OPEN ACCESS Creative Commons (CC) CC BY-NC-ND

Sistema inteligente de monitoreo agroecológico con visión artificial y disuasión acústica para la protección del cultivo de quinua contra aves en suelos labrados altoandinos

Intelligent agroecological monitoring system using computer vision and acoustic deterrence for protecting quinoa crops against birds in tilled high-Andean soils



Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurimac – Perú
Riqchary, revista de investigación en ciencia y tecnología
ISSN: 2810-8124 (en línea) / ISSN: 2706-543x
Vol. 8 Núm. 2 (2026) - Publicado: 25/11/2026
doi.org/10.57166/riqchary/v8.n2.2026
Páginas: 33 - 46
Recibido 18/10/2026 ; Aceptado 09/11/2026
https://doi.org/10.57166/riqchary/v8.n2.2026.4

Luis Sanchez-Valverde
Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac
https://orcid.org/0009-0002-6949-999X
182231@unamba.edu.pe

Dario Roque-Juro
Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac
https://orcid.org/0009-0001-9619-7084
211193@unamba.edu.pe

Erech Ordoñez-Ramos
Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac
https://orcid.org/0000-0002-3058-9683
eordonhez@unamba.edu.pe

Alejandrina Huaylla-Quispe
Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac
https://orcid.org/0000-0002-0258-8632
ahuaylla@unamba.edu.pe

RESUMEN

La etapa de germinación es el momento más vulnerable del cultivo de quinua en las zonas altoandinas, ya que la siembra en suelos recién labrados atrae a aves que se alimentan de las semillas y reducen desde el inicio la cantidad de plantas establecidas. Debido a que los métodos tradicionales pierden efecto rápidamente porque las aves se acostumbran a ellos, este estudio propone y evalúa un sistema inteligente que detecta aves mediante visión artificial (YOLO11n) y activa sonidos de ahuyentamiento de forma automática. Se realizó un estudio de campo cuasiexperimental de mediciones temporales en tres parcelas de quinua (una jornada de control sin sonido y dos jornadas con el sistema activo por parcela), desde el primer minuto posterior a la siembra. En total se registraron 4,576 eventos de detección aviar con audio, de los cuales el 85.0 % terminó con la huida del ave. Aunque no se hallaron diferencias significativas entre los tres sonidos en el porcentaje de huida ($p = 0.276$), la prueba de Kruskal–Wallis mostró que el ladrido de perro ($Md = 2.42$ s) y el llamado de auxilio de gallina ($Md = 2.47$ s) lograron expulsar a las aves más rápido que el sonido de águila ($Md = 2.76$ s; $p < 0.001$). Finalmente, el análisis exploratorio entre días mostró una caída en la respuesta de huida a partir del segundo día en dos parcelas, estimando de forma preliminar un efecto útil cercano a 4 a 5.5 días antes de requerir rotación de sonidos. Estos resultados muestran que el sistema es una alternativa práctica y no invasiva con alto potencial para proteger el cultivo de quinua en los Andes.

Palabras Clave: Agricultura de precisión, disuasión acústica, quinua, visión artificial

ABSTRACT

The germination stage is the most vulnerable period for quinoa cultivation in high-Andean zones, as sowing in freshly tilled soil attracts seed-eating birds that reduce plant density from the outset. Because traditional methods lose effectiveness rapidly as birds become accustomed to them, this study proposes and evaluates an intelligent system that detects birds using computer vision (YOLO11n) and automatically activates acoustic deterrents. A quasi-experimental temporal-measurement field study was conducted across three quinoa plots (one silent baseline control day and two active intervention days per plot), starting immediately after sowing. A total of 4,576 avian detection events were recorded under active audio intervention, of which 85.0% resulted in a flight response. Although no statistically significant differences in flight proportions were found among the three sounds ($p = 0.276$), the Kruskal–Wallis test showed that the dog bark ($Md = 2.42$ s) and the hen distress call ($Md = 2.47$ s) expelled birds faster than the eagle call ($Md = 2.76$ s; $p < 0.001$). Finally, exploratory day-to-day analysis revealed a decline in flight response from the second day onward in two plots, preliminarily estimating a functional effect of approximately 4 to 5.5 days before sound rotation is required. These findings indicate that the proposed system is a practical, non-invasive alternative with high potential for protecting quinoa crops in the Andes.

Keywords: Precision agriculture, acoustic deterrence, quinoa, computer vision

1 INTRODUCCIÓN

El cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) es clave para la seguridad alimentaria mundial por su alto valor nutritivo y su gran resistencia al clima extremo, lo que lo convierte en una fuente esencial de ingresos para las familias campesinas del altiplano [1]. Sin embargo, su producción se ve seriamente afectada por las aves durante la etapa inicial de siembra. La fase fenológica BBCH 00–09 corresponde al Estadio principal 0 (Germinación / Brotación), periodo crítico en el que la semilla rompe su cubierta y el brote sale a la superficie del suelo [2]. Al sembrar directamente sobre tierra recién removida, las semillas quedan expuestas desde el primer minuto y atraen a bandadas de aves granívoras locales (como la paloma manchada y la tórtola), cuya dieta puede componerse hasta en un 82.66 % de estos granos extraídos del surco [3].

En el distrito de Challhuahuacho (Cotabambas, Apurímac), la falta de protección automatizada provoca pérdidas importantes de semillas y reduce la cantidad de plantas que logran establecerse. Esto obliga a los agricultores a asumir gastos adicionales de resiembra manual y eleva el riesgo de perder gran parte de la cosecha proyectada [4]. Tradicionalmente, las comunidades han usado espantapájaros, cintas reflectantes, banderines y vigilancia presencial; sin embargo, estos métodos duran poco tiempo porque las aves aprenden rápido y se acostumbran a objetos quietos que no representan un peligro real [5].

Frente a este vacío tecnológico, la integración de la electrónica y la inteligencia artificial para el control de vertebrados plaga ha generado diversas propuestas en la literatura académica reciente. Devi et al. [6] propusieron un sistema de monitoreo inteligente basado en el modelo YOLOv5 para detectar aves plaga en cultivos de arroz con alta precisión y velocidad de procesamiento. De manera complementaria, Mohamad Sa'ad et al. [7] desarrollaron un algoritmo de detección acelerado por hardware FPGA, integrado con notificaciones en tiempo real a dispositivos móviles. Sin embargo, al funcionar estrictamente como plataformas de alerta pasiva, estos sistemas comparten una limitante operativa estructural: exigen que el agricultor se movilice físicamente hacia la parcela tras recibir el aviso, generando una demora crítica durante la cual el daño a las semillas ya ocurrió y no se puede revertir.

En el contexto específico de los cultivos andinos, Palao-Iturregui et al. [8] evaluaron mecanismos de disuasión sonora impulsados por el viento en parcelas de quinua en Puno, concluyendo que la falta de discriminación temporal del ruido continuo produce una rápida habituación de la plaga, un fenómeno limitante que también fue advertido por Ufuoma et al. [9] al estudiar sistemas acústicos eólicos. Desde la perspectiva etológica, la literatura sugiere que los estímulos biológicamente relevantes son superiores a los ruidos sin-

téticos (sirenas o pirotecnia). Bomford y O'Brien [10] demostraron que las llamadas de depredadores aéreos (como rapaces) desencadenan un instinto de evasión innato en aves granívoras. Asimismo, Gilsdorf et al. [11] y Tracey et al. [12] validaron que los llamados de auxilio de especies que conviven en la misma zona (distress calls) y los ladridos de depredadores terrestres constituyen métodos de ahuyentamiento altamente efectivos cuando se activan únicamente ante la presencia confirmada del animal.

Ante las notables limitaciones de los sistemas de alerta pasiva y de los ruidos aleatorios o continuos, resulta imperativo desarrollar un ecosistema de lazo cerrado basado en el paradigma de computación en el borde (Edge Computing) que integre detección visual de vanguardia y disuasión bioacústica de manera estrictamente reactiva. Por consiguiente, el objetivo general de esta investigación es evaluar cómo la implementación de un sistema inteligente de monitoreo agroecológico, basado en visión artificial y disuasión acústica, influye en la respuesta de huida y el tiempo de permanencia de las aves en el cultivo de quinua, ofreciendo una alternativa de protección eficaz, sostenible y adaptada a los suelos labrados altoandinos de Challhuahuacho. Para alcanzar este propósito, se plantearon tres objetivos específicos: identificar qué sonido (águila, llamado de auxilio de gallina o ladrido de perro) genera la mayor proporción de huida y el menor tiempo de permanencia aviar; evaluar si existe habituación de las aves durante el horario diurno de alimentación (06:00 a 17:00 h); y modelar la evolución de la tolerancia entre días consecutivos para estimar de forma preliminar la duración útil del efecto disuasivo.

2 METODOLOGÍA

2.1 Enfoque y Tipo de Estudio

La investigación adopta un enfoque cuantitativo, empírico y de corte comparativo [13], orientado a contrastar el comportamiento de la avifauna ante estímulos acústicos disuasivos en condiciones de campo abierto y real.

2.2 Diseño de la Investigación

El diseño metodológico corresponde a un esquema cuasiexperimental de mediciones temporales con medición pre-post y control basal temporal. En esta estructura, cada parcela funcionó como su propio grupo de control mediante la ejecución de una jornada basal de observación silenciosa (condición control), seguida inmediatamente de dos jornadas consecutivas con el sistema activo (condición de intervención). El estudio incorporó además una comparación exploratoria entre tres estímulos acústicos asignados de forma independiente a parcelas distintas. Dado que cada sonido se evaluó en una sola unidad experimental, las diferencias observadas se interpretan considerando las condiciones propias de cada parcela y fecha de monitoreo.

- Parcela 1: Sistema activo con emisión de llamado territorial de depredador aéreo.
- Parcela 2: Sistema activo con emisión de llamada de auxilio de gallina doméstica.
- Parcela 3: Sistema activo con emisión de ladrido de perro.

Las unidades de comparación independientes son las tres parcelas, las cuales se ubicaron en el centro poblado de Pararani con una separación espacial mínima de 200 metros entre sí. Para garantizar la total independencia de los eventos aviares y evitar el efecto de "contaminación por aprendizaje" (que un ave ahuyentada en la Parcela 1 volara directamente a las otras parcelas arrastrando memoria aversiva), el diseño cuasiexperimental de mediciones temporales estableció que las jornadas de intervención se ejecutaran en distintos días cronológicos para cada parcela (Tabla 1). El sistema operó de forma automatizada y reactiva exclusivamente durante el horario natural de forrajeo diurno (06:00 a 17:00 h).

2.3 Población, Muestra y Muestreo

La población de estudio estuvo constituida por el flujo continuo de aves granívoras silvestres detectadas en las tres parcelas de quinua monitoreadas entre el 05 y el 14 de septiembre de 2026 en el horario de 06:00 a 17:00 h. Al tratarse de fauna silvestre en campo abierto que ingresa y sale libremente del cultivo, el total de individuos es desconocido y no enumerable, por lo que corresponde a una población infinita.

El muestreo fue no probabilístico por conveniencia mediante un registro continuo y exhaustivo de todos los eventos detectados durante las jornadas de evaluación. Para asegurar claridad metodológica entre el nivel de campo y el análisis estadístico, se definieron dos unidades:

- **Unidad experimental ($n = 3$):** Cada parcela independiente de cultivo de quinua, sobre la cual se asignó una jornada de control basal sin sonido seguida de dos jornadas con un único estímulo acústico.

- **Unidad de análisis y observación ($n = 4{,}576$):** Cada evento de detección aviar validado por el sistema de visión artificial durante la intervención con audio, sobre el cual se midieron la respuesta conductual (Huye/Ignora) y el tiempo de permanencia en segundos (Tiempo_Permanencia_s), y sobre el que se aplicaron las pruebas estadísticas (χ^2, Kruskal–Wallis y regresión logística). Cada registro incluye código de seguimiento por parcela, evidencia fotográfica y nivel de confianza del modelo, pudiendo una misma ave generar más de un evento si permanece en la parcela.

Se incluyeron todos los eventos registrados dentro del horario diurno con datos completos y se excluyeron las detecciones duplicadas sin respuesta conductual registrable. El cronograma por parcela se detalla en la Tabla 1 y el resumen de la muestra (4,576 eventos con audio y 516 intervalos de control basal) en la Tabla 2.

TABLA 1

Cronograma experimental por parcela y condición de monitoreo

Parcela (Estímulo)	Control basal (sin audio)	Intervención (con audio)
1 (audio1.wav)	05/09/2026	*06–07/09/2026*
2 (audio2.wav)	08/09/2026	*09–10/09/2026*
3 (audio3.wav)	12/09/2026	*13–14/09/2026*
Total	3 jornadas	*6 jornadas*

Nota: *El monitoreo se ejecutó de forma continua durante el horario de forrajeo diurno (06:00 a 17:00 h) en el ciclo agrícola 2026.*

TABLA 2

Magnitud de la muestra capturada por parcela experimental

Parcela (Estímulo)	Intervalos control	Eventos con audio	Aves individuales
1 (audio1.wav)	230	*2 221*	*1 849*
2 (audio2.wav)	258	*1 857*	*1 563*
3 (audio3.wav)	28	*498*	*435*
Total	516	*4 576*	*3 847*

Nota: *Las aves individuales se contabilizan sumando los códigos únicos generados en cada sesión de monitoreo por parcela (5 sesiones en P1, 2 en P2 y 3 en P3).*

2.4 Instrumentos y Procedimiento de Recolección

El desarrollo físico y lógico del prototipo se fundamentó en el paradigma de la computación en el borde (Edge Computing) [14], asegurando el procesamiento de los algoritmos de inteligencia artificial localmente sin requerir conectividad a internet, lo cual es vital en zonas altoandinas rurales.

Para materializar el sistema se integró un microordenador NVIDIA Jetson Nano [15], acoplado a una pantalla táctil LCD para el monitoreo local. La visión óptica se resolvió con una Cámara Web ELP USB 3.0 (sensor IMX291) equipada con una lente varifocal CS Mount de 2.8 a 12 mm, ajustada manualmente para

optimizar el contraste de los objetivos sobre el suelo labrado [16]. El módulo de actuación acústica se vinculó al microordenador mediante un cable de audio de 3.5 mm a XH2.54, conectado a una Placa Amplificadora Digital XH-M543 (chip TPA3116) [17], la cual energizó dos altavoces direccionales de trompeta. El sistema completo operó por alimentación eléctrica convencional.

El software se desarrolló en Python 3.9 utilizando PyTorch [18] y OpenCV [19] para ejecutar inferencias locales en GPU (CUDA, precisión FP16) con la arquitectura ligera YOLO11n (*nano*) [20], operando con imágenes capturadas a 640×480 px (30 fps) y procesadas a una resolución de entrada de 640×640 px. Se emplearon los pesos preentrenados del conjunto de datos global COCO (*Common Objects in Context*) filtrados a la clase *bird* (ID 14), acoplados al algoritmo de seguimiento multiobjeto ByteTrack para asignar identificadores temporales a cada ave. Para reducir falsos positivos sobre el suelo labrado, durante la recolección en campo el detector operó con un umbral mínimo de confianza de 0.35 (mediana por parcela de 0.43 a 0.47; mediana global de 0.46). Ante cada detección validada, el sistema activaba automáticamente el audio correspondiente mediante aplay y guardaba en un archivo CSV local la respuesta del ave (Huye/Ignora), su tiempo de permanencia en segundos y la fecha y hora exacta. El monitoreo inició desde el primer minuto posterior a la siembra. Como limitación técnica, no se realizó una validación métrica propia del detector en campo (mAP o índice Kappa), por lo que las detecciones se interpretan bajo el desempeño operativo observado.

Debido a que cada estímulo se probó en una sola parcela (comparación exploratoria) y a que una misma ave pudo generar más de un registro si permanecía en el cultivo, los resultados de las pruebas no paramétricas se interpretaron con cautela considerando la estructura agrupada de los datos.

2.5 Técnicas de Procesamiento y Análisis de Datos

Los registros autónomos (archivos CSV) extraídos de las parcelas fueron consolidados y limpiados para su evaluación inferencial. El análisis inició con la verificación de los supuestos paramétricos; la prueba de Shapiro-Wilk [21] se empleó para determinar la normalidad de la distribución del tiempo de permanencia aviar. Ante el rechazo de la normalidad, se seleccionaron pruebas no paramétricas basadas en rangos, altamente robustas frente a la asimetría y valores atípicos.

Para evaluar la eficacia disuasiva global (proporción de huida) entre los estímulos, se utilizó una tabla de contingencia con la prueba χ^2 de independencia de Pearson, calculando el tamaño del efecto mediante la V de Cramer y confirmando las tendencias con regresión logística binaria. Para comparar el tiempo de permanencia entre las tres parcelas se aplicó la prueba de Kruskal-Wallis, seguida de contrastes post-hoc de Dunn con ajuste de Bonferroni. La habituación intradiaria se evaluó estratificando el horario de forrajeo en cuatro bloques y aplicando regresión logística. Finalmente, la curva de tolerancia interdía se modeló mediante regresión logística en función de los días de intervención activa, proyectando la vida útil del sistema. El nivel de significancia se estableció en $\alpha = 0.05$ (bilateral).

2.6 Declaración de Ética

El presente estudio se desarrolló bajo principios de bienestar animal. La tecnología evaluada se fundamenta en la repulsión acústica no invasiva, garantizando que la fauna silvestre no sufriera daño físico ni estrés letal durante los ensayos en campo. Los autores declaran no tener conflictos de interés relacionados con la publicación de este artículo.

3 RESULTADOS

La base de datos consolidada a partir de los registros autónomos del sistema Edge AI acumuló un total de 4,576 eventos de detección aviar en condición de intervención (con audio) y 516 registros de intervalos en condición de control basal (sin audio). El sistema registró 3,847 trayectorias individuales etiquetadas (sumando las sesiones de monitoreo) durante las jornadas de evaluación.

3.1 Verificación de Supuestos y Comportamiento de los Datos

Previo a la inferencia estadística, se examinó el comportamiento descriptivo del tiempo de permanencia aviar por estímulo (Tabla 3) y se evaluó su ajuste a la distribución normal mediante la prueba de Shapiro-Wilk (Tabla 4). En la Tabla 3 se observa que la media global (12.41 s) es casi cinco veces superior a la mediana (2.61 s), debido a que el 79.9% de los eventos registró permanencias menores a 10 segundos, pero con valores extremos de hasta 733.63 s que inflan el promedio. Coherentemente, el diagnóstico de la **Tabla 4** determinó un rechazo contundente de la normalidad tanto a nivel global ($W = 0.264, p < 0.001$) como en cada estímulo independiente, evidenciando una asimetría positiva extrema ($\gamma_1 = 10.34$), una concentración muy alta de datos en tiempos cortos ($\gamma_2 = 143.59$) y un 15.5% de valores atípicos. Estas propiedades confirman el sesgo natural de las variables de duración conductual y justifican la aplicación de pruebas no paramétricas basadas en rangos [22].

TABLA 3

Estadísticos descriptivos del tiempo de permanencia aviar por estímulo

Grupo (Parcela)	Eventos (n)	Media ± DE (s)	Mediana [Máx.] (s)
audio1.wav	2 221	*17.59 ± 54.33*	*2.76 [733.63]*
audio2.wav	1 857	*8.09 ± 15.74*	*2.47 [161.12]*
audio3.wav	498	*5.48 ± 8.10*	*2.42 [76.94]*
Global	4 576	*12.41 ± 39.57*	*2.61 [733.63]*

Nota: *DE = desviación estándar; Máx. = valor máximo registrado en condición de intervención activa (2 jornadas por parcela).*

TABLA 4

Diagnóstico de forma, valores atípicos y prueba de normalidad de Shapiro–Wilk

Grupo	Asimetría (γ_1)	Curtosis (γ_2)	Atípicos (%)	Estadístico W
audio1.wav	7.87	*78.83*	*17.9 %*	*0.299*
audio2.wav	4.56	*26.66*	*13.5 %*	*0.465*
audio3.wav	3.96	*21.66*	*11.0 %*	*0.554*
Global	10.34	*143.59*	*15.5 %*	*0.264*

Nota: *El porcentaje de valores atípicos se determinó bajo el criterio de Tukey ($Q_1 - 1.5 \cdot IQR$; $Q_3 + 1.5 \cdot IQR$). Todos los contrastes de Shapiro–Wilk resultaron altamente significativos ($p < 0.001$).*

3.2 Eficacia Disuasiva Comparada entre Estímulos (PE1)

Para evaluar si la probabilidad cruda de huida difería según el estímulo emitido, se estructuró una tabla de contingencia y se aplicó la prueba χ^2 de independencia de Pearson [23]. Los resultados revelaron tasas de huida global sumamente altas para los tres estímulos: Parcela 3 / Perro (87.3%), Parcela 1 / Águila (84.8%) y Parcela 2 / Gallina (84.5%) (Tabla 5 y Figura 1). La prueba no identificó diferencias estadísticamente significativas en la probabilidad de huida entre los tres sonidos ($\chi^2 = 2.576$, gl = 2, p = 0.276; V de Cramer = 0.024) [24], resultado que también se observó en la regresión logística binaria ($p > 0.05$), aunque sin demostrar equivalencia estricta entre estímulos.

TABLA 5

Frecuencias de respuesta conductual aviar por estímulo acústico

Estímulo (Parcela)	Huye (n)	Ignora (n)	Eficacia (% Huye)
audio1.wav (P1)	1 884	*337*	*84.8 %*
audio2.wav (P2)	1 569	*288*	*84.5 %*
audio3.wav (P3)	435	*63*	*87.3 %*
Total	3 888	*688*	*85.0 %*

Nota: *Prueba de independencia de Pearson:* $\chi^2 = 2.576$, $gl = 2$, $p = 0.276$; *V de Cramer* $= 0.024$ *(diferencias no significativas entre proporciones de huida).*

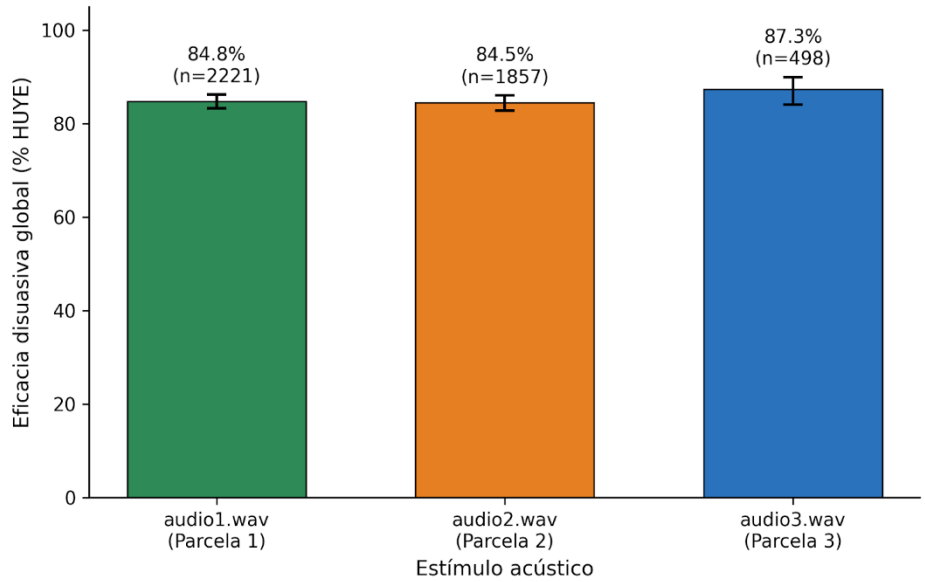


Fig. 1. Eficacia disuasiva global por estímulo con intervalos de confianza del 95 %.

Sin embargo, el análisis del "tiempo de permanencia" demostró que la rapidez de la expulsión sí depende de la naturaleza del estímulo. La prueba de Kruskal-Wallis arrojó diferencias altamente significativas ($H = 27.724, gl = 2, p < 0.001$). Los contrastes post-hoc de Dunn [25] con ajuste de Bonferroni determinaron que el estímulo de Águila (audio1.wav) presentó la mayor permanencia mediana ($Md = 2.76$ *s*), siendo significativamente menos eficiente que el llamado de Gallina (Md = 2.47 s, p < 0.001) y el ladrido de Perro (Md = 2.42 s, p = 0.0002) (Tabla 6 y Figura 2). No se hallaron diferencias significativas en rapidez entre el perro y la gallina (p = 0.720). Integrando ambos indicadores, el ladrido de perro y la alarma interespecífica de gallina exhibieron la mayor eficacia disuasiva compuesta.

TABLA 6

Comparaciones post-hoc de Dunn para el tiempo de permanencia entre estímulos

Contraste entre estímulos	Estadístico z	p (Bonferroni)	Decisión estadística
audio1 vs. audio2	4.43	*< 0.001*	*Significativo*
audio1 vs. audio3	4.00	*0.0002*	*Significativo*
audio2 vs. audio3	1.18	*0.720*	*No significativo*

Nota: *Contrastes bilaterales derivados de la prueba de Kruskal–Wallis* ($H = 27.724$, $gl = 2$, $p < 0.001$) *con ajuste de Bonferroni* ($\alpha' = 0.0167$ *por contraste).*

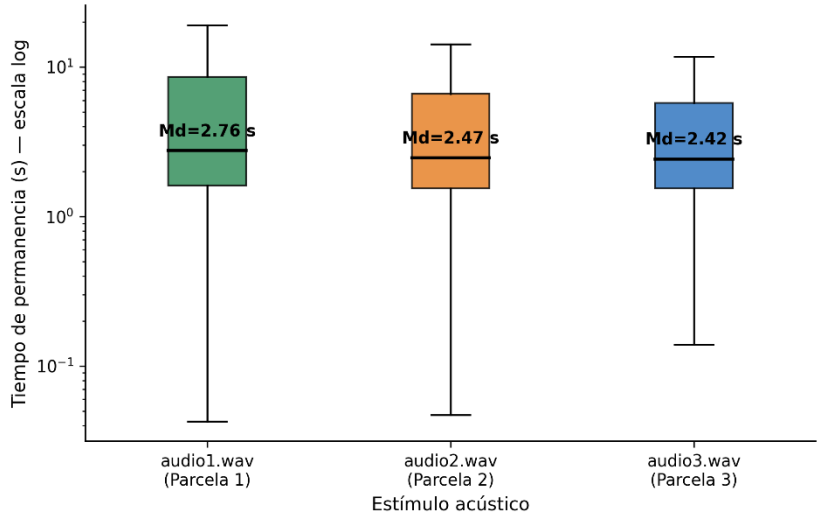


Fig. 2. Distribución del tiempo de permanencia por estímulo (escala logarítmica; sin atípicos).

3.3 Análisis de Habituación Intradiaria (PE2)

Para determinar si el sistema perdía efectividad a lo largo de la jornada diurna (06:00 a 17:00 h), se estratificó la proporción de huida en cuatro bloques horarios (Tabla 7) y se aplicó una regresión logística binaria de la respuesta sobre la hora continua [26] del día (Tabla 8). Los resultados demostraron la ausencia de una tendencia intradiaria significativa para el sonido de águila ($p = 0.348$), la alarma de gallina ($p = 0.476$) y el ladrido de perro ($p = 0.385$). Complementariamente, la permanencia mediana tampoco difirió entre bloques horarios (Kruskal-Wallis: $H = 5.358, gl = 3, p = 0.147$). Esto sugiere una estabilidad relativa de la respuesta durante la jornada diurna observada, aunque no permite descartar por completo la presencia de habituación intradiaria (Figura 3).

TABLA 7

Porcentaje de huida aviar según bloque horario y estímulo acústico

Bloque horario	audio1.wav (P1)	*audio2.wav (P2)*	audio3.wav (P3)
06:00–09:00 h	88.8 %	*83.5 %*	*100.0 %*
09:00–12:00 h	83.3 %	*90.1 %*	*78.6 %*
12:00–15:00 h	83.7 %	*83.3 %*	*87.8 %*
15:00–17:00 h	90.6 %	*S/D*	*87.9 %*

Nota: *S/D = sin datos registrados en dicho bloque horario para la parcela correspondiente. La permanencia mediana entre bloques no presentó diferencias significativas ($H = 5.358, p = 0.147$).*

TABLA 8

Prueba de tendencia intradiaria mediante regresión logística binaria

Estímulo acústico	OR por hora	*Valor p*	Decisión (H_{20})
audio1.wav (P1)	0.978	*0.348*	*Sin tendencia*
audio2.wav (P2)	1.023	*0.476*	*Sin tendencia*
audio3.wav (P3)	1.073	*0.385*	*Sin tendencia*

Nota: *OR = Odds Ratio (razón de momios) del efecto de la hora continua del día sobre la probabilidad de huida aviar ($\alpha = 0.05$).*

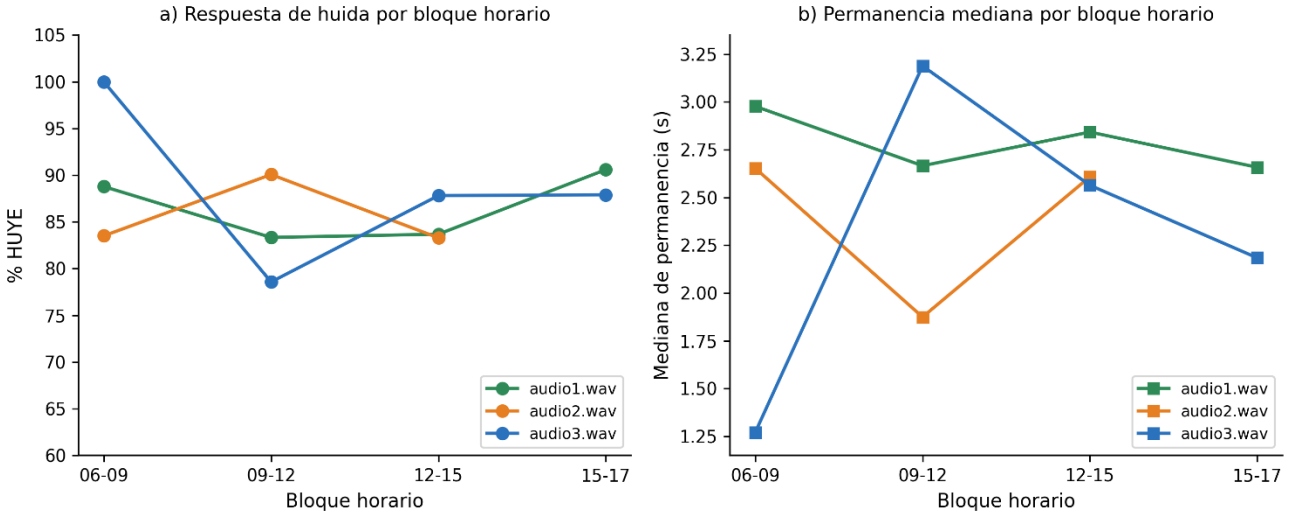


Fig. 3. Eficacia disuasiva (a) y permanencia mediana (b) por bloque horario.

3.4 Curva de Tolerancia Aviar Interdía y Vida Útil (PE3)

En contraste con la estabilidad intradiaria, la evaluación interdía reveló un desgaste gradual de la eficacia biológica entre jornadas consecutivas (Tabla 9). Mediante el ajuste de un modelo de regresión logística binaria [26] en función de los días de intervención activa (Tabla 10), se comprobó una caída estadísticamente significativa en la proporción de huida del Día 1 al Día 2 para la Parcela 1 (-14.3 p.p., $p < 0.001$) y la Parcela 2 (-5.6 p.p., $p = 0.001$), mientras que la Parcela 3 no mostró decaimiento en el lapso observado ($p = 0.295$). Coherentemente, el tiempo de permanencia mediana aumentó del Día 1 al Día 2 en la Parcela 1 (2.16 s a 3.97 s; Prueba U de Mann-Whitney [27], $p < 0.001$) y en la Parcela 2 (2.32 s a 2.70 s; $p < 0.001$). Al extrapolar la pendiente logística hasta el umbral crítico del 50% de eficacia disuasiva (Figura 4), se proyectó una vida útil de 3.1 días para el sonido de águila, 5.5 días para la alarma de gallina y un promedio global aproximado de 3.9 a 4 días de operación continua con el mismo archivo sonoro.

TABLA 9

Variación interdía de la eficacia disuasiva observada entre jornadas consecutivas

Parcela (Estímulo)	Día 1 (% Huye)	*Día 2 (% Huye)*	Cambio (p.p.)
P1 (audio1.wav)	91.2 %	*76.9 %*	−14.3
P2 (audio2.wav)	87.7 %	*82.2 %*	−5.6
P3 (audio3.wav)	84.7 %	*88.3 %*	+3.6
Global (agrupado)	89.5 %	*80.9 %*	−8.6

Nota: *p.p. = diferencia en puntos porcentuales de la tasa de huida entre el primer y segundo día de intervención activa.*

TABLA 10

Modelado logístico de la tolerancia interdía y vida útil proyectada

Parcela (Estímulo)	Pendiente b (logit/día)	*Valor p*	Vida útil (Umbral 50%)
P1 (audio1.wav)	-1.132	< 0.001	3.1 *días*
P2 (audio2.wav)	-0.438	0.001	5.5 *días*
P3 (audio3.wav)	$+0.306$	0.295	*No decrece*
Global (agrupado)	-0.739	< 0.001	$\approx$ 3.9 *días*

Nota: *La vida útil proyectada estima de manera preliminar el día en que la curva logística extrapolada desciende al 50 % de eficacia disuasiva.*

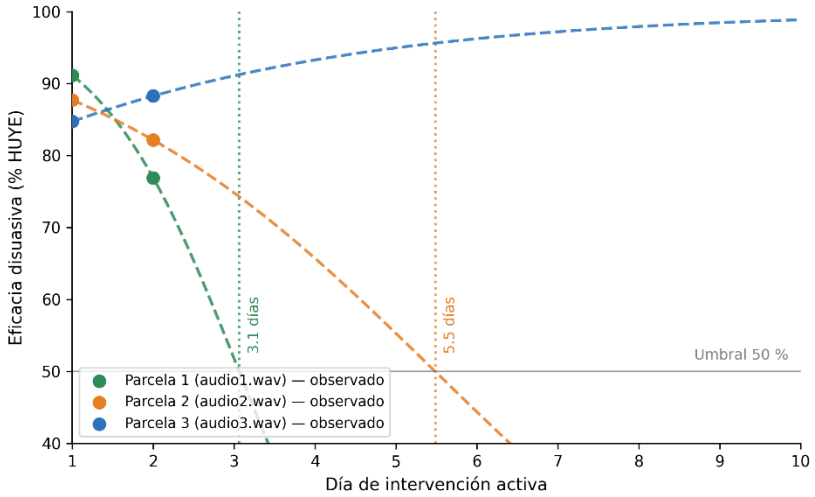


Fig. 4. Curva de tolerancia aviar observada (puntos), modelo logístico ajustado (líneas) y vida útil proyectada al umbral del 50 %.

3.5 Actividad Aviar: Control vs. Intervención

De manera descriptiva y complementaria, se compararon las jornadas de control sin audio frente a las jornadas de intervención activa (Tabla 11 y Figura 5). En las Parcelas 1 y 2, los controles silenciosos registraron una llegada constante de aves (140.2 y 182.4 entradas/h) con promedios de 3.50 a 3.90 aves presentes al mismo tiempo sin repulsión; durante la intervención activa se registraron 122.3 y 151.9 eventos/h, respectivamente, de los cuales más del 84 % concluyó en huida inmediata. Dado que las entradas por hora del control y los eventos detectados por hora con audio responden a métricas distintas, esta comparación tiene carácter descriptivo y no mide directamente una reducción en la tasa de ingreso. En la Tabla 12 se resumen las decisiones estadísticas frente a cada hipótesis.

TABLA 11

Comparación de la actividad aviar entre controles basales e intervención activa

Parcela	Control: Entradas/h	*Control: Máx. simult.*	Con audio: Eventos/h	Con audio: % Huye
Parcela 1	*140.2*	*3.50*	*122.3*	**84.8 %**
Parcela 2	*182.4*	*3.90*	*151.9*	**84.5 %**
Parcela 3	*11.9**	*1.86*	*31.4*	*87.3 %*

Nota: *Máx. simult. = media del número máximo de aves presentes simultáneamente por intervalo en condición sin audio. *Valor descriptivo correspondiente a muestreo basal reducido (28 intervalos).*

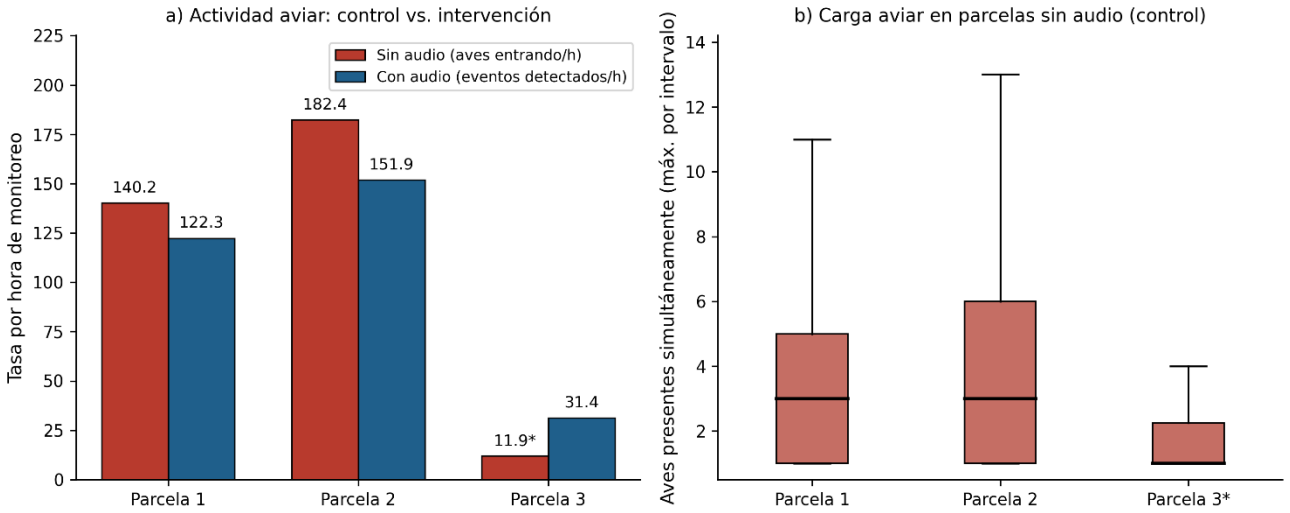


*Fig. 5. (a) Tasa de actividad aviar con y sin sistema; (b) carga aviar simultánea en los controles (*muestreo basal reducido de 28 intervalos).*

TABLA 12

Síntesis de pruebas de hipótesis y decisiones estadísticas ($\alpha = 0.05$)

Problema / Indicador	Prueba (Estadístico)	*Valor p*	Decisión
PE1: % Huye entre audios	*χ^2 Pearson ($\chi^2 = 2.576$)*	0.276	*H_{10} no rechazada*
PE1: Permanencia entre audios	*Kruskal–Wallis ($H = 27.724$)*	< 0.001	*H_{120} rechazada*
PE2: Tendencia por hora	*Reg. Logística (OR)*	0.348–0.476	*H_{20} no rechazada*
PE2: Permanencia por bloque	*Kruskal–Wallis ($H = 5.358$)*	0.147	*H_{20} no rechazada*
PE3: Cambio Día 1 → Día 2	*Reg. Logística ($b = -0.739$)*	< 0.001	*H_{30} rechazada*
PE3: Permanencia Día 1 → 2	*U de Mann–Whitney*	< 0.001 / 0.551	*Rechazo parcial*

Nota: *En la prueba de Mann–Whitney interdía, el incremento de permanencia fue significativo en las Parcelas 1 y 2 ($p < 0.001$), pero no en la Parcela 3 ($p = 0.551$).*

4 DISCUSIÓN

La implementación de YOLO11n en el borde (*Edge Computing*) mostró un desempeño adecuado para responder ante la llegada de aves en cultivos altoandinos de quinua. A diferencia de las alertas con retraso reportadas por Devi et al. [6] y Mohamad Sa'ad et al. [7], el procesamiento local y reactivo permitió activar el sonido de inmediato, logrando que más del 84 % de los eventos registrados terminara en huida en tiempos medianos menores a 3 segundos. Al contrastar estos resultados con los controles sin sonido (donde se observaron promedios de 3.5 a 3.9 aves alimentándose al mismo tiempo sin interrupción), se evidencia un alto potencial como mecanismo de protección; no obstante, serán necesarias evaluaciones agronómicas directas para cuantificar la reducción en pérdidas de semillas, el establecimiento de plántulas y el rendimiento final.

Respecto al análisis etológico de los estímulos (PE1), los resultados ofrecen matices profundos sobre el comportamiento silvestre. A diferencia de la literatura convencional que prioriza genéricamente los sonidos de

rapaces [10], nuestro análisis probabilístico y de tiempos de permanencia demostró que el llamado de auxilio de una especie que convive en la zona (gallina) y el ladrido de un depredador terrestre (perro) producen una expulsión significativamente más rápida que la llamada territorial del águila. Evolutivamente, las aves de forrajeo terrestre interpretan las señales de alarma de otras especies y los ladridos cercanos como un riesgo de mortalidad inmediata [12], mientras que el llamado de un ave de presa en el aire puede ser evaluado momentáneamente por el ave para medir la trayectoria del ataque, lo que explica la permanencia ligeramente mayor (2.76 s) registrada en la Parcela 1.

Al comparar esta tecnología con los sistemas sonoros usados en la agricultura a gran escala (como cañones de gas propano o sirenas continuas), el prototipo ofrece ventajas prácticas y ambientales claras. Mientras los cañones de gas generan ruido constante y exigen recargas costosas de combustible, el sistema basado en *Edge Computing* solo se activa cuando confirma la presencia de un ave. Sin embargo, su uso en los Andes presenta dos limitaciones de campo importantes: primero, las fuertes ráfagas de viento de la zona pueden desviar o reducir el alcance efectivo de los altavoces; segundo, durante estas pruebas el prototipo funcionó con alimentación eléctrica convencional, lo que dificulta su despliegue en parcelas rurales alejadas de la red. Como mejora futura se recomienda integrar paneles solares con respaldo de baterías.

El modelado de la tolerancia aviar (PE2 y PE3) reveló una dinámica de aprendizaje conductual de alto interés agronómico. La estabilidad observada durante la jornada diurna corrobora los hallazgos de Gilsdorf et al. [11]: la activación estrictamente reactiva del sistema y las pausas contribuyen a evitar que el ave se acostumbre durante el mismo día, superando ampliamente a los mecanismos eólicos o de ruido continuo documentados por Palao-Iturregui et al. [8] en la región altiplánica. Sin embargo, la capacidad de aprendizaje de las aves sí logra procesar el estímulo a nivel interdía. La proyección logística determinó una vida útil aproximada de 4 a 5.5 días antes de que la efectividad caiga al 50%.

Este lapso de vida útil concuerda de forma estricta con la fase fenológica de transición germinativa (BBCH 00-09) de la quinua [2], la cual requiere de aproximadamente 3 a 5 días para que el brote salga del suelo y la planta deje de ser atractiva para las aves granívoras. Por ende, el sistema cubre biológicamente la ventana crítica de vulnerabilidad de la semilla. Como limitación metodológica, la extrapolación de la curva logística (estimada a partir de dos jornadas activas por parcela) constituye una estimación preliminar que requiere validación en estudios de temporalidad extendida, recomendando fuertemente la rotación de estímulos algorítmicos si se requiere protección para fenologías más prolongadas.

5 CONCLUSIONES

El sistema inteligente basado en visión artificial reactiva (YOLO11n) y sonidos naturales de alerta permitió detectar y responder automáticamente ante la presencia de aves en parcelas recién sembradas de quinua en Challhuahuacho, registrando una respuesta de huida en el 85.0 % de los 4,576 eventos evaluados. Si bien este resultado demuestra un alto potencial de ahuyentamiento, se requieren estudios agronómicos posteriores para medir de forma directa su efecto sobre la reducción de pérdidas de semillas y el rendimiento final del cultivo.

Respecto al primer objetivo específico (PE1), no se encontraron diferencias significativas entre los tres sonidos en el porcentaje de huida (84.5 %–87.3 %; $\chi^2 = 2.576,\ p = 0.276$), sin que esto demuestre que sean estrictamente iguales. Sin embargo, el ladrido de perro ($Md = 2.42$ s) y el llamado de auxilio de gallina ($Md = 2.47$ s) expulsaron a las aves más rápido que el sonido de águila ($Md = 2.76$ s; $p < 0.001$), destacando el ladrido de perro como el sonido de mejor desempeño conjunto.

En cuanto al acostumbramiento de las aves, no se observó una caída significativa de la eficacia dentro de una misma jornada diurna (PE2; $p > 0.05$), lo que sugiere estabilidad durante el día. En cambio, al comparar días consecutivos (PE3), se confirmó una disminución de la respuesta de huida del Día 1 al Día 2 en las parcelas 1 y 2 y en el análisis agrupado ($b = -0.739,\ p < 0.001$). De manera preliminar, la proyección estima una duración útil de aproximadamente 4 días continuos (3.1 días para el sonido de águila y 5.5 días para el de gallina), lapso que coincide con los días críticos de germinación de la quinua. Como línea futura

de investigación, se recomienda validar esta duración en ensayos más largos y evaluar la rotación automática o activación secuencial de los sonidos a partir del tercer día para retrasar el acostumbramiento de las aves.

6 BIOGRAFÍAS

Luis Alberto Sanchez Valverde, Bachiller en Ingeniería Informática y Sistemas en 2025. Actualmente cursa estudios de Maestría en Inteligencia Artificial. Sus intereses de investigación incluyen el aprendizaje automático (*machine learning*), la visión artificial, la ciberseguridad y la aplicación de la IA en las entidades financieras. Profesionalmente se desempeña en el área de tecnologías de la información de la Cooperativa de Ahorro y Crédito DILE, Cusco.

Dario Roque Juro, Bachiller en Ingeniería Informática y Sistemas, forma parte de la Oficina de Tecnologías de la Información (OTI) de la Municipalidad Distrital de Challhuahuacho, donde se desempeña como asistente.

Erech Ordoñez Ramos, Ingeniero de Sistemas por la Universidad Nacional del Altiplano, Perú (2003), y Magíster en Educación con mención en Docencia y Gestión Educativa por la Universidad César Vallejo (2011). Cuenta con estudios de Maestría en Tecnologías de la Información y Comunicación, Doctorado en Ciencias de la Computación en la Universidad Nacional del Altiplano y una estancia de capacitación en la Universidad de Granada, España (2012). Su línea de investigación se centra en la inteligencia artificial, específicamente en visión artificial. Actualmente se desempeña como docente principal en la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac (UNAMBA).

Alejandrina Huaylla Quispe, Ingeniera de Sistemas e Informática por la Universidad Tecnológica de los Andes, Apurímac, Perú, y Maestra en Gestión Pública por la Universidad César Vallejo, Lima, Perú. Sus intereses de investigación incluyen la inteligencia artificial, el aprendizaje automático (machine learning), el aprendizaje profundo (deep learning), la visión artificial, el procesamiento de lenguaje natural y la innovación en metodologías educativas. Actualmente se desempeña en la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac (UNAMBA), Abancay, Perú.

7 REFERENCIAS

[1] D. Bazile, H. D. Bertero, y C. Nieto (eds.), "State of the Art Report on Quinoa Around the World in 2013," FAO & CIRAD, Roma, Italia, 2015. https://www.fao.org/3/I4042E/i4042e.pdf

[2] V. Sosa-Zuniga, V. Brito, F. Fuentes, y U. Steinfort, "Phenological growth stages of quinoa (Chenopodium quinoa Willd.) based on the BBCH scale," Annals of Applied Biology, vol. 171, no. 1, pp. 117-124, 2017. https://doi.org/10.1111/aab.12358

[3] A. L. Loza-Del Carpio, J. Clavitea, y P. Delgado, "Incidencia de aves granívoras y su importancia como plagas en el cultivo de quinua (Chenopodium quinoa Willd.) en el altiplano peruano," Bioagro, vol. 28, no. 3, pp. 139-150, 2016. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612016000300001

[4] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), "Quinua: Manejo integrado de plagas," FAO Knowledge Repository, 2016. https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i6038s

[5] E. B. Micaelo, L. G. P. S. Lourenço, P. D. Gaspar, J. M. L. P. Caldeira, y V. N. G. J. Soares, "Bird Deterrent Solutions for Crop Protection: Approaches, Challenges, and Opportunities," *Agriculture*, vol. 13, no. 4, p. 774, 2023. https://doi.org/10.3390/agriculture13040774

[6] A. T. Devi, F. Hamami, A. Y. Husodo, y A. Aranta, "Implementation of the You Only Look Once (YOLO) V5 Method for Bird Pest Detection in Rice Crops," en *Proc. 2023 Int. Conf. on Advancement in Data Science, E-learning and Information Systems (ICADEIS)*, 2023. https://doi.org/10.1109/ICADEIS58666.2023.10270848

[7] M. I. F. Mohamad Sa'ad *et al.*, "FPGA-accelerated bird detection algorithm for paddy farmers," *Majlesi Journal of Electrical Engineering*, vol. 19, no. 3, 2025. https://doi.org/10.57647/j.mjee.2025.17276.

[8] L. A. Palao-Iturregui, L. Pauro-Flores, y P. Delgado-Mamani, "Mecanismos de protección para el control de

aves plaga en el cultivo de quinua (Chenopodium quinoa Willd.) en Salcedo - Puno," Ciencias Agrarias, año 7, no. 7, 2021. https://revistas.unap.edu.pe/agr/index.php/agr/article/view/460

[9] D. Ufuoma et al., "System Dynamics And Performance Prediction Of A Wind-Powered Acoustic Bird Deterrent System," NIPES – Journal of Energy Technology and Environment, vol. 7, no. 4, pp. 124–136, 2025. https://doi.org/10.37933/jete/7.4.2025.2570

[10] M. Bomford y P. H. O'Brien, "Sonic deterrents in animal damage control: a review of device tests and effectiveness," Wildlife Society Bulletin, vol. 18, no. 4, pp. 411-422, 1990. https://www.jstor.org/stable/3782740

[11] J. M. Gilsdorf, S. E. Hygnstrom, y S. M. VerCauteren, "Use of frightening devices in wildlife damage management," Integrated Pest Management Reviews, vol. 7, no. 1, pp. 29-45, 2002. https://doi.org/10.1023/A:1025760032566

[12] J. Tracey, M. Bomford, Q. Hart, G. Saunders, y R. Sinclair, "Managing bird damage to fruit and other horticultural crops," Bureau of Rural Sciences, Canberra, Australia, 2007. https://www.dpi.nsw.gov.au/__data/assets/pdf_file/0005/193739/managing_bird_damage-full-version.pdf

[13] D. C. Montgomery, Design and Analysis of Experiments, 10th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2020. https://www.wiley.com/en-us/Design+and+Analysis+of+Experiments%2C+10th+Edition-p-9781119492443

[14] Y. Kalyani y R. Collier, "A Systematic Survey on the Role of Cloud, Fog, and Edge Computing Combination in Smart Agriculture," Sensors, vol. 21, no. 17, p. 5922, 2021. https://doi.org/10.3390/s21175922

[15] NVIDIA Corporation, "Jetson Nano Developer Kit," 2023. [Online]. Disponible: https://developer.nvidia.com/embedded/jetson-nano-developer-kit.

[16] ELP, "ELP USB 3.0 Camera 1080P IMX291 with 2.8-12mm Varifocal Lens," 2023. https://www.elpcctv.com/elp-2mp-usb30-webcam-cmos-imx291-mjpeg-yuy2-50fps-zoom-camera-with-cs-2812mm-lens-p-403.html

[17] Texas Instruments, "TPA3116D2 50-W Stereo, 100-W Mono Class-D Audio Amplifier," Datasheet, 2022. https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tpa3116d2.pdf

[18] A. Paszke et al., "PyTorch: An Imperative Style, High-Performance Deep Learning Library," en Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS), vol. 32, pp. 8024-8035, 2019. https://doi.org/10.48550/arXiv.1912.01703

[19] G. Bradski, "The OpenCV Library," Dr. Dobb's Journal of Software Tools, vol. 25, no. 11, pp. 120-125, 2000. https://www.proquest.com/trade-journals/opencv-library/docview/202684726/se-2

[20] G. Jocher y J. Qiu, "Ultralytics YOLO11," Software versión 11.0.0, 2024. [Online]. Disponible: https://github.com/ultralytics/ultralytics.

[21] S. S. Shapiro y M. B. Wilk, "An analysis of variance test for normality (complete samples)," Biometrika, vol. 52, no. 3-4, pp. 591-611, 1965. https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591

[22] W. H. Kruskal y W. A. Wallis, "Use of ranks in one-criterion variance analysis," Journal of the American Statistical Association, vol. 47, no. 260, pp. 583-621, 1952. https://doi.org/10.1080/01621459.1952.10483441

[23] K. Pearson, "On the criterion that a given system of deviations from the probable in the case of a correlated system of variables is such that it can be reasonably supposed to have arisen from random sampling," The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, vol. 50, no. 302, pp. 157-175, 1900. https://doi.org/10.1080/14786440009463897

[24] H. Cramér, Mathematical methods of statistics. Princeton University Press, 1946. https://doi.org/10.1515/9781400883868

[25] O. J. Dunn, "Multiple comparisons using rank sums," Technometrics, vol. 6, no. 3, pp. 241-252, 1964. https://doi.org/10.1080/00401706.1964.10490181

[26] D. W. Hosmer, S. Lemeshow, y R. X. Sturdivant, Applied logistic regression (3.ª ed.). Wiley, 2013. https://doi.org/10.1002/9781118548387

[27] H. B. Mann y D. R. Whitney, "On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other," The Annals of Mathematical Statistics, vol. 18, no. 1, pp. 50-60, 1947. https://doi.org/10.1214/aoms/1177730491