- β), pero esta estrategia no garantiza una generación de energía constante a lo largo del año. Las variaciones diarias en la posición angular del sol, la presencia de nubosidad, las lluvias y las fluctuaciones climáticas locales afectan la eficiencia de la captación solar. Además, en ciertos casos, los paneles se orientan de este a oeste con ángulos de inclinación de aproximadamente 22°, adaptados al tipo de edificación. Sin embargo, este enfoque también presenta limitaciones, ya que después del mediodía solar, la probabilidad de lluvias, especialmente durante el invierno, aumenta significativamente.

Para determinar el procedimiento adecuado para seleccionar los ángulos de inclinación de instalaciones fijas en zonas cercanas a la latitud 0°, es esencial analizar diversas investigaciones previas sobre el tema. En estas regiones, el ángulo cenital solar, según Goswami (2023), se define como el ángulo entre la línea que conecta el emplazamiento al sol y la vertical del sitio, calculado como $Z = 90 - \alpha$, donde α es la altura solar. A partir de la vertical en una zona de latitud 0°, la trayectoria aparente del sol genera ángulos de cenit que varían entre +23,45° el 21 de junio y -23,45° el 22 de diciembre.

En el caso de un colector instalado en Surabaya, con latitud $\emptyset = 7,24^\circ$ y orientación este-oeste, el ángulo óptimo de inclinación se establece en 36° (Ekadewi et al., 2012). Este ángulo busca aprovechar la radiación solar durante las primeras horas del día, minimizando la incidencia de la luz solar sobre el captador por la tarde. En un estudio realizado en la ciudad de Makassar, Indonesia, se evaluó el rendimiento energético de colectores planos al variar los ángulos de inclinación entre 5°, 10°, 20° y 30°, midiendo las temperaturas de entrada y salida del fluido del captador, la temperatura del acumulador y la radiación solar.

El estudio reveló que, para una inclinación de 30°, se obtiene la mayor cantidad de energía, con un valor de 9858,32 kJ (Tangkemanda & Susanto, s.f.).

Otros estudios, como los de Norris (1996), destacan la importancia de las mediciones precisas para el diseño de captadores solares y tanques de almacenamiento térmico, con el fin de aumentar las aplicaciones y el uso de la energía solar. Asimismo, Mousavi et al. (2017) presentan un modelo de mayor precisión para estimar la radiación solar y sus componentes, global, difusa y directa, en diferentes localidades. Allen et al. (2006) desarrollaron un procedimiento para estimar la radiación solar global diaria sobre superficies inclinadas, considerando tanto la inclinación como la energía incidente, y utilizando varios modelos para realizar balances energéticos. Muzathik et al. (2010) propusieron un modelo para corregir la radiación solar global de superficies horizontales a inclinadas, basándose en el modelo exponencial lineal de Kadir Bakirsi. En la investigación de Yang (s.f.), se identificaron y corrigieron errores en la literatura existente, ofreciendo una referencia precisa en cuanto a los modelos de estimación de la radiación solar, con 26 modelos descritos bajo una nomenclatura consistente. Finalmente, Hay (1993) de la Universidad de Auckland, distinguió diversas categorías de modelos según la escala temporal, ya sea en intervalos de horas o días, considerando el flujo de irradiación directa, difusa y reflejada por el suelo.

Para seleccionar el ángulo de inclinación de instalaciones térmicas o fotovoltaicas en países localizados en el hemisferio norte o en el sur, no existen complicaciones debido a que las superficies de captación de la luz solar deben estar orientadas al ecuador; es decir, con ángulo de inclinación (+) (Arribas et al., 1999), el mismo que puede modificarse tomando en cuenta la variación estacional. Sin embargo, en países cercanos a la línea ecuatorial, los instaladores tienen serias

dificultades en la colocación de captadores planos o paneles fotovoltaicos. En algunos proyectos, son instalados con orientación norte-sur, inclinando las superficies hacia el ecuador (+) o al polo más cercano (-). Esta distribución no garantiza que la generación de energía a lo largo del año sea constante debido a la variación diaria de la posición angular del sol, la presencia de nubosidad, lluvias y variación climática local. También se ha optado por orientar los paneles de este a oeste y ángulos de inclinación de acuerdo con el tipo de edificación; es decir, alrededor de 22°. Este último criterio de instalación se ve afectado porque después del mediodía solar es mayor la probabilidad de lluvias especialmente en el invierno. Para poder identificar los aspectos fundamentales que permitan determinar el procedimiento adecuado para la selección de ángulos de inclinación de instalaciones fijas en zonas cercanas a latitud 0°, se analizan varias investigaciones relacionadas con este ámbito. Como se había indicado anteriormente, para el caso de regiones cercanas a la latitud 0°, el ángulo de cenital solar –de acuerdo con Goswami (2023)– es el ángulo entre la línea de emplazamiento al sol y la vertical del sitio, $Z=90-\alpha$, donde α es la altura solar. Tomando como referencia la vertical en una zona de latitud 0°, la trayectoria aparente del sol produce ángulos de cénit dentro de un rango de +23,45 al 21 de junio al -23,45 al 22 de diciembre. Para un colector instalado en latitud en Surabaya con orientación este-oeste, el ángulo óptimo de inclinación se define en 36° (Ekadewi et al., 2012). En este caso, pretende aprovechar la radiación solar en la mañana, reduciendo la incidencia de la luz solar sobre el captador por la tarde.

En un estudio realizado en la ciudad de Makassar en Indonesia, Tangkemanda y Susanto (s.f.) realizaron una evaluación energética de colectores planos variando los ángulos de inclinación de 5°, 10°, 20°, y 30°, para medir los cambios en las temperaturas de entrada y salida del fluido del captador, temperatura del

acumulador y desde luego la medición de la radiación solar. Por lo tanto, para la inclinación de 30°, se obtiene la mayor cantidad de energía, con un valor de 9858,32 (kJ). Otros estudios como los desarrollados por Norris (1996) indican que las mediciones son esenciales para el diseño de captadores solares y tanques de almacenamiento térmico, para incrementar las aplicaciones y usos de la energía solar. Mousavi et al. (2017) revisaron un modelo de mayor precisión para la estimación de la radiación solar y sus componentes global, difusa y directa en localidades seleccionadas con el propósito de incrementar la cantidad de radiación incidente sobre paneles fotovoltaicos.

Por otra parte, Allen et al. (2006) desarrollaron un procedimiento para estimar la radiación solar global diaria, para superficies inclinadas tomando en cuenta la inclinación y la energía incidente utilizando varios modelos para realizar los balances energéticos. También Muzathik et al. (2010) elaboraron un modelo para corregir la radiación solar global de superficie horizontal a inclinada, basados en el modelo exponencial lineal de Kadir Bakirsi. En la investigación propuesta por Yang (s.f.), se identificó y corrigió algunos errores existentes en la literatura. Se describen 26 modelos utilizando una nomenclatura consistente. Hay (1993), de la Universidad de Auckland, desarrolló una investigación donde distinguió numerosas categorías de modelos en función de la escala temporal; es decir, intervalos de tiempo en horas o en días, en función del flujo de irradiación, directa, difusa, y reflejada por el suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Corrección de la radiación solar de superficie horizontal a inclinada

Para dimensionar instalaciones solares térmicas, de acuerdo con Jutglar (2004) basta conocer la irradiación diaria para el día tipo del mes considerado, desglosada en directa y

difusa sobre una superficie inclinada. Muchos observatorios meteorológicos solo suministran datos de medición de irradiación diaria global, directa y difusa, pero sobre superficie horizontal. Por ello es necesario seguir un procedimiento de cálculo para corregir la irradiación horizontal a inclinada, de acuerdo con lo siguiente:

En primer lugar, se necesita calcular la declinación magnética (δ) dada por la ecuación de Cooper extraída de Duffie y Beckman (2006) desarrollada en 1969.

$$\delta = 23.25 \sin\left(360 \frac{284+n}{365}\right) \dots\dots\dots(1)$$

Otro parámetro geométrico es la latitud (ϕ), que corresponde al ángulo comprendido entre el paralelo de la localidad y el ecuador, tomándose como positivo para el hemisferio norte y negativo para el hemisferio sur. A continuación, se define la expresión para el ángulo horario de la puesta de sol para superficie horizontal (h_s).

$$\cosh s = -tg\phi tg\delta \dots\dots\dots(2)$$

Donde: ϕ latitud del sitio y la declinación magnética. A continuación, se calcula el término r^2 que depende del número de día del año, cuyo valor tiene un rango de 1 a 365 días.

$$r^2 = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{360}{365}n\right) \dots\dots\dots(3)$$

Para calcular la radiación solar extraterrestre es necesario conocer valor de la constante solar (I_{sc}) o irradiancia en el exterior de la atmósfera. Para lo cual se han realizado varios estudios entre los cuales se tiene el valor recomendado por Frohlich en 1978, $I_{sc} = 1373$ (W/m^2). Sin embargo, en 1994 con los datos conseguidos por el satélite (UARS), el World Radiation Center (WRC), ha adoptado el valor de 1367 (W/m^2) con un error estimado del 1% [13]

Continuando con el proceso, la ecuación para calcular la irradiación solar extraterrestre diaria sobre una superficie horizontal está definida por:

$$H_e = \frac{24r^2}{\pi} I_{sc} (h_s \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \sinh_s) \dots\dots\dots(4)$$

Donde: I_{sc} la constante solar o irradiancia en (W/m²), h_s ángulo horario de la puesta de sol para superficie horizontal (°), δ declinación magnética (°), ϕ latitud de la localidad(°).

El factor de insolación que se expresa como la razón entre las horas de máxima insolación medidas sobre superficie horizontal y el número de horas de claridad durante el día.

$$\sigma = \frac{HSP}{N} \dots\dots\dots(5)$$

En esta parte del procedimiento de cálculo, se puede determinar la irradiación solar sobre superficie horizontal (H_0), tomando en cuenta varios parámetros como el valor de la radiación extraterrestre (H_e), el factor de insolación y los valores de los constantes empíricas a y b, que dependen de cada región donde se requiere analizar el recurso solar para aplicaciones térmicas y fotovoltaicas. Para las constantes a y b, de acuerdo con Fritz (1951) a=0,35, b=0,61 dado en Duffie y Beckman (2006). Sin embargo, para este estudio se consideran los valores a=0,25 y b=0,45 para la región sierra del Ecuador. Con lo anteriormente descrito, se utiliza la ecuación de Page para calcular la irradiación solar sobre superficie horizontal (H_0), a partir de la extraterrestre.

$$H_o = H_e(a + b\sigma) \dots\dots\dots(6)$$

Partiendo de los valores de (H_0), se inicia con el proceso de corrección de la irradiación para superficie inclinada. Se inicia calculando el ángulo horario de la puesta de sol para superficie inclinada ($h_{s,s,0}$), donde se toma el valor mínimo de la ecuación (7).

$$h_{s,s,0} = \min \{ \arccos [-tg(\phi - \beta)tg\delta], h_s \} \dots\dots\dots(7)$$

Donde: β el ángulo de inclinación de la superficie colectora.

Posteriormente, se calcula la relación entre la irradiación, en media diaria mensual, difusa y directa frente al índice de nubosidad [11].

$$\frac{H_d}{H_o} = 1,39 - 4,027K + 5,531K^2 - 3,108K^3 \dots\dots\dots(8)$$

donde $K=a+b\sigma$ es el índice de nubosidad, H_d es la irradiación difusa.

Cálculo del factor R_b para pasar la radiación directa de la horizontal a la inclinada ($H_{t,s,\gamma=0}$)

$$R_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \sinh_{s,s,0} \sin(\phi - \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \sinh_s + h_s \sin \phi \sin \delta} \dots\dots\dots(9)$$

El valor de la irradiación total en media diaria sobre superficie inclinada ($H_{t,s,\gamma=0}$) definido en (Rufes Martines, 2010) se puede expresarse de la siguiente forma:

$$H_{t,s,\gamma=0} = H_b R_b + \frac{1 + \cos \beta}{2} H_d + \rho \frac{1 - \cos \beta}{2} H_o \dots\dots\dots(10)$$

siendo $H_b = H_o - H_d$

Donde: H_b radiación directa, R_b factor de corrección, H_d irradiancia difusa, H_o irradiación sobre superficie horizontal, ρ reflectividad del suelo, ángulo de inclinación de la instalación. La ecuación (10) corresponde a la suma de los componentes de la radiación directa, difusa y el albedo del suelo. Además, a la componente difusa se puede considerarse isótropa, es decir uniformemente distribuida en el cielo.

Procedimiento de medición de la radiación sobre superficie horizontal

El conocimiento preciso de los datos de radiación solar o su estimación es crucial para maximizar los beneficios derivados del sol (Oliveira et al., 2024). Según Myers (2003), la medición y modelización de la radiación solar espectral y de banda ancha es importante para la evaluación y el despliegue de sistemas de energía solar renovable. Por otra parte, Younes et al. (2005) revisaron los procedimientos para la evaluación de la calidad de los datos de la irradiación solar para lo cual desarrollaron una envolvente en el índice de claridad, la radiación global y difusa.

Existen estudios más avanzados para la predicción de la radiación solar como los desarrollados por Escalona et al. (2024), donde se explora la predicción de patrones diarios de irradiancia horizontal (GHI), en la región de Zacatecas, México, utilizando una gama de modelos de predicción, como los modelos tradicionales y redes neuronales (ENAS).

Por otra parte, al considerar que la medición de la radiación solar incidente es un procedimiento que permite mejorar la precisión en los datos, es necesario identificar los instrumentos de medición, como es el caso del pirheliógrafo que mide el flujo de radiación solar directa con incidencia normal (Carg & Carg, 1993). El instrumento puede estar acoplado a un dispositivo eléctrico que sigue al sol. En cambio, un piranómetro es un instrumento para medir irradiancia directa y difusa proveniente de todo el hemisferio mediante el efecto Seebeck. Por otra parte, de acuerdo con el análisis del estado del arte sobre la estimación del recurso solar, se puede indicar que existen diferentes técnicas para determinar el recurso solar local, como el uso de anuarios meteorológicos, modelos de radiación, mapa solar, datos de satélite de la Nasa, Banco Mundial, entre otras agencias y, desde luego, la medición in situ utilizando instrumentos tales

como piranómetros para medir radiación global, directa y difusa. Estos aparatos permiten obtener los valores de irradiancia solar en (W/m^2). Además, para hallar las horas de máxima incidencia de la radiación solar se puede medir la heliofanía, utilizando instrumentos como heliógrafos. En este estudio se utilizó el último método para la medición de la insolación solar máxima en (HSP). Se hizo uso del heliógrafo modelo Campbell-Stokes con su respectivo soporte giratorio, el cual permite ajustar la inclinación del instrumento de acuerdo con el movimiento angular del sol que forma un ángulo acimutal con la vertical del sitio, tomando en cuenta la orientación sur-norte, para cada día del año.

El principio de funcionamiento de este aparato consiste en que una esfera de cuarzo de 100 mm de diámetro capta la radiación solar directa y lo concentra en forma de un haz cónico sobre una cinta rectangular de material antifricción de color marrón que actúa como absorbedor. En el punto focal, se producen temperaturas sobre los $400^{\circ}C$, que queman la probeta formando círculos con diámetros 1 a 5 mm. Estas variaciones en la longitud del diámetro dependen de la intensidad de la radiación solar horaria. Al finalizar el día, se retira la probeta que se encuentra bajo el concentrador, observándose una huella de forma parabólica donde se realiza la medición y el trazado mediante el uso de un instrumento de medición. En promedio, se consigue un valor de 17.5 mm /HSP. Las horas de sol pico u horas de máxima insolación obtenidas durante un año de medición e interpretación, se registra en la Tabla 1 y corresponden a la insolación en una localidad que tiene dos estaciones: invierno y verano, con latitud cercana a la línea ecuatorial (0°). Analizando los datos, se puede indicar que las horas de máximo brillo solar en media diaria anual es de 4,17 HSP. El peor mes corresponde a marzo, con un valor en media diaria mensual de 3 horas de sol pico (HSP). Esta baja insolación ocurre por la presencia de lluvias y nubosidad que son características en este mes del año.

Tabla 1

Horas de máxima insolación solar en media diaria mensual sobre superficie horizontal

enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
2,5	4,25	1,15	6	3,5	5,5	8	8,25	6	5,25	4	5,5
2,25	4,25	0	6	2	7,25	5	6,5	4	6,5	0,75	9
1	8,5	0,95	3	1,5	8	9	9,5	6,4	7,25	6	6,5
1	4,25	4	0,75	7	2	9	9	6	2	6,5	6,5
2	2	1,15	2	4	5,25	9	8	2,5	3,75	5,5	5
3	6	6,5	6,5	4,5	1,5	6,5	5	0	3	3	4,5
4,5	7,5	5,5	5,5	6,25	0,75	8,5	9	4,5	6	2,25	5
1,5	1,5	0,5	4,5	1,25	0,75	4,5	8	5	5,5	4	0,3
2	5,5	0,75	3	6	2,5	3,5	2,5	6,5	6	1,25	5
4,5	6	0,5	6	7	3,5	2,5	6,5	5,75	0,15	1	3
2,5	4	0,25	1,5	2,5	3	6,25	2	2,25	6	4,25	4
4	1	3	1,25	1	7,75	2,5	3	1,25	5,15	2,5	0,3
4,5	6	1,3	4,5	7,5	0,2	1,5	3,5	8	5	3,5	1,5
5,5	6,5	5,5	4,5	4	1,75	7,5	5,25	6	3,5	4,25	0
6	4	0	2	1,25	0	7,5	5	5,5	5,15	6	2,5
4,5	7	2,25	6	1,5	5	6,5	2,25	5	1,25	3,5	1,5
3,25	5,5	2	0	1,5	6	2,5	4	8,5	2	3,5	1,25
5,5	0	0,25	3,25	2	5,25	4,25	2	1	6,5	4,5	0,75
3,5	0,75	5	1	7,25	3,5	3	3,25	5,25	6,5	5,5	2,25
2	6,5	3	5,5	7	7,5	9	8	4,5	6,5	3	3,15
3,5	2,75	4,5	5,5	8	3,5	9	3	2	1,75	4	4,25
0	0,5	1,5	7,5	6	7,5	7,5	2	4,25	5	3	4
3	1,5	2,25	7	6,5	2,5	1,75	3,5	1,75	3,5	2	6,25
3,25	5,5	4,5	7,5	4,25	5	2	5,5	6,5	6	4	8,5
0,25	5,5	4,5	7,25	1,25	5	2	1	7,25	4,25	1,25	3
1,25	3,5	5,25	2	2,25	6	5	2,25	5	0,75	5	5,25
6	2,5	5	4,25	5,5	2,5	4	2,5	10	5,25	6,75	5,5
7	5	3,5	0,3	7,5	4	8	4,5	5	6	7,15	4
6		3,5	2	6	7,25	7,5	0,75	1,5	2	2	0,75
6,5		8	3	2	6	3,5	1	2	7	2,5	5
8,5		7		3,25		9,5	5,25		3		6,5
3,57	4,21	3,00	3,97	4,23	4,21	5,67	4,57	4,64	4,43	3,75	3,80
110,75	117,75	93,05	119,1	131	126,2	176	141,75	139,15	137,45	112,4	120,5

Las réplicas para el mes de marzo del siguiente año dan un promedio mensual de 2,79 (HSP). El criterio del peor mes es muy útil en el dimensionamiento de instalaciones térmicas y fotovoltaicas. A continuación, se puede observar los datos obtenidos en la Tabla 2, donde se presentan los valores de máxima insolación en horas de sol pico expresados en media diaria mensual. De allí que, el promedio de valores de insolación anual en los dos años consecutivos difiere en muy poco.

Tabla 2

Datos de horas de sol pico en promedio diario mensual

	Año 1	Año 2
Mes	HSP	HSP
enero	3,57	5,16
febrero	4,21	3,59
marzo	3	2,78
abril	3,97	3,33
mayo	4,23	4,02
junio	4,21	3,94
julio	5,67	4,24
agosto	4,57	5,46
septiembre	4,64	5,57
octubre	4,43	3,71
noviembre	3,75	4,58
diciembre	3,8	5,2
Promedio	4,17	4,30

Análisis de resultados y discusión

Inclinación óptima para instalaciones fijas

Para lograr una captación óptima de la energía solar, el ángulo de inclinación es uno de los parámetros relevantes en el diseño de instalaciones (Khatib et al., 2024). La selección del ángulo óptimo de inclinación puede permitir una mayor captación de la energía incidente. Por otra parte, Bakirci (2012) realiza una optimización de los ángulos de inclinación para superficies inclinadas variando de 0° a 90°, en pasos de 1°.

Posteriormente, con los valores de radiación solar máxima para un período específico, se verifica que el ángulo de inclinación depende de la latitud (Keshavarz et al., 2022). El ángulo de inclinación consiste en el ángulo que forma la superficie del colector con respecto a la horizontal. De acuerdo con Heywood (1971), el ángulo óptimo es $\beta_{opt} = \phi - 10$. Lunde (1980) considera al ángulo óptimo como $\beta_{opt} = \phi \pm 15$. Por otra parte, Duffie y Beckman (2006) proponen calcular este importante ángulo necesario en el dimensionamiento de instalaciones fijas con la expresión $\beta_{opt} = (\phi + 15) \pm 15$. Además, Qui y Riffat (2003) encuentran el ángulo óptimo para todo el año con la expresión $\beta_{opt} = \phi \pm 10$. Es necesario indicar que las expresiones matemáticas para calcular el ángulo óptimo anteriormente indicadas se utilizan para instalaciones fijas. En la zona de los trópicos hay épocas del año en que la mayor radiación no se recibe orientando la superficie del panel hacia el ecuador, sino con la superficie orientada al polo sur, utilizando para estas zonas la expresión $\beta_{opt} = \phi \pm 10$. En esta parte de la investigación, se realiza el procedimiento de cálculo para hallar la irradiación solar máxima variando β desde 0°, ± 5 ; ± 10 , ± 15 , ± 20 , y ± 25 °, de acuerdo con los ángulos indicados en Arribas et al. (1999) para zonas cercanas a latitud 0°. A continuación, en las tablas 3 y 4, se tienen los datos de irradiación solar en media mensual (Wh/m²día) para cada mes del año en función del ángulo de inclinación.

Tabla 3

Irradiación solar en media mensual variando el ángulo de inclinación (β : 0° , $\pm 5^\circ$, $\pm 10^\circ$)

Mes	$\beta = 0^\circ$	$\beta = 5^\circ$	$\beta = -5^\circ$	$\beta = 10^\circ$	$\beta = -10^\circ$
enero	3876,91	3765,44	3968,51	3638,25	4036,20
febrero	4239,51	4154,29	4304,55	4051,17	4347,28
marzo	3809,10	3794,67	3807,49	3764,36	3789,75
abril	4064,64	4106,28	4004,56	4128,37	3927,29
mayo	3932,70	4023,93	3821,27	4091,24	3693,47
junio	3783,01	3893,22	3651,86	3977,19	3505,15
julio	4350,54	4477,04	4199,52	4573,36	4029,69
agosto	4162,20	4233,06	4071,12	4281,31	3962,27
septiembre	4378,09	4381,07	4355,53	4364,32	4313,65
octubre	4317,61	4252,65	4362,65	4169,17	4386,50
noviembre	3950,54	3844,30	4036,92	3721,91	4099,86
diciembre	3934,02	3803,47	4043,16	3656,87	4125,62
Promedio	4066,57	4060,78	4052,26	4034,79	4018,06

Al analizar los datos de la Tabla 3, la irradiación solar sobre una superficie con un ángulo de inclinación $\beta=10^\circ$, se observa que el mes con menor irradiación solar es enero, con un valor de 3638,25 W·h/m²·día. En contraste, cuando la inclinación de $\beta=-10^\circ$, el mes con menor irradiación es junio, con un valor de 3505,15 (Wh/m²·día). Además, es importante indicar que con el ángulo de inclinación $\beta=0^\circ$, la irradiación promedio anual es de 4066,57 (Wh/m²·día), siendo este el mayor valor. Sin embargo, no se deben instalar superficies captadoras en sentido horizontal debido a que se dificulta en forma natural su limpieza por la presencia de contaminación ambiental, partículas

en suspensión, lluvias intensas y granizadas, lo cual afecta la vida útil de la instalación y su funcionamiento. A continuación, con $\beta=\pm 5^\circ$ ocurre lo mismo en vista de que esta inclinación no permite que el agua de lluvia fluya adecuadamente sobre la superficie colectora. Posteriormente, al seleccionar $\beta=\pm 10^\circ$, se tienen los valores de irradiación de 4034,79 y 4018,06 (Wh/m²·día). Se podría indicar que es un ángulo adecuado para una instalación solar para localidades cercanas a ($\emptyset=0^\circ$). En este caso, es indispensable saber que esta pequeña inclinación no permite captar la radiación solar de manera efectiva en los meses de junio y diciembre debido a la declinación máxima ($\delta=\pm 23,45^\circ$).

Tabla 4

Irradiación solar en media mensual variando el ángulo de inclinación (β : $\pm 15^\circ$, $\pm 20^\circ \pm 25^\circ$)

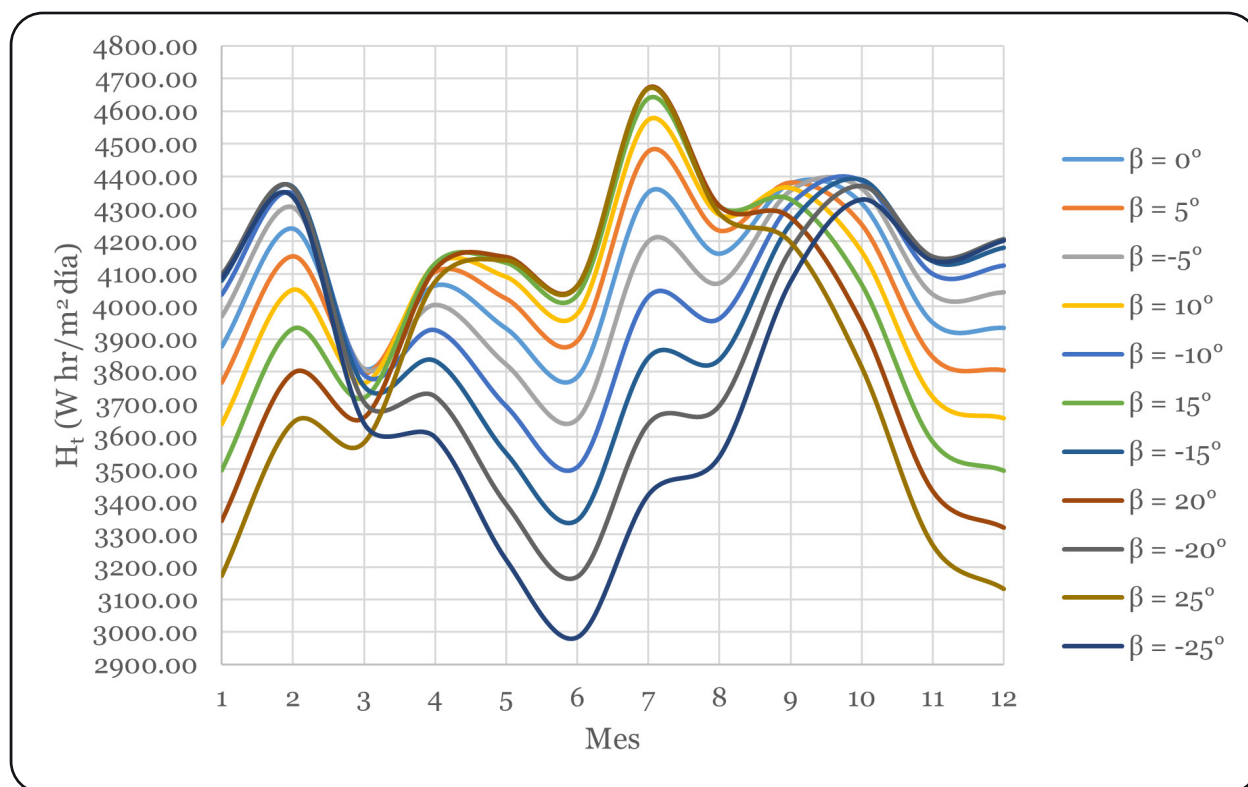
Mes	$\beta = 15^\circ$	$\beta = -15^\circ$	$\beta = 20^\circ$	$\beta = -20^\circ$	$\beta = 25^\circ$	$\beta = -25^\circ$
enero	3496,30	4079,22	3340,67	4096,78	3172,54	4088,07
febrero	3930,93	4367,26	3794,48	4364,13	3642,86	4337,59
marzo	3718,42	3756,02	3657,18	3706,54	3581,12	3641,68
abril	4130,67	3833,41	4113,06	3723,64	4075,52	3598,82
mayo	4133,85	3550,25	4151,02	3392,72	4141,95	3222,07
junio	4033,89	3343,97	4062,23	3169,55	4060,96	2983,23
julio	4638,39	3842,35	4670,93	3638,93	4669,68	3420,96
agosto	4306,47	3836,48	4308,08	3694,71	4285,74	3538,04
septiembre	4327,97	4252,79	4272,28	4173,39	4197,65	4076,07
octubre	4067,80	4388,92	3949,32	4369,77	3814,63	4329,02
noviembre	3584,29	4138,65	3432,50	4152,61	3267,68	4141,03
diciembre	3495,34	4180,41	3320,10	4206,52	3132,50	4202,78
Promedio	3988,69	3964,14	3922,65	3890,78	3836,90	3798,28

De manera similar, la Tabla 4 presenta los valores de irradiación solar para una inclinación de $\beta=15^\circ$. En este caso, el mes con menor irradiación es diciembre, con 3495,34 (Wh/m²·día). En cambio, para una inclinación de $\beta=15^\circ$, el mes con menor irradiación vuelve a ser junio, con 3343,97 Wh/m²·día. Además, al comparar los valores anuales de irradiación para cada uno de estos ángulos de inclinación, se observa que el valor más bajo corresponde a una inclinación de $\beta=15^\circ$, con un promedio anual de 3964,14 Wh/m²·día.

Este resultado sugiere que una inclinación negativa puede reducir significativamente la captación de energía solar en determinadas condiciones, lo que debe considerarse al diseñar sistemas de captación solar para maximizar la

eficiencia energética. Con respecto a la inclinación con $\beta=\pm 20^\circ$, el mes peor es diciembre con una irradiación de 3320,10 Wh/m²·día, y en el caso que la superficie del colector se oriente al polo sur, el peor mes corresponde a junio, con un valor de irradiación de 3169,55 Wh/m²·día. Finalmente, de acuerdo con Arribas et al. (1999), para zonas de latitud $\varnothing=0^\circ$, los ángulos de mayor inclinación son $\beta=\pm 25^\circ$. De allí que, para el ángulo positivo, el peor mes es diciembre, con una irradiación de 3132,50 Wh/m²·día, y para el ángulo con signo negativo es junio, con un valor de irradiación solar muy bajo, de 2983,23 Wh/m²·día. De acuerdo con instalaciones existentes, si se piensa en mejorar la captación de la radiación solar, no es recomendable colocar colectores planos o paneles fotovoltaicos con $\beta=\pm 25^\circ$ en localidades cercanas a latitud 0° .

Figura 1
Curvas de irradiación total variando el ángulo de inclinación (β)



Ángulo óptimo para instalaciones con algún tipo de seguimiento

Por otra parte, si se necesita determinar el ángulo óptimo para cada mes del año, se pueden utilizar varios procedimientos; uno de ellos es el propuesto por Nijegorodov et al. (1994), donde se plantea la dependencia del ángulo óptimo en función del día del año y la latitud. La ecuación empírica para el ángulo óptimo de inclinación β_{opt} dada por:

$$\beta_{opt} = \phi - \left[32 + \frac{\phi}{12} \sin \left(360 \frac{(284 + n)}{365} \right) \right] \left(\sin \left(360 \frac{(284 + n)}{365} \right) \right) \dots \dots \dots (11)$$

Donde: ϕ latitud de la localidad, n número de día del año.

La inclinación óptima mensual para cualquier localización puede ser igual a la inclinación óptima considerando el día tipo, aquel que presenta una radiación diaria extraterrestre

más próxima a la media mensual. Si el ángulo de azimuth $\gamma=0$, y n es fija, la ecuación (11) llega a ser:

$$\beta_{opt} = \left(1 - \frac{j^2}{12} \right) \phi - 32J \dots \dots \dots (12)$$

Donde:

$$J = \sin \left(360 \frac{284 + n}{365} \right) \dots \dots \dots (13)$$

Uno de los métodos más adecuados para determinar el ángulo óptimo para el hemisferio sur es el desarrollado por Khosravi et al. (2020). A partir de esto, se calcula el ángulo óptimo mensual, que se observa a continuación en la Tabla 5.

Tabla 5

Ángulo de inclinación óptimo mensual y anual para el hemisferio sur

Mes	Ecuación del ángulo óptimo	\emptyset	β_{opt}	β_{opt}
enero	$\beta_{opt} = -0,667\emptyset - 24,119$	-0,3	-23,91	-24
febrero	$\beta_{opt} = -0,850\emptyset - 18,142$	-0,3	-17,88	-18
marzo	$\beta_{opt} = -0,937\emptyset - 5,180$	-0,3	-4,82	-5
abril	$\beta_{opt} = -0,929\emptyset + 11,906$	-0,3	12,18	12
mayo	$\beta_{opt} = -0,892\emptyset + 25,504$	-0,3	25,77	26
junio	$\beta_{opt} = -0,733\emptyset + 35,434$	-0,3	35,65	36
julio	$\beta_{opt} = -0,717\emptyset + 33,988$	-0,3	34,20	34
agosto	$\beta_{opt} = -0,811\emptyset + 21,073$	-0,3	21,31	21
septiembre	$\beta_{opt} = -0,815\emptyset + 4,965$	-0,3	5,2	5
octubre	$\beta_{opt} = -0,829\emptyset - 12,591$	-0,3	-12,34	-12
noviembre	$\beta_{opt} = -0,766\emptyset - 24,747$	-0,3	-24,51	-25
diciembre	$\beta_{opt} = -0,609\emptyset - 25,817$	-0,3	-25,63	-26
Anual	$\beta_{opt} = -0,765\emptyset + 3,38$	-0,3	3,6	4

De la Tabla 5, para el cálculo del se ha determinado una serie de valores que indistintamente según sea el mes, cambia el valor, lo que permitiría obtener la mayor irradiación de cada uno de los meses a lo largo del año.

Tabla 6

Comparación de la irradiancia generada en instalaciones con β fijo y β_{opt}

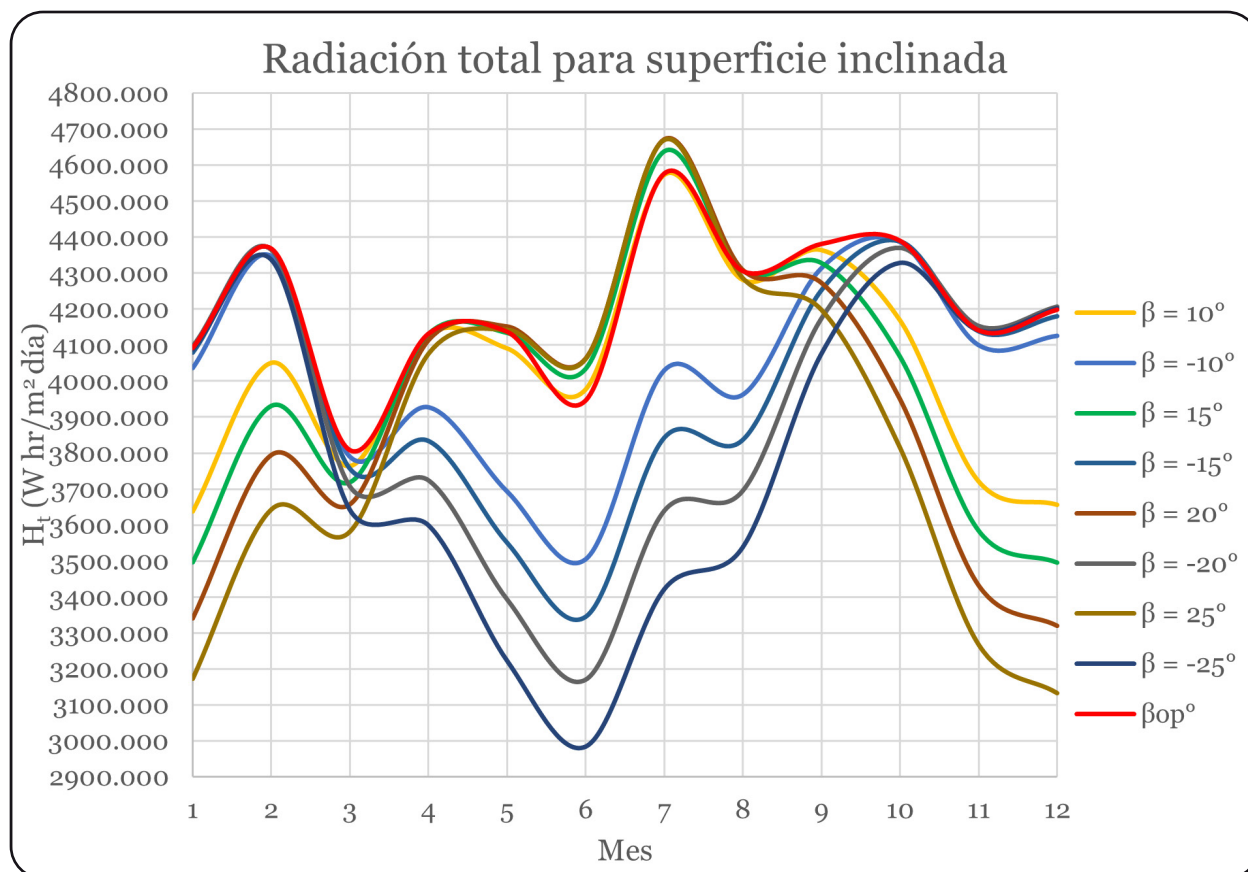
Mes	$\beta = 10^\circ$	$\beta = -10^\circ$	$\beta = 15^\circ$	$\beta = -15^\circ$	$\beta = 20^\circ$	$\beta = -20^\circ$	$\beta = 25^\circ$	β_{-25°	β_{opt} mensual
enero	3638,25	4036,20	3496,30	4079,22	3340,67	4096,78	3172,54	4088,07	4091,96
febrero	4051,17	4347,28	3930,93	4367,26	3794,48	4364,13	3642,86	4337,59	4368,18
marzo	3764,36	3789,75	3718,42	3756,02	3657,18	3706,54	3581,12	3641,68	3807,49
abril	4128,37	3927,29	4130,67	3833,41	4113,06	3723,64	4075,52	3598,82	4131,67
mayo	4091,24	3693,47	4133,85	3550,25	4151,02	3392,72	4141,95	3222,07	4136,91
junio	3977,19	3505,15	4033,89	3343,97	4062,23	3169,55	4060,96	2983,23	3945,69
julio	4573,36	4029,69	4638,39	3842,35	4670,93	3638,93	4669,68	3420,96	4577,08
agosto	4281,31	3962,27	4306,47	3836,48	4308,08	3694,71	4285,74	3538,04	4305,54
septiembre	4364,32	4313,65	4327,97	4252,79	4272,28	4173,39	4197,65	4076,07	4381,07
octubre	4169,17	4386,50	4067,80	4388,92	3949,32	4369,77	3814,63	4329,02	4390,05
noviembre	3721,91	4099,86	3584,29	4138,65	3432,50	4152,61	3267,68	4141,03	4141,03
diciembre	3656,87	4125,62	3495,34	4180,41	3320,10	4206,52	3132,50	4202,78	4198,34
Promedio	4034,79	4018,06	3988,69	3964,14	3922,65	3890,78	3836,90	3798,28	4206,25

Por consiguiente, reafirmamos lo anteriormente dicho en la Tabla 6, donde podemos observar la comparación de los promedios anuales de irradiación solar obtenidos para valores de 10° , -10° , 15° , -15° , 20° , -20° , 25° , -25° y el . De

estos valores obtenidos de los ángulos propuestos, la irradiación solar es menor a $4000 \text{ W}\cdot\text{h}/\text{m}^2\cdot\text{día}$, lo que es completamente diferente con el cuyo valor es de $4206.25 \text{ W}\cdot\text{h}/\text{m}^2\cdot\text{día}$.

Figura 2

Curvas de irradiación total variando el ángulo de inclinación y comparando β_{op}



En la Figura 2, se evidencia que los valores de irradiación obtenidos utilizando el ángulo mensual presentan una tendencia similar a los registrados con ángulos fijos de 15° y 25° durante el mes de máxima irradiación, correspondiente a julio. No obstante, en un análisis anual, la curva generada con mensual refleja un comportamiento

más uniforme y estable. Si bien los ángulos fijos muestran coincidencias puntuales en ciertos meses, presentan caídas significativas al inicio y al final del año, a diferencia del ángulo, que permite mantener niveles de irradiación más constantes a lo largo del periodo analizado.

CONCLUSIÓN

Para instalaciones fijas en zonas cercanas a la línea ecuatorial, se ha determinado en esta investigación que, para lograr una mayor captación de la energía solar durante el año, los captadores planos puedan ser instalados con los siguientes ángulos de inclinación. El ángulo con signo positivo significa que la superficie captadora está orientada hacia el ecuador y el negativo al polo más cercano. Por otra parte, para el caso de instalaciones fotovoltaicas utilizando el criterio dado en Arribas et al. (1999), donde se indica que el ángulo de inclinación debe ser mayor e igual a 15°, por lo que para esta aplicación se han seleccionado. Además, si se coloca algún tipo de sistema de seguimiento que pueda variar de acuerdo con el ángulo óptimo en cada mes del año, se tendría un promedio de 4206,25 Wh/m²día. Por otra parte, como trabajo futuro se propone que se realice una investigación para determinar el ángulo óptimo con orientación este-oeste, sabiendo que en zonas de mayor nubosidad es factible colocar los captadores con la orientación anteriormente indicada, tomando en cuenta que en los 9 meses del año está presente la estación invernal, y en la mañana se captaría mayor radiación solar.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Dr. Isidoro Lillo Bravo, investigador del GTER, por sus valiosas contribuciones y sugerencias en la elaboración de este artículo. Además, expresamos nuestra gratitud a los colaboradores del Centro de Investigaciones Energéticas Tecnológicas y Ambientales CITECNIA CORP., de la ciudad de Sangolquí – Ecuador, por el levantamiento e interpretación de datos de insolación solar durante el período de dos años.

REFERENCIAS

- Allen, R. G., Trezza, R., & Tasumi, M. (2006). Analytical integrated functions for daily solar radiation on slopes. *Agricultural and Forest Meteorology*. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.05012>
- Arribas, L., Bragado, J., & Caamaño, E. (1999). *Energía solar fotovoltaica y cooperación al desarrollo*. IEPALA.
- Bakirci, K. (2012). General models for optimum tilt angles of solar panels: Turkey case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 6149–6159. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.07.009>
- Carg, H. P., & Carg, S. N. (1993). Measurement of solar radiation - I. Radiation instruments. *Renewable Energy*, 3(4–5), 321–333. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(93\)9099-3](https://doi.org/10.1016/0960-1481(93)9099-3)
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2006). *Solar engineering of thermal processes* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Ekadewi, A., Handoyo, B., & Djatmiko, I. (2012). The optimal tilt angle of a solar collector. *International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application (ICSAA 2012)*.
- Escalona, M. I., Solís, L. O., Castañeda, C. L., Olvera, C. A., & Martínez, M. R. (2024). Comparative analysis of solar radiation forecasting techniques in Zacatecas, México. *Applied Sciences*, 14, 7449. <https://doi.org/10.3390/app14177449>
- Goswami, D. Y. (2023). *Principles of solar engineering*. Taylor and Francis.

- Hay, J. E. (1993). Calculating solar radiation for inclined surfaces: Practical approaches. *Renewable Energy*, 3(45), 372–380.
- Heywood, H. (1971). Operating experience with solar heating. *JIHVE*, 39, 61-69.
- Jutglar, L. (2004). *Energía solar: Energías alternativas y medio ambiente*. Ediciones Ceac.
- Keshavarz, S. A., Talebizadeh, P., Adalatia, S., & Mehrabian, M. A. (2022). Optimal slope angles to determine maximum solar energy gain for solar collectors used in Iran. *International Journal of Renewable Energy Research*, 2.
- Khatib, A. T., Samiji, M. E., & Mlyuka, N. R. (2024). Optimum solar collector's north-south tilt angles for Dar es Salaam and their influence on energy collection. *Cleaner Engineering and Technology*, 21, 100778. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100778>
- Khosravi, A., Sandoval, O. R., Talebjedi, B., Laukkanen, T., García, J. J., & El Haj Assad, M. (2020). New correlations for determination of optimum slope angle of solar collectors. *Energy Engineering*. <https://doi.org/10.32604/EE.2020.011024>
- Lunde, P. J. (1980). *Solar thermal engineering, space heating and hot water systems*. John Wiley & Sons.
- Mousavi, S. A., Hizam, H., & Gomes, C. (2017). Estimation of hourly, daily and monthly global solar radiation on inclined surfaces: Model revisited. *Energies*, 10(1), 134. <https://doi.org/10.3390/en10010134>
- Muzathik, A. M., Ibrahim, M. Z., Samo, K. B., & Wan Nik, W. B. (2010). Estimation of solar global irradiation on horizontal and inclined surfaces based on the horizontal measurements. *Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.12.003>
- Myers, D. R. (2003, September 15–16). Solar radiation modeling and measurements for renewable energy applications: Data and model quality. *National Renewable Energy Laboratory*, Edinburg, Scotland.
- Nijegorodov, N., Devan, K. R. S., Jain, P. K., & Carlsson, S. (1994). Atmospheric transmittance models and an analytical method to predict the optimum slope of an absorber plate variously oriented at any latitude. *Renewable Energy*, 4(5), 529–543.
- Norris, D. J. (1996). Solar radiation on inclined surfaces. *Solar Energy*, 10(2), 72–76.
- Oliveira, M., López, H. S., Mendonga, P., & Tenpierik, M. (2024). Solar radiation measurements – Techniques and instrumentation. *Buildings*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/buildings14072117>
- Qiu, G., & Riffat, S. B. (2003). Optimum tilt angle of solar collectors and its impact on performance. *International Journal of Ambient Energy*, 24(1), 13–20. <https://doi.org/10.1080/01430750.2003.9674898>
- Rufes Martines, P. (2010). *Energía solar térmica: Técnicas para su aprovechamiento* (1ra ed.). Editorial Marcombo.
- Tangkemanda, A., & Susanto, A. (s.f.). *The effect of collector slope angle on the performance of solar water heater*. Sulawesi Selatan.

Yang, D. (s.f). Solar radiation on inclined surfaces: Corrections and benchmarks. *Solar Energy*, 136, 288–302. <https://doi.org/10.1026/j.solener.2026.06.062>

Younes, S., Claywell, R., & Muneer, T. (2005). Quality control of solar radiation data: Present status and proposed new approaches. *Energy*, 30, 1533–1549.



Fuente: <https://solarplacas.es/solar-panel-on-building/>

Revisión de literatura del Modelo WEAP en la seguridad hídrica y la adaptación al cambio climático

RESUMEN

Ruth Moreno Sánchez

jmorenos@unasam.edu.pe

Escuela de Postgrado, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Huaraz, Perú.

Fidel Aparicio Roque

daparicior@unasam.edu.pe

Escuela de Postgrado, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Huaraz, Perú.

La seguridad hídrica presente y futura enfrentan grandes desafíos debido a la disminución de las precipitaciones pronosticadas por los efectos de la variabilidad y el cambio climático, que es sin duda el mayor desafío ambiental al que se enfrenta la humanidad. El objetivo de este artículo fue explorar literatura científica actualizada de acceso abierto, entre los años 2017 al 2024 en la seguridad hídrica para escenarios futuros mediante el software de modelamiento WEAP (Sistema de Planificación y Evaluación del Agua). El procedimiento metodológico fue la revisión sistemática usando el operador lógico AND con términos “climate change”, “water safety” y “WEAP” en las bases de datos Scopus, Scielo, Scisearch, Proquest y Redalyc. Como resultado se identificaron artículos en Scopus (21), Scielo (15), Scisearch (20), Proquest (12) y Redalyc (10) que evidencian la evaluación de la seguridad hídrica presente y futura bajo cambios climáticos utilizando el modelo WEAP. Se concluye que, entre los años 2017 al 2024 ha habido un interés creciente en estudiar el cambio climático y la seguridad hídrica futura. La literatura enfatiza la importancia de promover la investigación en entornos de pregrado y postgrado para prevenir futuras crisis hídricas.

Palabras clave: Cambio climático; Seguridad hídrica; WEAP

Cómo citar este artículo: Revisión de literatura del Modelo WEAP en la seguridad hídrica y la adaptación al cambio climático. (2025). Aporte Santiaguino, 18(1), pp. 111-124. <https://doi.org/10.32911/as.2025.v18.n1.1258>

Recibido: 2024-09-13 | Aceptado: 2025-02-12

Literature review of the WEAP Model in water security and adaptation to climate change

Present and future water security face great challenges, due to the decrease in predicted rainfall due to the effects of climate variability and change, which is undoubtedly the greatest environmental challenge facing people around the world. The objective of this article was to explore scientific literature produced for an updated open access review, in the last 10 years on water security for future scenarios, using the WEAP (Water Planning and Evaluation System) as modeling software. The methodological procedure was the systematic review, using the logical operator AND with terms, “climate change”, “water safety” and “WEAP” in the databases Scopus, Scielo, ScienceDirect, Proquest and Redalyc. The results identify that at least they existed in Scopus (21), Scielo (15), ScienceDirect (20), Proquest (12) and Redalyc (10) that evidence the evaluation of present and future water security under anthropogenic climate changes using the model WEAP. It is concluded that, in the last 10 years, there has been a growing interest in studying climate change and future water security, and the literature emphasizes the importance of promoting research in undergraduate and graduate environments at universities to prevent future water crises.

Keywords: Climate change; Water safety; WEAP

INTRODUCCIÓN

El cambio climático constituye uno de los principales desafíos de la humanidad en el siglo XXI, dada su profunda incidencia tanto en los ecosistemas como en el desarrollo socioeconómico global. Este fenómeno, íntimamente vinculado a la actividad humana, ha sido objeto de creciente atención científica debido a los impactos irreversibles que puede generar sobre la sociedad y el ambiente. Su carácter disruptivo pone en entredicho la histórica capacidad de adaptación

de las sociedades humanas, y ha sido reconocido como una amenaza significativa para la seguridad humana (Lee y Sáenz, 2023).

Actualmente existe un consenso generalizado sobre la realidad del cambio climático y la necesidad urgente de tomar medidas inmediatas y de gran alcance. No obstante, a pesar de la preocupación científica y la retórica alarmista, las variables climáticas empeoran. La base sintomática sobre la que se basa la legitimidad del discurso ambiental, su práctica y la de muchos movimientos climáticos, descansa sobre traumas reprimidos. Desplegar trayectorias político-ecológicas diferentes requiere transgredir la fantasía que oculta estos traumas (Swyngedouw, 2021).

El cambio climático también es de gran complejidad epistémica por su carácter global, acumulativo, desigual, no-lineal, ubicuo, persistente, radical, contraintuitivo, entre otros. Para este fenómeno, el conocimiento científico disponible es insuficiente, ya que cuestiona las fronteras y articulaciones de las disciplinas y carece de modelos de escenarios a escala regional y local para estimar con total fiabilidad consecuencias futuras (González y Meira, 2021).

El cambio climático es un problema de interés público a escala global. Por sus dimensiones espaciales y temporales, este fenómeno requiere la construcción de una perspectiva global amplia para ser legible. Las ciencias del clima en Chile presentan una condición híbrida, entre vida local y pertenencia global. Para ello, exploran la tensión entre las condiciones locales de investigación en Chile y el estudio global del cambio climático en torno a dos aspectos centrales: el uso local de dispositivos de visualización y la organización de las comunidades epistémicas que estudian el clima (Aguirre et al., 2022).

En Ecuador, las principales amenazas climáticas a nivel local son el aumento de días con

lluvias extremas, intensidad de la lluvia, aumento de la temperatura media y condiciones de sequedad y los sectores más afectados –de acuerdo con el nivel de riesgo– serán la agricultura, los agricultores y los asentamientos humanos. Estos riesgos y amenazas instan a la acción urgente frente a los dramáticos efectos del cambio climático, sobre todo en el nivel local, donde existe mayor vulnerabilidad (Sánchez Lechón, 2023).

El estudio de las percepciones del cambio climático en contextos de los andes tropicales responde a las necesidades actuales de investigación sobre cómo las comunidades alto andinas perciben e interpretan el cambio climático. El vacío de literatura existente en estos contextos categorizados en vías de desarrollo comprende un reto y una tarea importante para hacer frente al cambio climático. La importancia de integrar perspectivas locales va recibiendo mayor atención debido a la necesidad de comprender las respuestas de las personas desde diferentes posiciones del mundo, en este caso particular, de los pobladores andinos de Perú (Monge et al., 2022).

El efecto del cambio climático en esta región, considerada como una de las más secas del mundo según las evidencias encontradas y registradas, puede ser favorable o desfavorable para la disponibilidad hídrica. Las evidencias del cambio climático, como sequías y aluviones, se vienen presentando en la región sur de Perú y norte de Chile, denominada cabecera del desierto de Atacama. En los últimos años se han presentado eventos extraordinarios de precipitación que han generado almacenamientos superficiales, crecimiento de vegetación y flujos en superficie tipo aluvión en zonas donde no es normal que se presenten. Estos eventos son considerados como evidencias de cambio climático; las condiciones normales se han alterado y los daños son fehacientes (Pino et al., 2022).

Alcanzar y sostener la seguridad hídrica definida en términos generales como la capacidad de aprovechar el potencial productivo del agua y limitar su potencial destructivo brinda un enfoque para las estrategias de adaptación y un marco para la acción. Para los países que no hayan alcanzado la seguridad hídrica, el cambio climático hará que ello resulte aún más difícil; mientras que para aquellos que tienen seguridad hídrica, probablemente les resulte difícil sostenerla. Es probable que todos necesiten destinar recursos adicionales a la gestión de recursos hídricos (Sadoff y Muller, 2010).

La introducción del presente artículo de revisión muestra la problemática del cambio climático como una consecuencia de la actividad humana y que ahora es objeto de estudio para prever su impacto futuro, exponiendo al peligro los ecosistemas, el progreso global y la capacidad de adaptación social. Existe un acuerdo generalizado sobre la urgente necesidad de tomar medidas, a pesar de que el problema persiste y se hace cada vez más necesario abordar y desarrollar políticas ambientales más efectivas. Esto es particularmente evidente en áreas como los glaciares peruanos, donde el cambio climático ha alterado significativamente el acceso al agua, evidenciado por eventos extremos que resaltan sus efectos adversos y directos. El objetivo de este artículo fue explorar literatura científica producida para una revisión actualizada de acceso abierto, entre los años 2017 al 2024, en la seguridad hídrica para escenarios futuros mediante el software de modelamiento el WEAP.

MATERIALES Y MÉTODOS

El análisis de revisión sistemática se realizó con los lineamientos de la declaración PRISMA para su correcta revisión (Figura 1).

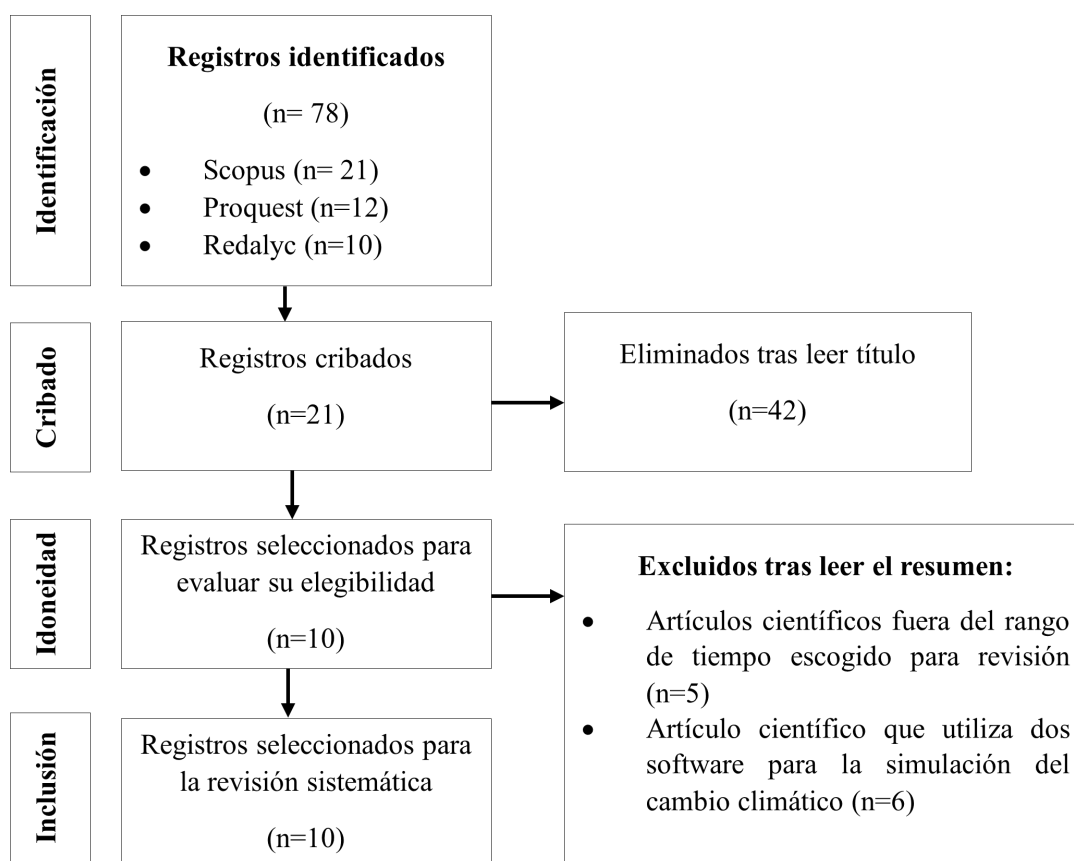
La metodología de revisión de la literatura científica consistió en identificar y extraer la información más relevante de diversas plataformas de información (Scopus, Proquest, Redalyc, ScienceDirect, Scielo) con los términos “climate change”, “water safety” y “WEAP”. Seguidamente, se utilizó el operador lógico AND. La búsqueda reveló la existencia de un número importante

de publicaciones, algunas de las cuales fueron repetitivas o no relevantes para la revisión. Para organizar la información recopilada se siguieron cuatro etapas: identificación, cribado, idoneidad y la inclusión de los artículos seleccionados para su análisis.

Finalmente, se llevó a cabo un resumen consolidado de la información recolectada con el fin de organizar los datos de las distintas secciones del trabajo de forma integrada, comparar la información recabada y organizarla de manera coherente.

Figura 1

Diagrama de flujo PRISMA en cuatro niveles



Nota. Adaptado de *Revista de Investigaciones Altoandinas – Journal of High Andean Research* 24(1), 53–64, enero–marzo 2022.

DESARROLLO Y DISCUSIÓN

Desarrollo

En el artículo científico titulado “Perspectiva futura del presupuesto hídrico en el caso de tres escenarios en Afganistán utilizando el programa WEAP”, Saka y Mohammady (2024), se plantearon como objetivo utilizar el software WEAP para la gestión de los recursos hídricos y el cálculo del presupuesto hídrico de la cuenca del río Balkh. La metodología fue introducir en el software los recursos hídricos de la cuenca y 10 sitios de demanda (riego, agua potable, entre otros). Se obtuvieron datos de precipitaciones, evaporación, escorrentía, entre otros, de estaciones de aforo de caudales durante largos años (2010-2021). Luego se ingresaron datos hidrológicos e información sobre población, tierras de riego y uso de agua potable. El escenario 1 (situación actual) se creó ingresando los datos existentes en el modelo creado. Posteriormente, al escenario actual se le agregaron los valores máximos y mínimos promedio mensuales de largo plazo de precipitación, evaporación, escorrentía y valores similares. Los resultados de los pronósticos entre los años 2022-2050 se crearon con el Escenario 2 (caso optimista) y el Escenario 3 (caso pesimista) y se realizaron análisis en tres situaciones diferentes y se examinaron los resultados. Los resultados mostraron que las necesidades satisfechas actuales de la cuenca del río Balkh son del 7,81 % con pérdidas. Se ha calculado en un 27,14 % en una situación optimista y un 1,71 % en una situación pesimista para 2050. Las necesidades satisfechas actuales de la cuenca, excluidas las pérdidas, son del 12 %. Se calcula como 33,9 % en la situación optimista y 3,1 % en una situación pesimista para 2050. Concluyeron que los recursos hídricos de Afganistán deben manejarse con un enfoque de gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH) y la planificación futura debe realizarse teniendo en cuenta las necesidades humanas, el impacto ambiental y las visiones del gobierno. Los recursos hídricos deben planificarse de manera

más eficiente controlando la cantidad de pozos no documentados, perforando y detectando las pérdidas y fugas en los sistemas existentes con ciertos métodos.

En la investigación titulada “Evaluación de la demanda de agua a largo plazo para el sistema Mgeni mediante el WEAP considerando la demografía y los períodos prolongados de clima seco”, Nagan et al. (2023) tuvieron como objetivo analizar la situación de los recursos hídricos en el Sistema Mgeni y evaluar la contabilidad futura de la oferta y la demanda basada en el software WEAP. En la metodología se utilizó el WEAP para analizar el área de estudio durante el período 2009-2050 para evaluar los impactos de varios escenarios sobre futuros déficits de suministro de agua, se utilizaron cuatro escenarios que tienen en cuenta las tasas cambiantes de crecimiento demográfico y los climas secos prolongados. Los resultados mostraron que la cuenca es relativamente sensible a los cambios en el crecimiento de la población y a los climas secos prolongados y esto alterará significativamente la disponibilidad de agua, causando un suministro de agua déficit. En la conclusión, mencionaron que, en respuesta a las demandas futuras de agua proyectadas, una técnica para superar la demanda insatisfecha es introducir estrategias de conservación y gestión de la demanda de agua para reducir las pérdidas y el déficit de agua encontrados. Al implementar medidas adecuadas, se pueden reducir las pérdidas de agua, previniendo la escasez de agua y dando tiempo a los tomadores de decisiones para brindar nuevas soluciones a los problemas de suministro de agua.

En el artículo científico titulado “Evaluación de los impactos del cambio climático en la disponibilidad de agua superficial utilizando el modelo WEAP: un estudio de caso de la cuenca del río Buffalo, Sudáfrica”, Dlamini et al. (2023), se plantearon como objetivo evaluar las variaciones en la disponibilidad de agua superficial (SWA) inducidas por el cambio

climático en la cuenca del río Buffalo desde 2020 a 2100. La metodología utilizada fue WEAP con los datos físicos e hidrológicos de la cuenca y los datos climáticos proyectados de un conjunto de modelos de circulación general (GCM) bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 del CMIP5. Los hallazgos del estudio proyectaron un aumento de las precipitaciones, especialmente en el futuro lejano (2070-2100), en el que la precipitación media anual aumentó un 5 % hasta 8,286 mm³/año en el peor escenario de cambio climático (RCP8.5), con evapotranspiración y captaciones de agua promedio de 4,500 mm³/año y 115 mm³/año, respectivamente; la escorrentía superficial y la SWA aumentaron un 8 % y un 10 %, arrojando promedios de 3,265 mm³/año y 287 mm³/año, respectivamente. Incluso con el aumento de SWA, las demandas insatisfechas también aumentaron un 113 % hacia finales del siglo XXI. Como conclusión, el estudio estableció que el cambio climático podría exacerbar la insuficiencia del sistema de suministro de agua de la cuenca para satisfacer las crecientes demandas, tales hallazgos presentan una oportunidad para que el enfoque integrado del nexo agua-energía-alimentos se siga utilizando para formular estrategias sostenibles de gestión del agua.

En la investigación titulada “Evaluación de la seguridad hídrica presente y futura según cambios antropogénicos y climáticos utilizando el modelo WEAP en el Cuenca Vilcanota-Urubamba, Cusco, Perú”, Goyburo et al. (2023) tuvieron como objetivo evaluar los niveles de seguridad hídrica actuales (2010-2016), a corto (2017-2040), mediano (2041-2070) y largo plazo (2071-2099) considerando escenarios socioeconómicos y de cambio climático utilizando el (WEAP) en la cuenca Vilcanota-Urubamba (VUB). La metodología utilizada fue la recolección de datos de caudal de la estación hidrométrica de Pisac para calibrar (1987-2006) y validar (2007-2016) el modelo WEAP aplicado a la región VUB. Los valores de eficiencia de Nash Sutcliffe fueron 0,60 y 0,84 para calibración

y validación, respectivamente. Se generaron diferentes escenarios de factores socioeconómicos (crecimiento demográfico y aumento de la eficiencia del riego) y del impacto del cambio climático para evaluar su efecto en el actual sistema de suministro de agua. Los resultados revelaron que la disponibilidad de agua es mucho mayor que la demanda actual en la VUB para el período (2010-2016). Para el corto, mediano y largo plazo, se consideraron dos escenarios: “Escenario 1” (RCP 4.5) y “Escenario 2” (RCP 8.5). Los escenarios de cambio climático mostraron que la disponibilidad de agua aumentará. Sin embargo, este aumento no cubrirá las demandas futuras en todas las subcuencas porque la disponibilidad de agua no se distribuye uniformemente en todas las subcuencas VUB. En ambos escenarios se detectó una demanda insatisfecha a partir de 2050. Para el periodo 2071-2099 se estimó una demanda insatisfecha de 477 hm³/año para el “Escenario 1” y de 446 hm³/año para el “Escenario 2”, debido a que las demandas poblacionales y agrícolas son las más altas, también se simuló los efectos de reducción la tasa de crecimiento y con la mejora de estructuras de riego. Por lo tanto, se plantearon dos escenarios más, generando así el “Escenario 3” (RCP 4.5 con gestión) y el “Escenario 4” (RCP 8.5 con gestión), esta gestión socioeconómica demostró ser eficaz para reducir la demanda insatisfecha hasta en un 50% en todas las subcuencas para el período 2071-2099. Esta investigación concluyó en que los resultados mostraron que el crecimiento demográfico tendría una contribución mayor que los impactos del cambio climático al estrés hídrico futuro. Para el año 2050 se proyecta una demanda de agua descubierta de entre 56,72 hm³ y 42,62 hm³. Los escenarios más pesimistas arrojan una demanda insatisfecha de 477,21 hm³ para 2099. Además, de los escenarios típicos se exploraron estrategias de adaptación como el control migratorio y la mejora de la eficiencia del riego. Se demostró que son insuficientes para compensar la mayor demanda de agua. Por lo tanto, se sugiere implementar

estrategias de adaptación complementarias para garantizar la seguridad hídrica a largo plazo.

En el artículo científico titulado “Gestión integrada del agua ante el cambio climático a través de la aplicación del modelo WEAP en una región árida del Mediterráneo”, Hadri et al. (2022) se propusieron como objetivo establecer un marco de modelado integrado para evaluar el impacto del cambio climático en el suministro y la demanda de agua a través de una zona árida en la llanura occidental de Haouz en Marruecos. Utilizaron cinco GCM para evaluar la disponibilidad de recursos hídricos futuros según vías de concentración representativas (escenarios de emisión RCP4.5 y RCP8.5), la demanda de agua de los cultivos y la demanda de agua de riego proyectadas. Se analizaron teniendo en cuenta el impacto del cambio climático, tanto en la evapotranspiración de referencia como en la duración del ciclo de los cultivos. El balance hídrico futuro se simuló mediante la herramienta WEAP, que incluye varios escenarios socioeconómicos y de uso de la tierra bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. Los resultados revelaron una disminución importante en la precipitación neta con un promedio de 36,2% y 50,5% bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, respectivamente. Concluyeron que, en términos de equilibrio hídrico, el escenario de “seguir como siempre” llevaría a una creciente demanda de agua insatisfecha de alrededor del 22% en el horizonte 2050 y a un mayor agotamiento del nivel freático que podría alcanzar los 2 m/año. Cambiar las prácticas de gestión y uso del agua sigue siendo la única solución para garantizar la sostenibilidad y hacer frente a la escasez de agua prevista.

En la investigación titulada “Evaluación del impacto del cambio climático en la disponibilidad de agua en la parte superior del río Dong Nai Cuenca, Vietnam”, Khoi et al. (2021) investigaron el impacto del cambio climático en la disponibilidad de agua en la cuenca superior del río Dong Nai utilizando el modelo WEAP.

Hallaron que los escenarios de precipitaciones futuras se redujeron a partir de cinco GCM diferentes según RCP4.5 y RCP8.5 utilizando la herramienta Long Ashton Research Station Weather Generator (LARS-WG). Teniendo en cuenta el impacto del cambio climático, en general, se proyecta que la descarga anual de los ríos en la región de estudio tendrá tendencias ascendentes en el futuro, excepto para el período futuro cercano de la década de 2030 bajo el RCP4.5. Además, se espera que en el futuro aumente el caudal de los ríos durante la estación seca. Los resultados consideraron la condición base de uso del agua, donde hubo un déficit hídrico anual de aproximadamente 329,103 m³, que ocurrió principalmente en la estación seca de enero a marzo. El cambio climático puede reducir la escasez de agua en la región de estudio entre un 7,0 y un 30,1% en el futuro bajo los impactos combinados del cambio climático y la creciente demanda de agua, la escasez de agua variará del 18,6 al 6,0%. Los investigadores concluyeron que los resultados pueden proporcionar información valiosa para implementar una planificación y gestión futura adecuada de los recursos hídricos en la región de estudio.

En el artículo científico titulado “Evaluación integrada de la influencia del cambio climático sobre la disponibilidad intraanual actual y futura de agua en el río Vaal”, Akanbi et al. (2021) evaluaron la influencia del cambio climático en la disponibilidad y demanda de agua intraanual actual y futura utilizando un enfoque de múltiples niveles en el que se analizan escenarios climáticos, modelos hidrológicos y análisis socioeconómicos. Se aplicaron consideraciones. Utilizaron el WEAP para proyectar un aumento en las necesidades futuras de agua, brechas en la garantía futura del agua y resaltar las limitaciones en estrategias de gestión existentes. Los resultados muestran que los desafíos del suministro de agua se agravarán en el futuro como en el aumento de temperatura y reducciones de precipitaciones. También se pronosticaron las reducciones

promedio mensuales del caudal de agua (8-10%) para los meses de verano después de 2040. El estudio recomienda una combinación de planes de adaptación, monitoreo de factores de estrés climáticos y no climáticos, reutilización de aguas residuales, conservación, gestión de la demanda y transferencias entre cuencas para reducir la incertidumbre futura en la sostenibilidad hídrica mensual.

En la investigación titulada “Evaluación de la disponibilidad de agua en la cuenca del río Cabanillas del Altiplano peruano bajo escenarios climáticos regionalizados”, Pilares et al. (2018) establecieron un modelo para evaluar la disponibilidad hídrica de la unidad hidrográfica del Río Cabanillas (2.845 km²) perteneciente al Lago Titicaca en el Altiplano peruano para diferentes escenarios de cambio climático regionalizado. Para la modelación hidrológica de la disponibilidad de agua regulada de la cuenca del río Cabanillas, se utilizó el modelo WEAP para evaluar el comportamiento de la disponibilidad para el sistema integral Lagunillas considerando los efectos del cambio climático del escenario actual y futuro sobre el sistema de almacenamiento y las demandas de agua, se utilizaron los escenarios climáticos regionalizados de tres (3) modelos globales: CANESM2, CNRM-CM5 y MPI-ESM-MR; y dos (2) escenarios de emisiones, un escenario intermedio, RCP 4.5; y un escenario pesimista, RCP 8.5, el modelo se construyó con base en un escenario futuro proyectado para el año 2099. Los autores concluyeron que solo el 80 % de la demanda de la unidad hidrográfica estudiada está satisfecha; sin embargo, el cambio climático tiene un efecto positivo en los aportes de agua, lo que se manifiesta en un aumento del 15 % al 20 % en la disponibilidad de agua para el Sistema Integral de Lagunillas en todos los escenarios.

En el artículo científico titulado “Reducción de las proyecciones climáticas para la cuenca costera peruana de Chancay Huaral para respaldar el modelado de descarga de ríos

con WEAP”, Olsson et al. (2017) evaluaron los impactos del cambio climático en las descargas anuales y mensuales en la cuenca CH para el período futuro 2051-2080. La metodología fue utilizar los sesgos en las variables de entrada. Por lo tanto, las series temporales de temperatura y precipitación con corrección de sesgo de 31 GCM con los escenarios de emisión RCP4.5 y RCP8.5 se utilizaron como insumos para el modelo del WEAP. La corrección de sesgo y la reducción de escala de los GCM se implementaron utilizando un método de mapeo de cuantiles, que son nuevos conocimientos hidrológicos para la región. En promedio, los GCM indican un aumento de las temperaturas medias anuales de 3,1 °C (RCP4,5) y 4,3 °C (RCP8,5) y de la precipitación total de un 20% (RCP4,5) y un 28% (RCP8.5). Al aumentar la precipitación total, también aumentan los caudales de los ríos, pero la variabilidad entre los GCM es considerable. Concluyeron en que los mayores aumentos en el alta mensual ocurren en la temporada de lluvias (noviembre - abril), con un incremento de hasta el 31% de la media multimodelo de diciembre. A pesar de la mayor descarga anual para el resultado medio multimodelo, las descargas en la estación seca pueden disminuir según algunos GCM, lo que muestra la necesidad de una futura gestión del agua adaptada.

En la investigación titulada “Modelación hidrológica de una cuenca del norte árido de México y su respuesta a cambios ambientales”, Esquivel et al. (2017) evaluaron el impacto de las variaciones de los patrones climáticos sobre el escurrimiento de la cuenca del río Sextín mediante el modelo hidrológico WEAP. El esquema hidrológico se elaboró con información cartográfica de tipo vectorial y ráster, datos de uso de suelo, vegetación, climatológicos e hidrométricos de la zona de estudio, la parametrización y calibración del modelo comprendió de 1971 a 2004. La eficiencia predictiva del modelo se evaluó mediante NSE (Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe), % BIAS y R2, obteniéndose

valores de 0.81, 12.1 y 0.81, respectivamente. Se generaron escenarios regionalizados futuros de cambio climático con el modelo LARS-WG, A1B (crecimiento económico rápido) y A2 (incremento continuo de la población), para los años 2010-2039 y 2040-2069. Los resultados mostraron un posible incremento promedio anual de 1 °C, tanto para la temperatura máxima como mínima, en ambos periodos analizados. Referente a la precipitación, se proyectó un aumento, al igual que en el escurrimiento de la cuenca en los escenarios climáticos regionalizados. Se concluyó que la información generada en este estudio puede ser de utilidad para la ordenación y gestión hidrológica de la cuenca.

Discusión

Del tema escogido para la revisión, los artículos científicos muestran la importancia del modelo WEAP para prevenir la seguridad hídrica futura en base a resultados que indican que asegurar el acceso al agua es una táctica efectiva de adaptación, ofreciendo ventajas directas a las comunidades vulnerables y excluidas y apoyando los objetivos de desarrollo del del siglo XXI. Al hacerlo, también mejora los sistemas y la capacidad para manejar los riesgos asociados al clima en el futuro.

Saka y Mohammady (2024) en la investigación realizada dieron a conocer que las necesidades satisfechas actuales de la cuenca del río Balkh son del 7,81 % con pérdidas. Se ha calculado un 27,14 % en una situación optimista y un 1,71 % en una situación pesimista para 2050. Por otro lado, Hadri et al. (2022) en los resultados de su investigación revelaron que existe una disminución importante en la precipitación neta en la llanura occidental de Haouz en Marruecos con un promedio de 36,2% y 50,5% y en términos de equilibrio hídrico, llevaría a una creciente demanda de agua insatisfecha de alrededor del 22% en el horizonte 2050.

En la investigación realizada por Olsson et al. (2017) se evaluaron los impactos del cambio climático en las descargas anuales y mensuales en la cuenca Chancay Huaral para el período futuro 2051-2080, determinando que la planificación futura de los recursos hídricos debe realizarse teniendo en cuenta las necesidades humanas, el impacto ambiental y las visiones de gobierno. Por otro lado, Khoi et al. (2021) investigaron el impacto del cambio climático en la disponibilidad de agua en la cuenca superior del río Dong Nai utilizando el modelo WEAP. Los resultados proporcionaron información valiosa para implementar una planificación y gestión futura adecuada de los recursos hídricos en cada región de estudio.

Nagan et al. (2023), en la investigación realizada sobre los impactos de varios escenarios sobre futuros déficits de suministro de agua, concluyeron que, en respuesta a las demandas futuras de agua proyectadas, una técnica para superar la demanda insatisfecha es introducir estrategias de conservación y gestión de la demanda de agua para reducir las pérdidas y el déficit de agua encontrados. En otra investigación realizada por Dlamini et al. (2023) concluyeron que el cambio climático podría exacerbar la insuficiencia del sistema de suministro de agua de la cuenca para satisfacer las crecientes demandas. Tales hallazgos presentan una oportunidad para que el enfoque integrado del nexo agua-energía-alimentos se siga utilizando para formular estrategias sostenibles de gestión del agua.

En la investigación realizada por Goyburo et al. (2023) sobre la evaluación los niveles de seguridad hídrica actuales (2010-2016), corto (2017-2040), mediano (2041-2070) y largo plazo (2071-2099) considerando escenarios socioeconómicos y de cambio climático utilizando el WEAP en la cuenca VUB, los valores de eficiencia de Nash Sutcliffe fueron 0,60 y 0,84 para calibración y validación, respectivamente, generándose con estos valores diferentes escenarios

de factores socioeconómicos y del impacto del cambio climático para evaluar su efecto en el actual sistema de suministro de agua. Por otro lado, Esquivel et al. (2017) determinaron que los valores de eficiencia de Nash Sutcliffe para la calibración fue 0.81. Estos valores, de acuerdo a la clasificación estadística hecha por Moriasi et al. (2007), se encuentran dentro de la clasificación de rendimiento de satisfactorio y muy bueno, respectivamente.

Hadri et al. (2022) investigaron sobre la gestión integrada del agua ante el cambio climático a través de la aplicación del modelo WEAP en una región árida del Mediterráneo. Los resultados mostraron la disminución importante en la precipitación neta con un promedio de 36,2% y 50,5% bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. De otro modo Khoi et al. (2021), indicaron dentro de los resultados de su investigación que el cambio climático puede reducir la escasez de agua en la región de estudio entre un 7,0 y un 30,1% en el futuro bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 y la creciente demanda de agua. La escasez de agua variará del 18,6 al 6,0%.

Las investigaciones científicas han utilizado como principal software de modelamiento el WEAP. Akanbi et al. (2021) hicieron uso del WEAP para proyectar un aumento en las necesidades futuras de agua, brechas en la garantía futura del agua y resaltar las limitaciones en estrategias de gestión existentes. De la misma manera Pílares et al. (2018) utilizaron el modelo WEAP para evaluar el comportamiento de la disponibilidad para el sistema integral Lagunillas considerando los efectos del cambio climático del escenario actual y futuro sobre el sistema de almacenamiento y las demandas de agua.

CONCLUSIONES

Muchos países enfrentan desafíos críticos en la gestión del agua debido a la distribución de recursos escasos y la necesidad de abordar

preocupaciones ambientales y climáticas. Esta situación ejerce una presión considerable sobre los planificadores del agua, quienes deben implementar estrategias para un uso sostenible del agua. El uso de modelos de simulación adecuados es esencial para evaluar todas las opciones de gestión hídrica disponibles.

Se ha creado un nuevo enfoque en la gestión del agua que destaca la relevancia de los proyectos de suministro de agua, incluyendo consideraciones sobre la demanda y la conservación de su calidad. El WEAP ofrece una herramienta eficaz para planificar y analizar políticas de gestión de recursos hídricos, permitiendo evaluar diversas opciones de desarrollo y gestión del agua.

Los hallazgos reflejan el interés de los investigadores en demostrar la relación entre el cambio climático y la seguridad hídrica futura. La literatura utilizada se ha publicado entre los años 2017 y 2024, de los cuales 10 estudios se realizaron en distintos espacios y tiempos. Es importante que los investigadores puedan utilizar diferentes herramientas para poder mostrar el riesgo futuro al que estará expuesta la población.

REFERENCIAS

- Aguirre, G., Undurraga, T., Cotoras, D., & Orellana, T. (2022). El estudio científico del cambio climático en Chile: espacio local y fenómeno global. *Antropologías del Sur*, 9(17), 199-218. <http://dx.doi.org/10.25074/rantros.v9i17.2147>
- Akanbi, T., Remilekun., Thando, N., Nerhene, D. & Acher, E. (2021). Integrated assessment of the influence of climate change on current and future intra-annual water availability in the Vaal River catchment. *Water and Climate Change*, 12(2), 533-551. <https://doi.org/10.2166/wcc.2020.269>

- Dlamini, N., Sezanje, A., & Mabhaudhi, T. (2023). Assessing climate change impacts on surface water availability using the WEAP model: A case study of the Buffalo River catchment, South Africa. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 46, (101330). <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101330>
- Esquivel-Arriaga, G., Nevarez-Favela, M. M., Velásquez-Valle, M. A., Sánchez-Cohen, I., & Bueno-Hurtado, P. (2017). Hydrological modeling of a basin in Mexico's arid northern region and its response to environmental changes. *Ingeniería agrícola y biosistemas*, 9(1), 3-18. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2016.12.008>
- González, E., & Meira, P. (2021). Educación para el cambio climático: ¿Educar sobre el clima o para el cambio? *Perfiles Educativos*, 42(168), 157-174. <https://doi.org/10.22201/iisue.24486167e.2020.168.59464>
- Goyburo, A., Rau, P., Lavado-Casimiro, W., Buytaert, W., Cuadros-Adriazola, J., & Horna, D. (2023). Assessment of Present and Future Water Security under Anthropogenic and Climate Changes Using WEAP Model in the Vilcanota-Urubamba Catchment, Cusco, Perú. *Water*, 15(7), 1439. <https://doi.org/10.3390/w15071439>
- Hadri, A., El Mehdi Saidi, M., El Khalki, M., Aachrine, B., Saouabe, T., & Ait Elmaki, A. (2022). Integrated water management under climate change through the application of the WEAP model in a Mediterranean arid region. *Water and Climate Change*, 13(6), 2415-2442. <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.039>
- Khoi, D., Nguyen, V., Sam, T., Mai, N., Vuong, N., & Cuong, V. (2021). Assessment of climate change impact on water availability in the upper Dong Nai River Basin, Vietnam. *Water and Climate Change*, 12(8), 3851-3864. <https://doi.org/10.2166/wcc.2021.255>
- Lee, A. F., & Sáenz, A. V. (2023). Desastres y Cambio Climático: Un cambio de Paradigma. *Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres REDER*, 7(1), 219-227. <https://doi.org/10.55467/reder.v7i1.119>
- Monge-Rodríguez, F. S., Huggel, C., & Vicuna, L. (2022). Percepción del deshielo glaciar y el cambio climático en pobladores andinos de Perú: abordaje interdisciplinario. *Ambiente & Sociedad*, 25, e02272. <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc20200227r2vu2022L3AO>
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., Veith, T.L. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Trans. ASABE* 2007, 50, 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Nagan, V., Seyan, M., & Abunama, T. (2023). Assessment of long-term water demand for the Mgeni system using Water Evaluation and Planning (WEAP) model considering demographics and extended dry climate periods. *Water SA*, 49(4), 338-354. <https://doi.org/10.17159/wsa/2023.v49.i4.4019>

- Olsson, T., Kämäräinen, M., Santos, D., Seitola, T., Tuomenvirta, H., Haavisto, R., & Lavado W. (2017). Downscaling Climate Projections for the Peruvian Coastal Chancay-Huaral Basin to Support River Discharge Modeling with WEAP. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 13, 26–42. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.05.011>
- Pilares Hualpa, I., Montalvo, N., Mejía, A., Guevara- Pérez, E., Fano M., G., & Alfaro A, R. (2018). Evaluación de la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Cabanillas del Altiplano peruano bajo escenarios climáticos regionalizados. *Revista INGENIERÍA UC*, 25(2). <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=70757669018>
- Pino-Vargas, E., & Chávarri-Velarde, E. (2022). Evidencias de cambio climático en la región hiperárida de la Costa sur de Perú, cabecera del Desierto de Atacama. *Tecnología y ciencias del agua*, 13(1), 333-376. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2022-01-08>
- Reyes-Palomino, S. E., & Cano Ccoa, D. M. (2022). Efectos de la agricultura intensiva y el cambio climático sobre la biodiversidad. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 24(1), 53-64. <http://dx.doi.org/10.18271/ria.2022.328>
- Sadoff, C. W., & Muller, M. (2010). *La gestión del agua, la seguridad hídrica y la adaptación al cambio climático: efectos anticipados y respuestas esenciales*. Estocolmo: Global Water Partnership. <http://cenida.una.edu.ni/relectronicos/REP10S125.pdf>
- Sánchez, W. L. (2023). *Acción frente al cambio climático: gobernanza multinivel de los gobiernos subnacionales y locales en Ecuador*. Estado & comunes, revista de políticas y problemas públicos, 1(16), 39-59. <https://doi.org/10.37228/estado-comunes.v1.n16.2023.287>
- Swyngedouw, E. (2021). El apocalipsis es decepcionante: el punto muerto despolitizado del consenso sobre el cambio climático. *Punto Sur*, (5). <https://doi.org/10.34096/ps.n5.10997>
- Saka, F., & Mohammady, A. (2024). Future perspective of water budget in the event of three scenarios in Afghanistan using the WEAP program. *Engineering Science and Technology an International Journal*, 49, <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2023.101602>

Vorticidad y socavación fluvial alrededor de las estructuras hidráulicas : una revisión

RESUMEN

Toribio Reyes Rodríguez

treyesr@unasam.edu.pe

Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo - Huaraz - Perú.

Maximiliano Asís-López

masisl@unasam.edu.pe

Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo - Huaraz - Perú.

El objetivo principal fue analizar la vorticidad como fenómeno hidráulico, que influye en la socavación fluvial alrededor de las estructuras hidráulicas. La metodología consistió en la revisión de bibliografía y de artículos científicos relacionados a la vorticidad y su efecto en la socavación. Una de las conclusiones relevantes es que la deducción de la ecuación de la vorticidad se realiza a partir de la ecuación de Navier-Stokes, la misma que contiene los términos de advección y la tasa de cambio de la vorticidad local en el primer miembro; mientras que el segundo miembro contiene los términos de estiramiento y difusión de la vorticidad. La advección de la vorticidad consiste en el transporte de la vorticidad a lo largo del río, que contribuye a la socavación general pero más en la socavación local. El estiramiento de la vorticidad representa la intensificación de la vorticidad en la dirección de la velocidad del flujo, que contribuye a la socavación local y la difusión de la vorticidad que expresa la atenuación de la vorticidad. Detrás de los pilares de los puentes se generan desprendimiento de vórtices de estela, que se evalúan a través del número de Strouhal.

Palabras clave: Vorticidad; Socavación; Espigones; Advección; Estiramiento; Difusión; Número de Strouhal

Cómo citar este artículo: Vorticidad y socavación fluvial alrededor de las estructuras hidráulicas : una revisión. (2025). *Aporte Santiaguino*, 18(1), pp. 99-110. <https://doi.org/10.32911/as.2025.v18.n1.1226>

Recibido: 2025-02-26 | Aceptado: 2025-08-12

Vorticity and fluvial scour around hydraulic structures: a review

The main objective was to analyze vorticity as a hydraulic phenomenon that influences fluvial scour around hydraulic structures. The methodology consisted of a review of bibliographies and scientific articles related to vorticity and its effect on scour. One of the relevant conclusions is that the deduction of the vorticity equation is carried out from the Navier – Stokes equation, which contains the advection terms and the rate of change of local vorticity in the first member; while the second member contains the vorticity stretching and diffusion terms. Vorticity advection consists of the transport of vorticity along the river, which contributes to general scour but more to local scour, vorticity stretching represents the intensification of vorticity in the direction of flow velocity, which contributes to local scour and vorticity diffusion which expresses vorticity attenuation. Wake vortex shedding is generated behind bridge piers and is evaluated using the Strouhal number.

Keywords: Vorticity; Undermining; Breakwaters; Advection; Stretching; Diffusion; Strouhal number

INTRODUCCIÓN

La socavación es una de las principales causas de falla de las estructuras hidráulicas, como puentes y diques. Este fenómeno ocurre debido a la interacción entre las estructuras, lecho del río y el flujo del agua, lo que genera fuerzas que erosionan el material del lecho del río. En este contexto, la vorticidad, definida como la rotación del fluido, es un factor importante porque intensifica los procesos de socavación (Melville & Coleman, 2014). Comprender cómo se genera y evoluciona la vorticidad alrededor de las estructuras hidráulicas es importante para diseñar estrategias efectivas de prevención y mitigación contra la socavación.

Los modelos matemáticos permiten la descripción de la relación entre la vorticidad y los parámetros del flujo (Chanson, 2009). No obstante, su aplicación práctica enfrenta desafíos debido a las condiciones variables y complejas de los entornos fluviales. Las vorticidades se generan en zonas donde existen gradientes de velocidad. Estos gradientes producen fuerzas hidrodinámicas, aunque en realidad existe una acción recíproca entre la vorticidad y las fuerzas hidrodinámicas.

Por otro lado, Chen et al. (2023) afirma que el coeficiente de rugosidad de Manning no solo afecta la capacidad de conducción del cauce, también modifica patrones de vorticidad porque se generan gradientes de velocidad en las proximidades de las superficies rugosas que inducen vorticidades y redistribución del flujo.

Desde un punto de vista matemático, la vorticidad puede representarse como el rotacional del campo de velocidades:

$$\vec{\omega} = \nabla \times \vec{V}$$

donde $\vec{\omega}$ es el vector de vorticidad, \vec{V} el vector velocidad y ∇ el operador nabla (Cengel, 2014; Dey et al., 2008; Wu et al., 2006). Esta representación permite analizar la dinámica de los fluidos mediante la ecuación de Navier-Stokes para flujos incompresibles y a viscosidad constante:

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\nabla p + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{V}$$

donde $\rho \frac{D\vec{V}}{Dt}$ representa la fuerza neta que actúa sobre una partícula de fluido por unidad de volumen, $-\nabla p$ denota la fuerza por unidad de volumen que ocurre debido a las diferencias de presión de un fluido y actúa en la dirección de menor presión, y $\mu \nabla^2 \vec{V}$ designa la fuerza viscosa por unidad de volumen, es decir, es la difusión del momentum lineal en el fluido; que es una fuerza atenuadora de las variaciones bruscas de la velocidad del flujo (Cengel, 2014).

La ecuación de la vorticidad, deducida de la ecuación de Navier-Stokes, predice cómo la vorticidad cambia en el tiempo:

$$\frac{D\vec{\omega}}{Dt} = (\vec{\omega} \cdot \nabla) \vec{V} + \nu \nabla^2 \vec{\omega}$$

En esta ecuación, $\frac{D\vec{\omega}}{Dt}$ designa la deriva material de la vorticidad para una partícula de fluido a medida que se mueve en el campo de flujo, $(\vec{\omega} \cdot \nabla) \vec{V}$ representa el estiramiento de la vorticidad, mientras $\nu \nabla^2 \vec{\omega}$ designa la difusión viscosa de la vorticidad.

Las partículas en suspensión tienden a aumentar la viscosidad porque ofrecen mayor resistencia al flujo. Sin embargo, según Maeda y Fukui (2025) las partículas pueden reducir la viscosidad cuando éstas migran desde las orillas hacia el centro del río. Por otro, las partículas pueden aumentar o disminuir la viscosidad del fluido, por la tanto, tienen efecto en la generación o atenuación de la vorticidad.

A la vez, la deriva material de la vorticidad es igual a la identidad que se detalla:

$$\frac{D\vec{\omega}}{Dt} = (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{\omega} + \frac{d\vec{\omega}}{dt}$$

En esta identidad $(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{\omega}$ designa la advección de la vorticidad y $\frac{d\vec{\omega}}{dt}$ representa la

tasa de cambio de la vorticidad local (Potter, 2012). Además, el número de Strouhal (S_i) permite analizar la frecuencia de desprendimiento de vórtices cuando el de flujo de agua y la estructura hidráulica interactúan entre sí:

$$S_i = \frac{fL}{V}$$

donde f es la frecuencia de desprendimiento de vórtices, L la longitud característica de la estructura hidráulica y V la velocidad del flujo (White, 2016). Este parámetro adimensional

es importante en el estudio de los fenómenos periódicos como la resonancia mecánica, vibración de puentes y desprendimientos de vórtices. La resonancia mecánica consiste en la amplificación creciente de las oscilaciones que queden ocasionar el colapso de la estructura vibrante, este fenómeno ocurre cuando la frecuencia de desprendimiento de vórtices coincide a la frecuencia natural de la estructura hidráulica (Bourguet et al., 2011).

La tasa de cambio de la vorticidad de una partícula de fluido en un campo de flujo se expresa mediante la ecuación

$$\frac{\partial \vec{\omega}}{\partial t} = \nabla_x \frac{\partial \vec{V}}{\partial t}$$

En esta ecuación, $\frac{\partial \vec{\omega}}{\partial t}$ representa la tasa de cambio

de la vorticidad de una partícula de fluido en un determinado punto del campo de flujo, y $\frac{\partial \vec{V}}{\partial t}$

designa la aceleración local de una partícula de fluido.

Según White (2016), la aceleración advectiva del flujo de fluidos cumple con la identidad vectorial que se indica

$$(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = \nabla \left(\frac{V^2}{2} \right) + (\nabla_x \vec{V})_x \vec{V}$$

En esta identidad, $(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V}$ representa la

aceleración advectiva, es decir, la aceleración del flujo del fluido debido a su movimiento a través del campo de velocidades; $\nabla \left(\frac{V^2}{2} \right)$ representa la

variación espacial de la energía cinética por unidad de masa del fluido y $(\nabla_x \vec{V})_x \vec{V}$ designa la

interacción de la rotacional con el campo de velocidades.

La rotacional de la aceleración advectiva para un flujo incompresible cumple con la

identidad vectorial que se describe

$$\nabla_x \left((\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \right) = (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{\omega} - (\vec{\omega} \cdot \nabla) \vec{V}$$

En esta identidad vectorial, $\nabla_x \left((\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \right)$

designa la vorticidad de la aceleración advectiva, $(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{\omega}$ representa la advección de la vorticidad y $(\vec{\omega} \cdot \nabla) \vec{V}$ representa el estiramiento de la vorticidad.

White (2016) especifica que, si la frecuencia de desprendimiento de los vórtices se aproxima a la frecuencia de vibración natural de la estructura, puede producirse la resonancia mecánica de la misma, que consiste en la amplificación de las oscilaciones debido al efecto combinado de la energía externa e interna del sistema. Esta condición de resonancia se caracteriza por una sincronización de frecuencias entre la estela y el cuerpo cerca de una frecuencia natural estructural (Bourquet et al., 2011).

En este artículo se presenta la revisión de literatura reciente relacionada a la dinámica de la vorticidad y su impacto en la socavación de las estructuras hidráulicas. Se consideran las ecuaciones matemáticas más importantes, conceptos relevantes y aplicaciones prácticas, proporcionando un enfoque integral sobre los desafíos y avances en este tema.

MATERIALES Y MÉTODOS

La revisión sistemática de la literatura se realizó utilizando bases de datos científicas reconocidas, como Scopus, Web of Science y Google Scholar. Se consideraron artículos científicos publicados, priorizando las investigaciones experimentales, modelos teóricos y simulaciones numéricas que tienen en cuenta la interacción de la vorticidad con el lecho de los ríos y las estructuras hidráulicas.

Los artículos seleccionados se clasificaron considerando las investigaciones realizadas sobre fenómenos de socavación en canales de laboratorio y modelos físicos. También se consideraron simulaciones numéricas basadas en la dinámica de fluidos computacional (CFD) para la modelación y predicción del comportamiento de la vorticidad en las proximidades de las estructuras hidráulicas. Asimismo, se tuvo en cuenta los hallazgos más importantes obtenidos mediante modelos físicos y numéricos. Esta metodología permitió una integración estructurada y crítica de la información obtenida, ofreciendo una visión sistémica sobre la vorticidad y la socavación fluvial alrededor de las estructuras hidráulicas.

DESARROLLO Y DISCUSIÓN

Mecanismos de la formación de vórtices

En la formación de las vorticidades en los ríos intervienen diversos factores interactuantes como la geometría del cauce, la rugosidad del lecho y la presencia de estructuras hidráulicas. La advección, es decir, el transporte de vorticidad a lo largo del flujo, condicionada por el campo de velocidades. El estiramiento de vorticidad, provocado por el gradiente de la velocidad en la dirección del flujo que intensifica la socavación, la difusión de vorticidad actúa como un mecanismo de la atenuación de la vorticidad debida a la viscosidad del fluido.

La presencia de obstáculos generan cambios en el comportamiento del flujo que originan turbulencias y vorticidades. Por ejemplo, los pilares y espigones modifican la presión local, separando el flujo y creando zonas de baja presión o estela. La relación entre la profundidad del flujo y el tamaño del obstáculo afecta directamente los patrones de vorticidad y socavación (Pizarro, 2020). La vorticidad también es influenciada por la morfología y geometría del cauce, como curvas pronunciadas o variaciones en las secciones transversales.

El flujo descendente en la parte frontal del pilar es el factor erosivo más importante, la profundidad de socavación va desde los lados del pilar hacia su parte frontal y sigue un patrón logarítmico de crecimiento. Además, la forma del vórtice varía de circular a elíptica a medida que avanza la socavación (Unger & Hager, 2007). Los factores que afectan la socavación local en los pilares de puentes son la velocidad del flujo, la profundidad de flujo, el tamaño de los sedimentos y la forma del pilar (Melville, 2008).

Mediante investigación experimental y de modelación numérica con Flow-3D v11.2 Wang et al. (2024) hallaron que el descenso del flujo ocurre cuando el agua encuentra un obstáculo, como un pilar de puente, lo que causa la separación de la capa límite y el incremento de presión en la parte frontal del pilar; el flujo de agua descendente en la dirección al lecho del río impacta al lecho del río y produce socavación, asimismo constataron que los vórtices de herradura acentúan los proceso de socavación local.

La socavación alrededor del estribo de un puente está determinada por los vórtices en herradura, cuyos movimientos rotacionales generan esfuerzos cortantes en el lecho adyacente al estribo (Koken & Gogus, 2020). De la misma manera, Paik et al. (2014) encontraron que los vórtices de herradura y de estela generan esfuerzos cortantes frente a un cilindro colocado en un canal experimental. Constataron que los gradientes de presión generan flujo descendente que intensifica la socavación. Los vórtices de estela se forman cuando un flujo choca con un obstáculo, en el cual la capa límite se separa debido el gradiente de presión adverso y la viscosidad entre la parte frontal y posterior del cilindro. En las zonas de vórtices de estela se crean flujos rotacionales denominados calles de vórtices de von Kármán que generan vibración sobre la estructura hidráulica.

Chen et al. (2019) determinaron que los vórtices de herradura primarios (PHV) se

forman cuando el flujo de agua impacta la base del cilindro y esta se separa creando una zona de alta presión en el punto de estancamiento y zonas de baja presión en la zona de separación del flujo. Esta diferencia de presión, junto con el cambio de dirección del flujo alrededor del cilindro, produce los vórtices en herradura frente al cilindro; también se generan vórtices de herradura secundarios: contrarrotatorios y progradientes que atenuan o intensifican los PHV. Por otra parte, los vórtices atrapados erosionan las superficies de los cuerpos sólidos que están sumergidos dentro del flujo (Hirts y McDonald, 2024).

Rodríguez y Escauriza (2010) indican que los vórtices de Görtler se forman aguas abajo de las compuertas rectangulares planas cuando el flujo de agua pasa a través de una superficie cóncava, que genera inestabilidad centrífuga debido a la diferencia de presiones entre las capas de fluido cercanas y alejadas del fondo. Los vórtices de Görtler se forman cuando el agua fluye sobre una superficie cóncava por la interacción de la aceleración centrífuga y la inercia del flujo.

Medidas de mitigación y control de la socavación

La mitigación y el control de la socavación en estructuras hidráulicas pueden lograrse mediante diversas estrategias, como el uso de enrocados de volteo con filtro granular o geotextil tejido y deflectores. Estas estrategias son efectivas para modificar la dirección del flujo y reducir la energía turbulenta de los vórtices. En el caso de los pilares, un diseño con nariz de forma semicircular disminuye la resistencia al flujo, minimiza la separación de flujo y reduce significativamente la formación de vórtices. Además, las pilas de sacrificio se emplean como elementos diseñados para erosionarse antes que las estructuras principales, actuando como una medida de protección preventiva.

Kumcu et al. (2014) estudiaron experimentalmente el uso de collares para la protección contra la socavación en estribos de puentes con paredes verticales. La ubicación óptima del collar es por debajo del lecho del río, que reduce la formación de vórtices de herradura. Pueden ser de forma anular, rectangular, elíptico; el material puede ser de acero, concreto reforzado, fibra de vidrio y otros polímeros. Por otra parte, Mohamed (2020) observó que los pilares circulares reducen la profundidad de la socavación más que los pilares cuadrados.

Los espigones permeables permiten el paso parcial del flujo, lo que disminuye tanto la velocidad como la separación del flujo, reduciendo así la formación de vórtices. Choufu et al. (2019) indican que los espigones colocados a 90° generan mayor profundidad de socavación, mientras que los colocados con ángulos de 120° a 135° respecto a la orilla y con longitudes crecientes en la dirección del flujo del río producen zonas de menor velocidad y socavación porque se generan vórtices más débiles. La longitud de los espigones se aumentan en la dirección aguas abajo del flujo para aumentar la sedimentación.

Existen métodos estandarizados para medir la conductividad hidráulica de los suelos, a nivel de laboratorio o *in situ* (Budhu, 2007). Sin embargo, no hay un método estandarizado para medir la conductividad hidráulica de estructuras hidráulicas de protección de riberas.

Barandal y Das (2024) indican que la socavación local es la causa principal de falla en los puentes. Determinaron que la velocidad del flujo, el tipo de sedimento y la geometría del pilar influyen en la profundidad de socavación, concluyen que las técnicas contra la socavación local combinadas ofrecen mejores resultados contra la socavación.

Adnan et al. (2025) en la investigación experimental de la socavación local alrededor de

un pilar apoyado en una cimentación circular, bajo flujo permanente en condiciones de agua clara, determinaron el efecto de la relación altura-diámetro (H/D) de la cimentación; la socavación se incrementa cuando la cimentación pasa de estar enterrada a expuesta porque la formación de vórtices es más rápida.

La profundidad de la cimentación debe ser la mayor entre la profundidad estructural y la profundidad hidráulica, considerando además un factor de seguridad que garantice la estabilidad de la estructura hidráulica.

Soluciones exactas y numéricas de los modelos de socavación

Los métodos de solución de la ecuación de la vorticidad se clasifican en analíticas y numéricas. Los métodos analíticos son precisos y aplicables a un rango muy restringido de problemas. En contraste, los métodos numéricos son esenciales para abordar problemas más complejos, incluyendo los basados en malla y sin malla (Rossi et al., 2015).

Simulaciones realizadas con RiverFlow2D demostraron que la eliminación de la vegetación en los lechos fluviales es una de las estrategias más efectivas para mitigar inundaciones, logrando reducir la profundidad del agua hasta en 1 metro (Echeverribar et al., 2017). Por otra parte, la vegetación flexible en el lecho del río reduce la erosión al disminuir el esfuerzo cortante del flujo. La erradicación de la vegetación es una solución de corto plazo y local. Bajo el marco del desarrollo sostenible se recomienda trabajar con estrategias alineadas al comportamiento natural del río y su ecosistema.

Según Liao et al. (2021), el CCHE2D es un modelo numérico desarrollado por la National Center for Computational Hydroscience and Engineering (NCCHE) para la simulación de la socavación de las estructuras hidráulicas en los

ríos, predice la morfodinámica del lecho con un menor costo computacional que los modelos 3D. El modelo Flow 3D 11.2 permite la modelación de flujos tridimensionales y de procesos de socavación alrededor de los pilares de puentes, también simula el transporte de sedimentos empleando las ecuaciones de Van Rijn (Omara & Tawfik, 2018).

Saha et al. (2018) proponen desarrollar una metodología para la predicción de la socavación en pilares de puentes, considerando la interacción entre la socavación local y por contracción. Precisan que las ecuaciones de socavación local de la Colorado State University (CSU) y Melville-Sheppard pueden subestimar o sobrestimar la socavación local. Además, indican que la profundidad de socavación local se incrementa cuando aumenta la razón de contracción de flujo (q_2/q_1). También recomiendan realizar investigaciones de socavación local con modelos físicos y numéricos basados en la dinámica de fluidos computacional (CFD).

Zaid et al. (2019) destacan la importancia del uso de modelos de dinámica fluidos computacional (CFD) y de técnicas de protección de los pilares de los puentes como collares y refuerzos en la base, la combinación de simulaciones numéricas y experimentales mejora la predicción y control de la socavación local.

Los softwares HEC-RAS y FDOT se emplean para la predicción de la socavación local en pilares de puentes, el primero es adecuado para estimar la socavación local en pilares de ancho convencional, y el FDOT para pilares anchos, señala Al – Jubouuri (2023). El HEC – RAS para el análisis de flujo transitorio en ríos resuelve las ecuaciones Saint – Venant mediante el método de diferencias finitas implícitas y la ecuación de Navier – Stokes con el método de volúmenes finitos.

De la revisión realizada, se advierte que los programas computacionales pueden generar

predicciones muy cercanas a la realidad siempre que se realice una calibración adecuada de sus parámetros, se cumplan los supuestos teóricos de cada modelo y se delimiten correctamente las condiciones de frontera. De lo contrario, los resultados no tendrán validez ni confiabilidad.

Análisis de vorticidad y socavación con inteligencia artificial

Yousif et al. (2019) compararon técnicas de Machine Learning ELM (Extreme Learning Machine) y MARS (Multivariate Adaptive Regression Spline) para la predicción de la socavación en compuertas delgadas planas en un canal abierto de laboratorio. La técnica ELM fue más precisa que MARS. Se emplearon datos dimensionales y no dimensionales de flujo y de sedimentos en la predicción de la profundidad, longitud y posición de la socavación.

La profundidad de socavación en pilares de puentes mediante modelos Machine Learning (ML) ANFIS y GEP son más precisos y confiables que las ecuaciones empíricas existentes. Los factores considerados en la predicción de la socavación son la relación entre el ancho del pilar y la profundidad del flujo, el número de Froude, la velocidad del flujo de aproximación respecto a la velocidad crítica, y el diámetro medio de los sedimentos (Kumar et al., 2024).

Para la predicción de la socavación alrededor de los estribos de un puente se compararon modelos de IA: redes neuronales artificiales (ANN), sistemas neurodifusos adaptativos (ANFIS), bosques aleatorios (RF) y con ecuaciones empíricas clásicas. El ANFIS fue el mejor modelo de IA. Los datos se tomaron en el modelo hidráulico de un puente (Khan et al., 2024)

CONCLUSIÓN

La investigación de la socavación de estructuras hidráulicas se realiza mediante modelos físicos, numéricos e inteligencia artificial. A pesar de los avances científicos y tecnológicos logrados en este campo, aún existen desafíos debido a la compleja interacción de los sistemas fluviales con las estructuras hidráulicas.

La socavación es un fenómeno complejo en el cual interactúan el flujo de agua, los sedimentos, la forma y tamaño de las estructuras hidráulicas. Entre los factores relevantes que causan la socavación se encuentran la aceleración del flujo, el flujo descendente (downflow) y la formación de vórtices de estela y herradura, cuando el flujo encuentra un obstáculo. Los vórtices de Görtler cuando el flujo pasa por una superficie cóncava producen inestabilidad del flujo aunque su efecto de socavación es mínimo.

El transporte de la vorticidad a lo largo del río se conoce como advección. El estiramiento de la vorticidad intensifica su magnitud, lo que a su vez aumenta la socavación local al aumentar las fuerzas de corte en el lecho. Por otra parte, la difusividad de la vorticidad consiste en su atenuación debido a la viscosidad del flujo.

Para la mitigación y control de la socavación existen diferentes técnicas como enrocados de volteo con filtro granular o geotextil tejido que evitan la migración de suelo fino. También se usan deflectores que disipan la energía del flujo, pilas de sacrificio que desvían el flujo y los collares que protegen la cimentación de las estructuras hidráulicas. Además, se reduce la socavación manejando la geometría transversal de los pilares, prefiriéndose las formas hidrodinámicas porque reducen la formación de vórtices al atenuar la separación de la capa límite.

REFERENCIAS

- Adnan, M., Zhao, M., Wu, H., & Dhamelia, V. (2025). Experimental study of local scour around a compound pile under steady current. *Ocean Engineering*, 318, 120151. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.120151>
- Al-Jubouri, M., & Ray, R. (2023). A comparative study of local scour depth around bridge piers. *Pollack Periodica*, 18(1), 100–105. <https://doi.org/10.1556/606.2022.00649>
- Baranwal, A., & Das, B. (2024). Scouring around bridge pier: A comprehensive review of countermeasure techniques. *Engineering Research Express*, 6(022103). <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ad5495>
- Bourguet, R., Modarres-Sadeghi, Y., Karniadakis, G. E., & Triantafyllou, M. S. (2011). Wake-body resonance of long flexible structures is dominated by counterclockwise orbits. *Physical review letters*, 107(13), 134502. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.107.134502>
- Cengel, Y., & Cimbala, J. (2014). *Fluid mechanics*. McGraw – Hill.
- Budhu, M. (2007). *Soil mechanics and foundations*. John Wiley & Sons.
- Chanson, H. (2009). *Applied hydrodynamics: an introduction to ideal and real fluid flows*. CRC press.
- Chen, Q., Yang, Z., & Wu, H. (2019). Evolution of turbulent horseshoe vortex system in front of a vertical circular cylinder in open channel. *Water*, 11(10), 2079. <https://doi.org/10.3390/w11102079>

- Chen, Z., Zhou, J., & Chen, Q. (2023). Research and Application of the Calculation Method of River Roughness Coefficient with Vegetation. *Water*, 15(7), <https://doi.org/10.3390/w15142638>
- Choufu, L., Abbasi, S., Pourshahbaz, H., Taghvaei, P., & Tfwala, S. (2019). Investigation of flow, erosion, and sedimentation pattern around varied groynes under different hydraulic and geometric conditions: A numerical study. *Water*, 11(2), 235. <https://doi.org/10.3390/w11020235>
- Dey, S., Raikar, R. V., & Roy, A. (2008). Scour at submerged cylindrical obstacles under steady flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(1), 105-109. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:1\(105\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:1(105))
- Echeverribar, I., Morales-Hernández, M., Lacasta, A., Brufrau, P., & García-Navarro, P. (2017). Simulación numérica con RiverFlow2D de posibles soluciones de mitigación de avenidas en el tramo medio del río Ebro. *Ingeniería del agua*, 21(1), 53-70. <https://doi.org/10.4995/ia.2017.6550>
- Fay, J. (1996). *Mecánica de fluidos*. México: Compañía Editorial Continental, S.A.
- Hirst, C., McDonald, N. (2024). *Erosion of surfaces by trapped vortices*. *Journal of Engineering Mathematics*, 148(7). <https://doi.org/10.1007/s10665-024-10396-6>
- Khan, Z., Khan, D., Murtaza, N., Pasha, G., Alotaibi, S., Rezzoug, A., Benzougagh, B., & Khedher, K. (2024). Advanced prediction models for scouring around bridge abutments: A comparative study of empirical and AI techniques. *Water*, 16(3082). <https://doi.org/10.3390/w16213082>
- Koken, M., Gogus, M. (2010). *Time evolution of the horseshoe vortex system forming around a bridge abutment*. In S. E. Burns, S. K. Bhatia, C. M. C. Avila, & B. E. Hunt (Eds.), *Proceedings of the 5th International Conference on Scour and Erosion (ICSE-5), November 7-10, 2010, San Francisco, USA* (pp. 668-677). American Society of Civil Engineers. <https://hdl.handle.net/20.500.11970/100281>
- Kumcu, S., Kokpinar, M., & Gogus, M. (2014). Scour protection around vertical-wall bridge abutments with collars. *KSCCE Journal of Civil Engineering*, 18(6), 1884-1895. <https://doi.org/10.1007/s12205-014-0245-4>
- Maeda, J., & Fukui, T. (2025). Numerical study of suspension viscosity accounting for particle–fluid interactions under low-confinement conditions in two-dimensional parallel-plate flow. *Processes*, 13(690). <https://doi.org/10.3390/pr13030690>
- Marsden, J., Tromba, A. (2012). *Vector calculus*. Freeman and Company Publishers.
- Melville, B. (2008). The physics of local scour at bridge piers. In H. Sekiguchi (Ed.), *Proceedings of the 4th International Conference on Scour and Erosion (ICSE-4)* (pp. 28-40). The Japanese Geotechnical Society. <https://hdl.handle.net/20.500.11970/100095>
- Mohamed, W. (2020). Effect of local scour on foundation of hydraulic structure. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 7(2), 916-924. <https://www.irjet.net>

- Liao, C., Yeh, K., Lan, Y., Jhong, R., & Jia, Y. (2021). Improving the 2d numerical simulations on local scour hole around spur dikes. *Water*, 13(11), <https://doi.org/10.3390/w13111462>.
- Omara, H., Tawfik, A. (2018). Numerical study of local scour around bridge piers. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 151(012013). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/151/1/012013>
- Paik, J., Bombardelli, F., & Lee, N. (2014). Numerical simulation of turbulent free surface flow around a circular cylinder. In Lehfeldt & Kopmann (Eds.), *Proceedings of the International Conference on Hydro-Science & Engineering (ICHE 2014)* (pp. 991-999). Bundesanstalt für Wasserbau. ISBN 978-3-939230-32-8.
- Pizarro, S., Manfreda, S., Tubaldi, E. (2020). The science behind scour and bridge foundation: a review. *Water*, 12(374). <https://acortar.link/qtqSO4>
- Potter, M., & Wiggert, D. (2012). *Mechanics of fluids*. Cengage Learning.
- Rodríguez, B., & Escauriaza, C. (2010). Turbulent flow in the scour hole downstream of a sluice gate: erosion induced by Görtler vortices. En Dittrich, A.; Koll, K.; Aberle, J.; Geisenhainer, P. (Eds.), *River Flow*, Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau, pp. 195-202. <https://hdl.handle.net/20.500.11970/99646>.
- Rossi, E., Colagrossi, A., & Graziani, G. (2015). Numerical simulation of 2D-vorticity dynamics using particle methods. *Computers and Mathematics with Applications*, 69(12), 1484-1503. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2015.04.004>
- Saha, R., Lee, S., Hong, S. (2018). A comprehensive method of calculating maximum bridge scour depth. *Water*, 10(11), 1572. <https://doi.org/10.3390/w10111572>
- Wang, W., Wei, S., Zhu, D., Wang, J., & Duan, H. (2024). Characteristics and mechanism of downflow in front of a cylindrical pier with clear-water local scour. *Water*, 16(1863). <https://doi.org/10.3390/w16131863>
- White, F. (2016). *Mechanics of fluids*. McGraw – Hill Education
- Unger, J., & Hager, W. (2007). Downflow and horseshoe vortex characteristics of sediment embedded bridge piers. *Experiments in Fluids*, 42(1), 1–19. <https://doi.org/10.1007/s00348-006-0209-7>
- Wu, J. Z., Ma, H. Y., Zhou, M. D., Wu, J. Z., Ma, H. Y., & Zhou, M. D. (2006). Typical vortex solutions. *Vorticity and Vortex Dynamics*, 255-321. https://doi.org/10.1007/978-3-540-29028-5_6
- Yousif, A., Sulaiman, S., Diop, L., Ehteram, M., Shahid, S., Al-Ansari, N., Yaseen, Z. (2019). Open channel sluice gate scouring parameters prediction: Different scenarios of dimensional and non-dimensional input parameters. *Water*, 11(2), 353. <https://doi.org/10.3390/w11020353>
- Zaid, M., Yazdanfar, Z., Chowdhury, H., Alam, F. (2019). A review on the methods used to reduce the scouring effect of bridge pier. *Energy Procedia*, 160, 45–50. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.117>

Revista de Investigación
APORTE SANTIAGUINO
Ingeniería e Innovación
Vol. 18, N° 1, enero - junio 2025



AUTORIDADES DE INVESTIGACIÓN

VICERRECTOR DE INVESTIGACIÓN

Dra. Consuelo Teresa Valencia Vera

DIRECTOR DEL INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN

Dr. Yovera Saldarriaga José

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN

Mag. Hugo Walter Maldonado Leyva

DIRECTOR DE DERECHOS DE AUTOR Y PATENTES

Lic. Ilder Edar Cruz Mostacero

DIRECTOR DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Dra. Carmen Tamariz Ángeles



"Una Nueva Universidad para el Desarrollo"



UNASAM
LICENCIADA
"Una Nueva Universidad para el Desarrollo"

¡La primera en la región Áncash!



Vicerrectorado de Investigación