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

Aplicación móvil con Machine Learning y Realidad Aumentada de elementos históricos para incrementar el conocimiento del Parque Arqueológico Choquequirao 2025

Mobile application with Machine Learning and Augmented Reality for historical elements to increase knowledge of the Choquequirao Archaeological Park 2025



Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac – Perú
Riqchary, revista de investigación en ciencia y tecnología
ISSN: 2810-8124 (en línea) / ISSN: 2706-543x
Vol. 8 Núm. 2 (2026) - Publicado: 28/09/2026
doi.org/10.57166/riqchary/v8.n2.2026
Páginas: 13- 22
Recibido 03/08/2026; Aceptado 16/09/2026
https://doi.org/10.57166/riqchary/v8.n2.2026.2

Jheyson J. Arone-Angeles
Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac
https://orcid.org/0009-0006-1639-2637
201054@unamba.edu.pe

Ed N. Soto-Huamanhorcco
Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac
https://orcid.org/0009-0001-5725-5501
201068@unamba.edu.pe

Kevin A. Arias-Figueroa
Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac
https://orcid.org/0009-0003-1627-3564
karias@unamba.edu.pe

Luz L. Criado-Huaylla
Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac
https://orcid.org/0009-0000-9393-7756
lcriado@unamba.edu.pe

Resumen— El Parque Arqueológico de Choquequirao presenta dificultades en el acceso a información histórica por la escasa conectividad en su recorrido. Se desarrolló una aplicación móvil offline denominada "Qirao" que integra Realidad Aumentada, Machine Learning y Geolocalización para incrementar el conocimiento del parque. La metodología fue un diseño cuasi-experimental que comparó un grupo de control y experimental, con una muestra de 30 turistas seleccionados mediante muestreo no probabilístico por conveniencia. Para el reconocimiento visual autónomo, se entrenaron modelos independientes basados en la arquitectura YOLO26 Preview, exportados a TensorFlow Lite. Los resultados evidenciaron un impacto positivo y estadísticamente una diferencia significativa asociada al uso de la aplicación, el puntaje de conocimiento fue de 17 puntos en el grupo experimental frente a 11 en el de control (+54.55%; t(28)=-5.572, p<.001, d=2.03), el tiempo de ubicación de elementos históricos se redujo de la categoría 20-25 a 10-20 minutos (U=216, p<.001, r=0.78), el número de elementos localizados incrementó de 17 a 22 (+29.41%; t(15.19)=-2.933, p=.010, d=1.07) y el tiempo de obtención de información se redujo de la categoría 60-100 a 20-60 segundos (U=225, p<.001, r=0.85). Una limitación fue el tamaño muestral reducido (n=30) al no existir un patrón estable de afluencia turística diaria, lo cual sugiere cautela al generalizar los hallazgos.

Palabras clave: aplicación móvil, Choquequirao, machine learning, parque arqueológico, patrimonio cultural, realidad aumentada, visión computacional.

Abstract—The Choquequirao Archaeological Park faces challenges in accessing historical information due to limited connectivity along its route. An offline mobile application called "Qirao" was developed, integrating Augmented Reality, Machine Learning, and Geolocation to enhance knowledge of the park. The methodology employed a quasi-experimental design comparing a control group with an experimental group, using a sample of 30 tourists selected through non-probability convenience sampling. For autonomous visual recognition, independent models based on the YOLO26 Preview architecture were trained and exported to TensorFlow Lite. The results showed a positive and statistically significant impact: the knowledge score increased from 11 to 17 points (+54.55%; t(28)=-5.572, p<.001, d=2.03), the time to locate historical elements was reduced from the 20-25 category to 10-20 minutes (U=216, p<.001, r=0.78), the number of elements located increased from 17 to 22 (+29.41%; t(15.19)=-2.933, p=.010, d=1.07) and the time to obtain information was reduced from the 60-100 range to 20-60 seconds (U=225, p<.001, r=0.85). One limitation was the small sample size (n=30) due to the lack of a stable pattern of daily tourist influx, which suggests caution when generalizing the findings.

Keywords: mobile application, Choquequirao, machine learning, archaeological park, cultural heritage, augmented reality, computer vision.

https://doi.org/10.57166/riqchary/v8.n2.2026.2

1. INTRODUCCIÓN

La integración de tecnologías emergentes como la Realidad Aumentada (RA) y el Machine Learning (ML) ha transformado la forma en que los turistas interactúan con el patrimonio cultural y arqueológico [1]. Estas tecnologías permiten superponer contenido digital sobre el entorno físico en tiempo real, facilitando la interpretación de sitios históricos que, por su complejidad arquitectónica o estado de conservación, resultan difíciles de comprender sin apoyo especializado [2]. A nivel global, diversas organizaciones culturales han adoptado aplicaciones de RA para mejorar la experiencia en sitios arqueológicos, demostrando mejoras como la satisfacción del turista [3].

El Parque Arqueológico de Choquequirao, ubicado en la cordillera de Vilcabamba, provincia de La Convención, departamento de Cusco, Perú (13°32 S, 72°44 O, 3033 msnm), constituye uno de los vestigios más importantes del legado inca. Frecuentemente denominado la "hermana sagrada" de Machu Picchu, este sitio alberga estructuras monumentales como andenerías, templos, plazas y un sofisticado sistema hidráulico que evidencia un alto nivel de desarrollo urbano [4]. Sin embargo, se registra una cantidad inferior de turistas a la de otros destinos arqueológicos de la región. Esta limitada afluencia obedece principalmente a las *dificultades de acceso* que demanda aproximadamente dos días de caminata, a la *escasez de guías turísticos especializados* con información y a la carencia de recursos informativos, además de la *escasa conectividad a internet* a lo largo de gran parte del recorrido, lo cual restringe el acceso a fuentes digitales de información histórica durante la visita.

Ante esta problemática, surge la siguiente interrogante: ¿En qué medida el desarrollo de una aplicación móvil que integre Machine Learning y Realidad Aumentada puede incrementar el conocimiento de los turistas sobre los elementos históricos del Parque Arqueológico de Choquequirao?

En este contexto, la presente investigación tuvo como objetivo general incrementar el conocimiento de elementos históricos en el Parque Arqueológico de Choquequirao a través del desarrollo de una aplicación móvil que integra Machine Learning y Realidad Aumentada. Dicho objetivo general se evaluó operativamente mediante tres objetivos específicos, alineados con las dimensiones de la variable dependiente: incrementar el aprendizaje de elementos históricos, mejorar la localización de dichos elementos considerando el tiempo de ubicación y la cantidad de elementos localizados, y mejorar la búsqueda de información sobre los elementos históricos considerando el tiempo de obtención de dicha información.

A partir de estos objetivos se formularon las hipótesis de investigación correspondientes. La hipótesis general planteó que el uso de la aplicación móvil con Machine Learning y Realidad Aumentada incrementaría el conocimiento de los turistas de elementos históricos en el Parque Arqueológico de Choquequirao. De manera específica, se planteó que dicho uso incrementaría el aprendizaje de los turistas, mejoraría la localización de los elementos históricos, y mejoraría la búsqueda de información sobre dichos elementos históricos en el Parque Arqueológico de Choquequirao.

2. MARCO TEÓRICO

La investigación se sustenta en lo siguiente: Desde el enfoque de aprendizaje, se adopta la Teoría del Aprendizaje Experiencial de Kolb [5]: el conocimiento se construye mediante un ciclo de experiencia concreta, observación reflexiva, conceptualización abstracta y experimentación activa, ciclo que "Qirao" replica al convertir el reconocimiento de un elemento histórico (escaneo con la cámara) en una experiencia concreta seguida de retroalimentación inmediata en RA. Esto es coherente con la literatura sobre aprendizaje informal en museos y sitios patrimoniales, donde el conocimiento se construye sin mediación de un currículo formal [6].

En cuanto a la adopción tecnológica, se empleó la Teoría Unificada de Aceptación y Uso de la Tecnología (UTAUT) [7], que explica la intención de uso a partir de expectativa de desempeño, expectativa de esfuerzo, influencia social y condiciones facilitadoras, operacionalizadas mediante el cuestionario QUIS. Estudios previos documentan los beneficios de la RA en sitios patrimoniales [1] [2] [3], y meta análisis confirman un efecto moderado y significativo sobre el aprendizaje, especialmente en contextos informales [8]. Para garantizar el rigor histórico de dicha información, se siguieron los Principios de Sevilla [9], guía internacional para arqueología virtual, aplicados con apoyo de un guía especializado. En conjunto, Kolb y Falk y Dierking sustentan la variable dependiente (conocimiento) UTAUT, la independiente (uso de la app, medido con QUIS); y los Principios de Sevilla validan el contenido histórico presentado.

2.1 Trabajos relacionados

Renteria [10] entrenó un modelo YOLOv3/Darknet para reconocer recursos turísticos en Apurímac, alcanzando una precisión del 90%, desplegado en un servidor Flask. Gonzales [11] aplicó gamificación (sin ML/RA) en el Museo Arqueológico y Antropológico de Apurímac, con 100 participantes e incrementos de 15.98% en conocimiento cultural. Huayhua y Quispe [12] usaron RA (sin ML) para turismo arqueológico en Lima, reduciendo el tiempo de búsqueda a 1.02s en promedio. Arias et al. [13] combinaron visión computacional (YOLOv7) y RA en Machu Picchu y Abancay, mediante una API RESTful mejorando la disponibilidad de información turística mediante texto, audio y video.

Estos antecedentes se agrupan en dos categorías: los que priorizan el reconocimiento visual mediante ML, pero dependen de conectividad en línea (Renteria [10], Arias et al. [13]), y los que emplean RA o gamificación sin un componente de ML autónomo (Gonzales [11], Huayhua y Quispe [12]). Ninguno integra simultáneamente ML, RA y funcionamiento completamente offline, ni mide de forma

conjunta el impacto en el aprendizaje, localización y tiempo de búsqueda de información. Esta brecha, particularmente relevante en Choquequirao, donde la escasa conectividad limita las soluciones basadas en servidores externos, motivó el desarrollo de la presente investigación.

3. METODOLOGÍA

3.1 Diseño del estudio y muestra

La investigación se desarrolló en el año 2025, periodo durante el cual se **realizaron tres visitas de campo** al Parque Arqueológico de Choquequirao. El estudio fue de tipo aplicado con nivel explicativo, orientado a comprobar relaciones de causa-efecto entre el uso de la aplicación móvil (variable independiente) y las dimensiones de la variable dependiente: conocimiento, localización y búsqueda de información [14]. Se optó por un diseño cuasi-experimental [14], dado que la muestra fue seleccionada de manera no probabilística por conveniencia y el estudio se desarrolló en un entorno de campo donde no fue posible controlar plenamente variables extrañas propias del contexto natural, como las condiciones climáticas, el ritmo del recorrido o la interacción con otros turistas y guías. En consecuencia, las relaciones causales identificadas se interpretaron con la cautela propia de este tipo de diseño.

Se trabajó con dos grupos conformados a partir de los turistas que aceptaron voluntariamente participar en el estudio:

a) **Grupo experimental (n=15):** Realizó el recorrido turístico al Parque Arqueológico de Choquequirao con la aplicación.
b) **Grupo de control (n=15):** Realizó el recorrido turístico al Parque Arqueológico de Choquequirao sin la aplicación.

Los resultados se compararon mediante encuestas aplicadas al grupo de control y grupo experimental, con el fin de evaluar el impacto de la aplicación en la comprensión histórica de los turistas.

La población estuvo conformada por **200 turistas** que visitaron el Parque Arqueológico de Choquequirao *durante el periodo de estudio, según el registro mensual de ingreso a la ruta*. De este universo, se seleccionó una **muestra no probabilística por conveniencia de 30 turistas** dispuestos a participar. Posterior a su selección, los 30 participantes fueron distribuidos de manera equitativa en dos grupos de igual tamaño: grupo experimental (n=15) y grupo de control (n=15). Sociodemográficamente, la muestra estuvo integrada por turistas en un rango de edad de 19 a 45 años (53.3% hombres y 46.7% mujeres), de los cuales el 70% fueron turistas nacionales y el 30% extranjeros. Como criterios de inclusión, se requirió que contaran con un teléfono inteligente (iOS o Android) y realizaran la visita por primera vez; mientras que se excluyó a menores de edad y adultos mayores dada la alta exigencia física de la ruta de trekking, así como a guías turísticos y visitantes previos para evitar que sus conocimientos preexistentes constituyeran una variable confusora en la evaluación del aprendizaje.

La muestra incluyó tanto turistas nacionales como extranjeros, para lo cual los cuestionarios de recolección de datos se aplicaron en español e inglés según el idioma del turista. No se controlaron variables como experiencia previa con Realidad Aumentada, dado que la aplicación fue diseñada con una interfaz intuitiva que no requiere conocimiento técnico previo; adicionalmente, los participantes del grupo experimental recibieron una capacitación breve sobre su uso antes del recorrido.

La participación de los turistas en el estudio fue voluntaria dado que previamente se explicó de forma verbal a cada participante el objetivo de la investigación, el procedimiento a seguir y el uso que se daría a la información recopilada, obteniendo su consentimiento informado de manera verbal. Adicionalmente, *cada turista consignó su nombre al completar el cuestionario físico*, lo cual constituye un registro escrito de su participación voluntaria. Se garantizó la confidencialidad de los datos personales, utilizados exclusivamente con fines académicos y estadísticos.

3.2 Procedimiento

3.2.1 Recopilación de información

La recopilación de información se realizó mediante tres visitas de campo al Parque Arqueológico de Choquequirao; la duración fue 5 días en las 3 ocasiones:

Primer viaje (abril de 2025, otoño en transición hacia la época seca con lluvias ocasionales): Se realizó un reconocimiento del trayecto a Choquequirao como turista sin conocimiento previo, para identificar necesidades y requerimientos de la aplicación. Se enfrentaron las adversidades y retos logísticos típicos de los turistas, se recopilaron puntos de interés y datos para entrenar el modelo en un sector, con el fin de realizar pruebas y lanzar una versión beta.

Segundo viaje (julio de 2025, invierno, temporada seca con cielos despejados): Se realizó el recorrido planificado con guía turístico. Se probó la versión beta, implementada con el modelo YOLO11, con resultados positivos en mapa offline y detección de elementos históricos. Se recopiló información de los demás sectores del parque y datos históricos adicionales para completar la aplicación. Además, se compartió la versión beta con otros turistas, quienes la probaron y dieron recomendaciones para mejorarla.

Tercer viaje (diciembre de 2025, verano, inicio de lluvias, con condiciones climáticas variables): La aplicación ya estaba compilada en iOS y Android, con el modelo YOLO26 Preview [15], una versión preliminar disponible desde septiembre de 2025, y disponible para los turistas del parque. Desde el inicio del recorrido se invitó a los turistas a usarla, garantizando acceso completo a las funciones de reconocimiento histórico y geográfico. Durante el trayecto se recopilaron datos de interacción real

y encuestas que permitieron evaluar su utilidad, usabilidad y efectividad.

3.2.2 Instrumentos

Se utilizaron dos cuestionarios para la recolección de datos: el **Questionnaire for User Interaction Satisfaction** (QUIS 7.0) [16], empleado para evaluar la usabilidad de la aplicación móvil y un **cuestionario de conocimiento** compuesto por 23 preguntas de opción múltiple con una puntuación de 0 a 23 puntos. La validez de contenido del cuestionario de conocimiento fue determinada mediante el juicio de cuatro expertos, obteniéndose un coeficiente V de Aiken de 0.88, evidenciando una alta validez de contenido en los ítems formulados.

Asimismo, se incluyeron los indicadores para medir el tiempo de obtención de información y de ubicación de elementos históricos, establecidos mediante categorías ordinales previamente definidas. Para evaluar la obtención de información, se definieron categorías con valores del 1 al 4, correspondientes respectivamente a [menor a 20], [20–60], [60–100] y [mayor a 100] segundos. Para el tiempo de ubicación de elementos, también se asignaron categorías del 1 al 4 correspondientes, respectivamente [menor a 10], [10–20], [20–25] y [mayor a 25] minutos.

3.2.3 Desarrollo de la aplicación móvil

El desarrollo de la aplicación móvil se llevó a cabo siguiendo los principios de la metodología ágil Extreme Programming (XP), basada en iteraciones cortas y retroalimentación continua para la mejora progresiva del sistema [17]. Para la implementación técnica se utilizó Flutter junto con el lenguaje Dart, seleccionados por su capacidad multiplataforma, que permite generar aplicaciones compatibles con Android e iOS.

La aplicación se estructuró en los siguientes módulos:

- **Registro**: Permitió crear cuentas y almacenar resultados del turista.
- **Navegación y geolocalización:** Mostró rutas, puntos de interés y mapas offline del recorrido.
- **Reconocimiento de elementos (RA y ML):** Identificó estructuras arqueológicas a partir de imágenes capturadas por el dispositivo móvil y muestra en tiempo real información contextual superpuesta.
- **Información histórica:** Presentó descripciones, imágenes y datos culturales de cada elemento.
- **Juegos educativos:** Incluyó cuestionarios interactivos para reforzar el aprendizaje del visitante.
- **Configuración**: Permitió ajustar idioma, configuración de cuenta y opciones de conectividad.

3.2.4 Arquitectura e infraestructura

Se implementó el Screaming Architecture con el objetivo de organizar los módulos por dominio de negocio. Este enfoque permite que la estructura del proyecto comunique explícitamente el propósito del sistema (qué hace) y no simplemente las tecnologías empleadas en su construcción. Asimismo, se integró Clean Architecture para definir las capas internas y las reglas de comunicación, lo cual garantiza un entorno de desarrollo organizado y de fácil mantenimiento [18].

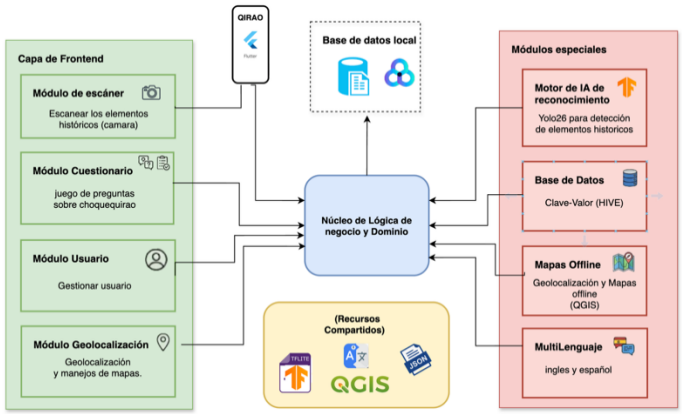


Fig. 1. Arquitectura general de la aplicación.

Capa de la aplicación (Frontend): Capa de presentación organizada por dominio funcional, responsable del diseño visual e interacción con el turista. Se comunica con el Backend para obtener datos y con Shared para acceder a componentes reutilizables.

Núcleo de lógica de negocio y dominio (Backend): Gestiona el acceso a la base de datos local Hive [19], el consumo de los modelos de detección y la identificación de elementos históricos capturados por el escáner.

Recursos compartidos (Shared): Módulo transversal que centraliza los componentes y servicios utilizados en todos los dominios de la aplicación, evitando la duplicación de código mediante el principio DRY (Don't Repeat Yourself).

3.2.5 Geolocalización

La geolocalización se implementó mediante QGIS [20], comparando cuatro fuentes cartográficas de teselas XYZ [20] (OpenStreetMap, Google Maps, Google Satellite, Google Global Terrain) según resolución satelital, claridad del relieve y presencia de etiquetas [20]. Se seleccionó Google Satellite por ofrecer una imagen limpia y sin marcadores superpuestos, facilitando la integración de rutas y puntos de interés personalizados. Tras delimitar el área y precisar los niveles de zoom, se exportó en formato .mbtiles [21]. Sobre esta base, se trazaron manualmente en QGIS las rutas principales del recorrido, considerando caminos oficiales, zonas de descanso, miradores, recursos multimedia y coordenadas geográficas. Los puntos georreferenciados se organizaron por sectores, identificando los elementos históricos de cada uno, y se exportaron en formato JSON para su integración en la aplicación.

La aplicación móvil se integró mediante el GPS del dispositivo, permitiendo ubicación en tiempo real, seguimiento de rutas y notificaciones automáticas según posición. La cartografía offline en MBTiles [21] se cargó localmente al iniciar la app, garantizando su uso sin conectividad a internet.

https://doi.org/10.57166/riqchary/v8.n2.2026.2

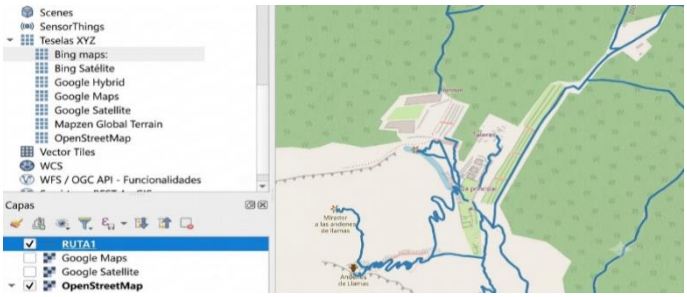


Fig. 2. Configuración de los parámetros y trazado de rutas y puntos de interés en QGIS.

Modelo

El módulo de detección visual constituyó el componente central de Machine Learning de la aplicación. Su función fue identificar y clasificar los elementos históricos del Parque Arqueológico de Choquequirao a través de la cámara del dispositivo móvil, proporcionando información contextual al turista en tiempo real y sin necesidad de conexión a internet.

Selección del Modelo:

Para la comparativa técnica de la selección del modelo de detección de objetos se realizó un análisis comparativo entre tres familias de arquitecturas candidatas: YOLO26 preview [22], YOLO11 (Ultralytics, 2024) [23] y MobileNetV2-SSD (Google, 2018). El desarrollo de YOLO26 se llevó a cabo de forma abierta en el repositorio oficial de Ultralytics en GitHub [24], donde cada commit y modificación del modelo se publicó públicamente desde septiembre de 2025. Para la evaluación se instaló la versión 8.3.222 del paquete ultralytics [25], la cual incluía el modelo Yolo26 preview, previo a su lanzamiento oficial en enero de 2026 [22]. La selección se fundamentó en los siguientes criterios: precisión de detección (mAP), velocidad de inferencia en CPU, compatibilidad con TensorFlow Lite [26] para despliegue offline en móviles, se armó la siguiente tabla basado en la página oficial de yolo [23].

TABLA 1
Comparativa de arquitecturas de detección de objetos para la selección del modelo de entrenamiento

Características	Yolo26 preview	Yolo11	MobileNet V2-SSD
Fecha de lanzamiento	2025	Octubre 2024	2018
mAP (COCO, variante Nano/Ligera)	40.9%	39.5%	22%
Inferencia CPU (ms)	38.9	56.9	30
Exportación Tflite nativa	Sí (sin DFL)	Si	Si
NMS requerido	No (end-to-end)	Si	Si
Detección de objetos pequeños	Mejorada (ProgLoss+STAL)	Estándar	Limitada

Como se observa en la Tabla 1, YOLO26 preview presentó ventajas significativas sobre las alternativas evaluadas. En comparación con YOLO11, YOLO26 preview alcanza un mAP 1.4 puntos porcentuales superior (40.9% vs 39.5%) con una reducción del 43% en el tiempo de inferencia en CPU (38.9ms vs 56.9ms). Esta mejora resulta crítica para la aplicación, donde los dispositivos móviles generalmente no disponen de GPU dedicada para inferencia.

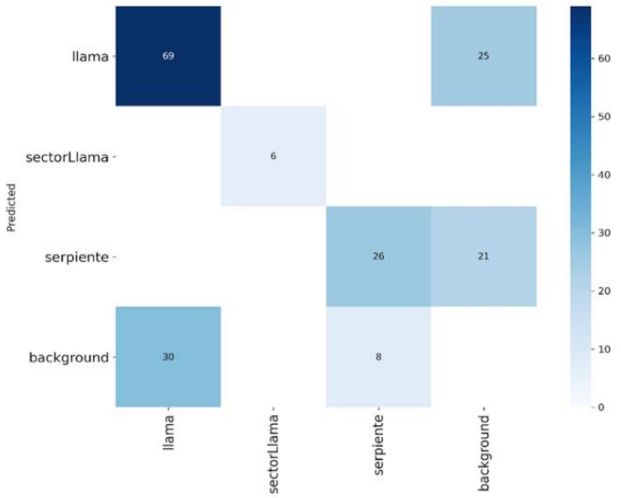


Fig. 3. Matriz de confusión del modelo seleccionado (YOLO26 Preview) del sector Llamas del Sol.

Respecto a MobileNetV2-SSD, si bien este modelo fue históricamente popular para aplicaciones móviles por su bajo consumo de recursos (~4.3M parámetros), su precisión de detección fue considerablemente inferior (~22% mAP vs 40.9% de YOLO26 preview), lo que lo hace inadecuado para la identificación precisa de estructuras arqueológicas que frecuentemente presentan características visuales similares entre sí.

Etiquetado y entrenamiento:

El etiquetado de las imágenes se realizó de forma manual mediante cuadros delimitadores (bounding boxes), identificando cada elemento histórico en fotografías capturadas en condiciones variables de iluminación, ángulo y distancia. El entrenamiento se realizó en Google Colab con aceleración por GPU y el framework Ultralytics, empleando la arquitectura YOLO26 preview. Mediante transfer learning con pesos de COCO y un ciclo de 200 épocas se garantizó la convergencia del modelo, aplicando data augmentation para un reconocimiento preciso bajo condiciones ambientales variables.

TABLA 2
Sectores y elementos reconocibles por el proceso de detección

Sector	Train	Val	Test	Elementos reconocibles (Labels)
Caída del Agua	159	44	30	andenes, casaCaidaAgua, larqa
Hannan	103	22	20	larqa, ofrenda, phaqcha, plazaHannan
Llamas del Sol	295	44	35	llama, sectorLlama, serpiente
Pikiwasi	25	8	8	pikiwasi
Qollqas	78	22	20	larqa, qollqa, ushnu

Sacerdotal	38	10	10	sacerdotal
Talleres	32	8	8	areaAlmacenamiento, piedraNoTallada, talleres
Ushnu	34	43	35	plazaPrin, plazaUsh, puertaUsh, ushnu, hannan, qollqas
Plaza Principal	254	42	35	banioInca, batanIncompleto, batanRedondo, estrucCeremonial, estructuraCeremonialIn, larqa, linteles, miniAndenes, plazaPrincipal, qollqasPlaza
TOTAL	**1018**	**243**	**201**	**23 elementos únicos**

Como se detalla en la Tabla 2, la aplicación móvil fue capaz de reconocer 23 elementos históricos de un total de 9 sectores del parque, entrenado sobre un total de 1,462 imágenes anotadas. El sector con mayor complejidad de detección fue la Plaza Principal con 10 elementos distintos.

Adaptación a la Aplicación Móvil

Los modelos se exportaron a TensorFlow Lite (.tflite), aprovechando la eliminación del módulo DFL de YOLO26 preview y se empaquetaron como assets, ejecutándose de forma offline mediante tflite_flutter. Los nueve modelos entrenados por sector ocuparon en conjunto 88.6 MB de almacenamiento en el dispositivo, confirmando la viabilidad de mantenerlos coexistiendo localmente sin requerir conexión a internet. La aplicación móvil detectó automáticamente el sector arqueológico según la ubicación del turista y el modelo correspondiente. Al capturar una imagen, reconoció el objeto y superpuso la información en Realidad Aumentada, consultando por el label detectado el contenido textual, de video y almacenado en la base de datos local Hive [19].

3.3 Variables

Variable independiente: Aplicación móvil con Machine Learning y Realidad Aumentada.

Esta variable se evaluó mediante la interacción de los turistas con el prototipo móvil durante su recorrido por el parque. La usabilidad de la aplicación móvil fue evaluada mediante el cuestionario QUIS 7.0 (escala 0–9), el cual consideró la reacción general, diseño de pantalla, terminología y capacidad del sistema.

Variable dependiente: Conocimiento del Parque Arqueológico de Choquequirao.

Para esta variable se realizó la medición en base a:

- Puntaje en cuestionario de conocimiento (0–23 pts).
- Tiempo de ubicación de elementos históricos (minutos).
- Número de elementos históricos localizados.
- Tiempo de obtención de información de elementos históricos (segundos).

3.4 Análisis de Datos

La técnica de recolección de datos fue la encuesta, aplicada a los turistas del Parque Arqueológico de Choquequirao con el objetivo de evaluar la usabilidad y el impacto educativo de la aplicación. Como instrumento se utilizó el cuestionario 7.0, que permitió medir la satisfacción del turista respecto a la interfaz, consistencia del diseño, información presentada, facilidad de uso, aprendizaje y rendimiento. La fiabilidad del instrumento se verificó mediante el coeficiente Alfa de Cronbach.

Para el análisis de resultados se empleó estadística descriptiva y la prueba t de Student para muestras independientes, con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, con el fin de comparar el conocimiento adquirido, el tiempo de ubicación, el tiempo de obtención de información y la cantidad de elementos localizados antes y después del uso de la aplicación. Para la evaluación se utilizaron las herramientas IBM SPSS Statistics (para el análisis estadístico, la prueba t de Student, el cálculo del Alfa de Cronbach y la generación de tablas) y Microsoft Excel (para la organización, limpieza y codificación inicial de los datos recolectados).

4. RESULTADOS

Tras el entrenamiento de los modelos de cada sector, se evaluó su desempeño utilizando las métricas Precision, Recall y F1-score, calculadas a partir de la matriz de confusión. **Precision** indica la proporción de predicciones positivas realizadas por el modelo que son realmente correctas. Por su parte, **Recall** mide la capacidad del modelo para detectar correctamente las instancias positivas presentes en los datos. Finalmente, **F1-score** corresponde a la media armónica entre Precision y Recall, proporcionando una medida equilibrada del rendimiento del modelo cuando se consideran simultáneamente los falsos positivos y falsos negativos.

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad ; \quad Recall = \frac{TP}{TP + FN}$$

$$F1 - score = \frac{2(Precision\,.\,Recall)}{Precision + Recall}$$

Donde:

TP = verdaderos positivos. FN = falsos negativos.
FP = falsos positivos. TN = verdaderos negativos.

Dado que se entrenó un modelo independiente para cada sector, se calculó el promedio de las métricas entre los sectores evaluados.

TABLA 3
Resultados de los promedios de cada sector, precision, recall y f1-score

Sector	Precision	Recall	F1-Score
Caída del Agua	0.40	0.35	0.37
Hannan	0.70	0.40	0.51
Llamas del Sol	0.75	0.73	0.74
Pikiwasi	0.99	1.0	0.99
Qollqas	0.72	0.77	0.74
Sacerdotal	1.0	0.70	0.82
Talleres	0.40	0.53	0.45
Ushnu	0.87	0.83	0.85
Plaza Principal	0.87	0.51	0.64
Promedio	**0.74**	**0.65**	**0.68**

Al ponderar las métricas por el número de instancias de prueba de cada sector (N tests=201), se obtuvo por Precision global de 0.74, Recall de 0.62 y F1-Score de 0.67. Se observó una notable heterogeneidad de desempeño entre sectores: Pikiwasi alcanzó una Precision de 0.99, mientras que Caída del Agua y Talleres registraron los valores más bajos (0.40 en ambos casos). Esta variabilidad es consistente con hallazgos reportados en la detección de estructuras arqueológicas a la intemperie, donde factores como el tamaño del conjunto de entrenamiento por sector, el terreno y las condiciones de iluminación afectan directamente el desempeño del modelo [27].

Con el fin de validar la integración del modelo entrenado dentro de la aplicación móvil, se realizaron pruebas de funcionamiento en un entorno real mediante el uso de la cámara del dispositivo. La aplicación implementó los modelos de detección previamente entrenados para reconocer elementos históricos y superponer información en tiempo real utilizando técnicas de Realidad Aumentada. Durante las pruebas, la aplicación logró identificar los elementos del entorno y mostrar contenido informativo sobre la pantalla del dispositivo.



Fig. 4. Visualización del reconocimiento de un elemento y superposición de información con RA.

Impacto en la Localización de elementos históricos

Respecto a la localización de elementos históricos, evaluado mediante el tiempo de ubicación y la cantidad de elementos localizados, el grupo control se ubicó en promedio en la categoría 20-25 minutos y localizó 17 elementos, mientras que el grupo experimental se ubicó en la categoría 10-20 minutos y localizó 22 elementos, lo que representó un incremento de 29.41% en la cantidad localizada. La prueba U de Mann-Whitney permitió rechazar la hipótesis nula para el tiempo de ubicación, evidenciando que el uso de la aplicación se asoció con una reducción significativa de dicho tiempo, con categorías casi sin solapamiento entre grupos (U=216, p<.001, r=0.78). La prueba t rechazó también la hipótesis nula para la cantidad de elementos localizados y confirmó un aumento significativo asociado al uso de la aplicación (t(15.19)=-2.933, p=.010, d=1.07).

Impacto en la Búsqueda de Información

En la dimensión de búsqueda de información, medida en una escala ordinal de cuatro categorías, menor a 20, 20-60, 60-100 y mayor a 100 segundos, el grupo de control se ubicó en promedio en la categoría 60-100 segundos y el grupo experimental en la categoría 20-60 segundos. La prueba U de Mann-Whitney aportó evidencia para rechazar la hipótesis nula, indicando que el uso de la aplicación se asoció de manera significativa con una reducción del tiempo de obtención de información, permitiéndole al turista acceder a datos relevantes de manera autónoma, con una separación completa entre las categorías de ambos grupos (U=225, p<.001, r=0.85).

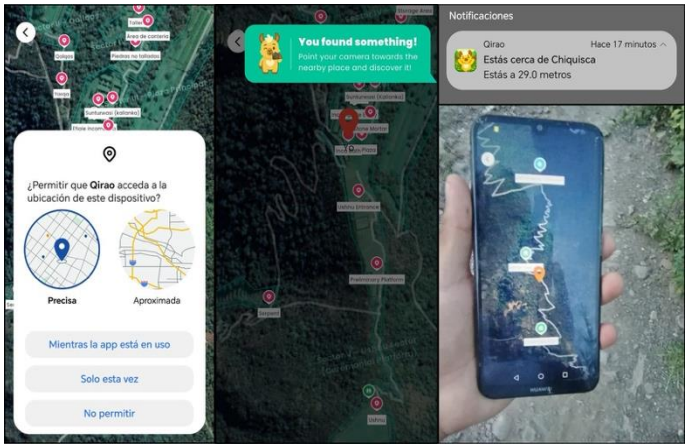


Fig. 5. Pruebas capturadas en campo sobre la ubicación y localización de elementos históricos.

Impacto en el Aprendizaje

Se halló una diferencia significativa entre el grupo control y el experimental, con puntajes promedio de 11 y 17 puntos respectivamente, lo que representó un incremento de 54.55% entre el grupo control y el grupo experimental. La prueba t para muestras independientes permitió rechazar la hipótesis nula de igualdad de medias, respaldando la hipótesis alterna al evidenciar que el uso de la aplicación mostró una asociación positiva con un mayor nivel de aprendizaje de los turistas sobre los elementos históricos del parque, con un tamaño del efecto muy grande. [t(28)=-5.572, p<.001, d=2.03].

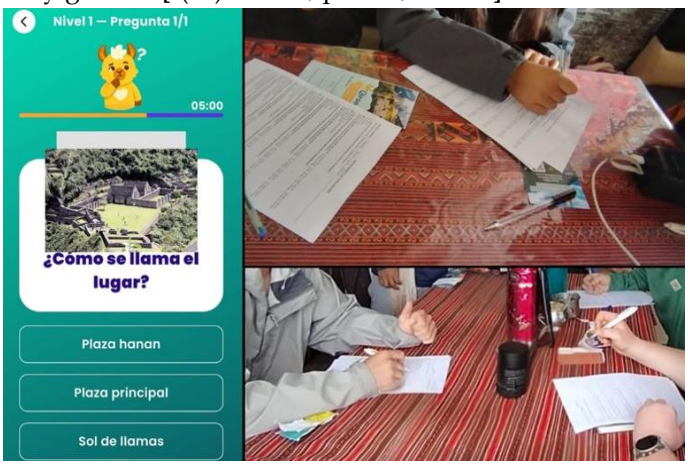


Fig. 6. Interfaz del cuestionario digital y registro físico de los instrumentos aplicados.

Después de haber aplicado la encuesta al grupo de control y grupo experimental se obtuvieron las siguientes

interpretaciones de los resultados en la siguiente figura.

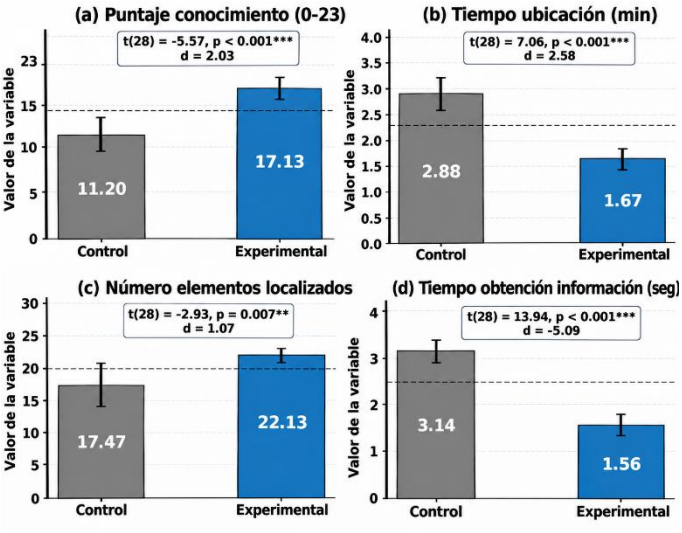


Fig. 7. Comparación grupo experimental vs. control por variable dependiente.

La Figura 7 ilustra cómo el grupo experimental superó de manera estadísticamente significativa ($p < 0.001$) y con un tamaño del efecto masivo ($d > 1.2$) al grupo de control en variables evaluadas. En concreto, la solución tecnológica mostró una tendencia favorable al incremento en el aprendizaje, al mejorar la media de puntaje de conocimiento (17.13 vs. 11.20) y la media de número de elementos localizados (22.13 vs. 17.47), además la categoría promedio del tiempo de ubicación (1.67 vs. 2.88), correspondiente a las categorías de 10–20 minutos y 20–25 minutos, respectivamente ($U = 216$, $p < 0.001$, $r = 0.78$). De manera similar, el tiempo de obtención a la información presentó una reducción de la categoría promedio (1.56 vs. 3.14), correspondiente a 20–60 segundos y 60–100 segundos, respectivamente ($U = 225$, $p < 0.001$, $r = 0.85$).

TABLA 4
Interpretaciones de las dimensiones

Dimensión	Indicador	Escala	Interpretación
Aprendizaje	Cuestionario de conocimiento	0 – 23 pts	Control M=11.20 (DE=3.61) vs Experimental M=17.13 (DE=1.99), t(28)=-5.572, p<.001, d=2.03
Localización	Tiempo de ubicación de elementos históricos	Minutos	Control M=2.88 (20-25 min) vs Experimental M=1.67 (10-20 min) U=216, p<.001, r=0.78
	Número de elementos históricos localizados	Cantidad	Control M=17.47 (DE=6.03) vs Experimental M=22.13 (DE=1.25); t(15.19)=-2.933, p=.010, d=1.07.
Búsqueda de información	Tiempo de obtención de información de elementos históricos	Segundos	Control M=3.14 (60-100 s) vs Experimental M=1.56 (20-60 s); U=225, p<.001, r=0.85

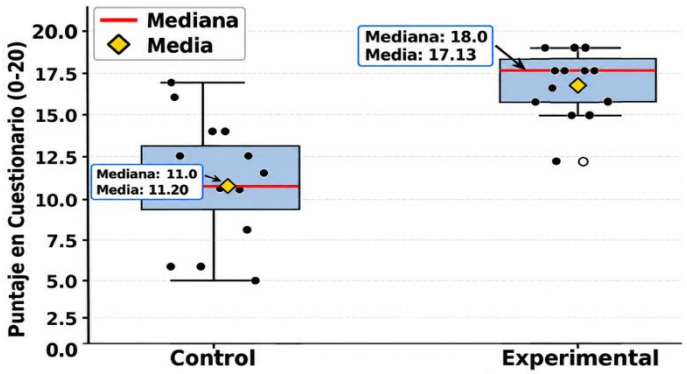


Fig. 8. Distribución de puntajes de conocimiento por grupo.

La Figura 8 muestra que el Grupo Experimental logró un conocimiento superior y más uniforme que el Control (media 17.13 vs. 11.20), confirmando que la herramienta estandariza un alto aprendizaje y cumple la prueba de Levene ($p > 0.05$) de homogeneidad de varianzas.

Impacto y confiabilidad de la Aplicación Móvil

Se determinó la consistencia interna del *Cuestionario de Usabilidad de Interacción de Usuario* (QUIS) versión 7.0 [16]. Este instrumento se estructuró mediante una escala de valoración de 0 a 9 puntos para medir las dimensiones de reacción general, diseño de interfaz, terminología, reconocimiento de elementos históricos y capacidad del sistema. El análisis de los datos arrojó un coeficiente Alfa de Cronbach de 0.860, calculado sobre la muestra del grupo experimental (n=15) con un nivel de usabilidad de 7.94, lo que demostró una confiabilidad muy alta y certificó la estabilidad métrica del instrumento QUIS 7.0 para ser aplicado en el entorno de estudio.

5. DISCUSIONES

Los resultados sugirieron que la integración de ML y RA se asoció con una interacción más intuitiva del turista y una menor carga cognitiva durante la exploración [8], en línea con Huayhua y Quispe [12], quienes también reportaron reducción en el tiempo de acceso a la información mediante RA, este estudio añadió un componente de ML para el reconocimiento automático, favoreciendo una experiencia más autónoma que no depende de la navegación manual.

Esta percepción de facilidad de uso se reflejó en la alta confiabilidad del cuestionario QUIS (α=0.860) con un nivel de usabilidad de 7.94 sobre 9, consistente con los determinantes de expectativa de desempeño y esfuerzo propuestos por UTAUT, lo que sugirió que la aceptación tecnológica de la aplicación acompañó, y podría haber facilitado, el impacto educativo observado.

En magnitud, el incremento de conocimiento observado (+54.5%) fue considerablemente mayor al reportado por Gonzales [11] (+15.98%), quien empleó gamificación sin ML ni RA con 100 participantes en un museo controlado, frente al entorno de campo abierto y muestra menor (n=30) de este estudio. Dado que los

instrumentos y escalas no fueron idénticos entre ambos, la comparación debe interpretarse con cautela y no como evidencia de mayor efectividad tecnológica.

La reducción en tiempos de localización y búsqueda de información se asoció con la geolocalización offline y la inferencia local vía TensorFlow Lite, relevante en un entorno como Choquequirao con acceso limitado a servicios digitales convencionales.

En el desempeño técnico, la heterogeneidad entre sectores (Precision ponderada = 0.74; 0.40–0.99) fue consistente con estudios de detección arqueológica a la intemperie, donde el entrenamiento, terreno e iluminación afectan el modelo [27]; asimismo, el funcionamiento offline en trekking coincidió con investigaciones sobre RA para senderismo que identifican la conectividad y el entorno como factores críticos de diseño [28]. A diferencia de Renteria [10] y Arias et al. [13], que dependieron de infraestructura online en contextos urbanos, esta propuesta integró ML, RA, geolocalización y funcionamiento offline en un entorno remoto de trekking. Sin embargo, la arquitectura offline basada en 9 modelos (88.6MB) exige una pre-descarga obligatoria en zonas urbanas antes del trekking, lo que representa una barrera logística para la adopción en la entrada del parque [28].

6. LIMITACIONES

La presente investigación presentó diversas limitaciones metodológicas y de diseño, comenzando por un tamaño muestral reducido de 30 turistas (15 por grupo) sin un cálculo previo de potencia estadística, sumado a un reclutamiento por conveniencia entre personas con teléfono inteligente dispuestas a participar, lo que pudo generar un sesgo de autoselección y restringir la validez externa de los hallazgos, aspecto agravado por la ausencia de registros sobre el género, el nivel educativo y la condición física de los participantes.

Asimismo, las tres visitas de campo se llevaron a cabo bajo condiciones climáticas variables (lluvia, neblina y sol) sin controlar su efecto en la detección del modelo ni en la experiencia de los usuarios, a lo cual se añade la falta de un seguimiento longitudinal y la imposibilidad de aislar el aporte individual de cada componente tecnológico (realidad aumentada, aprendizaje automático, geolocalización y mecánicas de juego), al haber sido evaluados únicamente de forma conjunta.

7. CONCLUSIONES

Se desarrolló con éxito la aplicación móvil "Qirao", integrando Machine Learning y Realidad Aumentada sin necesidad de internet. Respecto al objetivo de incrementar el aprendizaje de los turistas, se registró una asociación positiva y estadísticamente significativa los resultados, identificándose una diferencia a favor del grupo experimental (media de 17 puntos) frente al control (11 puntos), un incremento de 54.55 por ciento (t(28)=-5.572, p<.001, d=2.03).

En cuanto al objetivo de localización, se observó una reducción en el tiempo de ubicación de elementos, de la categoría 20-25 a 10-20 minutos (U=216, p<.001, r=0.78), junto con un incremento del 29.41 por ciento en la cantidad de elementos localizados, de 17 a 22 (t(15.19)=-2.933, p=.010, d=1.07). Respecto al objetivo de búsqueda de información, se observó una reducción del tiempo de obtención de información, de la categoría 60-100 a 20-60 segundos (U=225, p<.001, r=0.85). La usabilidad, medida con QUIS, mostró una confiabilidad muy alta, con un alfa de Cronbach 0.860 y nivel de usabilidad de 7.94 sobre 9. No obstante, el módulo de reconocimiento visual presentó un desempeño heterogéneo entre sectores, con una precisión ponderada de 0.74 y un rango de 0.40 a 0.99, aspecto a considerar en la efectividad técnica general de la aplicación.

A partir de estos hallazgos, se recomienda a los gestores del parque (Ministerio de Cultura y Dirección Desconcentrada de Cultura de Cusco), evaluar la incorporación de Qirao como herramienta complementaria de difusión cultural en sectores con escasez de guías especializados; a los desarrolladores, priorizar la recolección de imágenes de entrenamiento adicionales en los sectores de menor precisión (Caída del Agua y Talleres) y explorar reconstrucciones en 3D y a futuras políticas de turismo cultural digital, evaluar la réplica de esta solución en sitios arqueológicos de accesibilidad limitada.

Basada en las cuatro mediciones clave (el nivel de conocimiento, el tiempo de ubicación, la cantidad de elementos localizados y el tiempo de obtención de información), se logró contrastar formalmente las hipótesis formuladas y confirmar la consecución de los objetivos planteados, concluyendo que el desarrollo de la aplicación móvil "Qirao" alcanzó con éxito el objetivo general al incrementar el conocimiento de los turistas sobre el Parque Arqueológico de Choquequirao mediante la integración offline de Machine Learning y Realidad Aumentada, al tiempo que se cumplieron los tres objetivos específicos tras validar mejoras estadísticamente significativas con tamaños de efecto elevados en el aprendizaje de contenido histórico (incremento del 54.55%), en la eficiencia de localización (reducción del tiempo a 10-20 minutos y aumento del 29.41% en elementos hallados) y en la optimización de la búsqueda de información (reducción del tiempo a 20-60 segundos), consolidando una solución tecnológica de alta usabilidad (alfa de Cronbach de 0.860) .

Referencias

[1] P. Singh, N. Pahuja, M. Kansal, S. Gurung, U. Shukla y S. Gupta, «Enhancing Tourism Experiences and Preserving Cultural Heritage with AR and VR,» de *2024 2nd International Conference on Disruptive Technologies (ICDT)*, Greater Noida, India, 2024. https://doi.org/10.1109/ICDT61202.2024.10489490

[2] A. Ramtohul y K. K. Khedo, «Augmented reality systems in the cultural heritage domains: A systematic review,» *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, vol. 32, p. e00317, marzo 2024.

https://doi.org/10.1016/j.daach.2024.e00317

[3] T. Jung, H. Lee, N. Chung y M. C. tom Dieck, «Cross-cultural differences in adopting mobile augmented reality at cultural heritage tourism sites,» *International Journal of Contemporary Hospitality Management,* vol. 30, nº 3, p. 1621–1645, 19 Marzo 2018.

[4] MINCETUR, «Recurso turistico MINCETUR,» 19 septiembre 2024. [En línea]. Available: https://consultasenlinea.mincetur.gob.pe/fichaInventario/index.aspx?cod_Ficha=2579. [Último acceso: octubre 2025].

[5] D. A. Kolb, Experiential Learning: Experience as the Source of Learning and Development, Englewood Cliffs, Nueva Jersey: Prentice Hall, 1984.

[6] J. H. Falk y L. D. Dierking, Learning from Museums: Visitor Experiences and the Making of Meaning, ilustrada ed., B. Academic, Ed., Bloomsbury Academic, 2000, p. 272.

[7] V. Venkatesh, M. G. Morris, G. B. Davis y F. D. Davis, «User Acceptance of Information Technology: Toward A Unified View,» *MIS Quarterly,* vol. 27, nº 3, pp. 425-478, 2003. https://doi.org/10.2307/30036540

[8] J. Garzón y J. Acevedo, «Meta-analysis of the impact of Augmented Reality on students' learning gains,» *Elsevier,* vol. 27, pp. 244-260, Junio 2019. https://doi.org/10.1016/j.edurev.2019.04.001

[9] V. M. López-Menchero Bendicho, «International Guidelines for Virtual Archaeology: The Seville Principles,» *Springer,* pp. 269-283, 11 Noviembre 2013.

[10] R. A. Renteria, «Machine learning y realidad aumentada para el reconocimiento de recursos turísticos,» Puno, 2021.

[11] W. Y. Gonzales, «Aplicación móvil con técnica de gamificación para la mejora del conocimiento en el Museo Arqueológico y Antropológico de Apurímac,» Perú, Abancay, 2023.

[12] J. A. Huayhua Vara y R. F. Quispe Visa, «Aplicación móvil basada en realidad aumentada para promocionar el turismo arqueológico en la ciudad de Lima, Perú,» Lima, 2019.

[13] K. A. Arias Figueroa, L. L. Criado Huaylla, M. j. Ibarra Cabrera, J. A. Aguirre Carrasco, R. Quispe Merma y L. Ibarra Cabrera, «Visión computacional y realidad aumentada para mejorar la disponibilidad de información en atractivos túristicos,» 2024.

[14] P. I. Vizcaíno Zúñiga, R. J. Cedeño Cedeño y I. A. Maldonado Palacios, «Metodología de la investigación científica,» *Ciencia Latina,* vol. 7, nº 4, 2023. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i4.7658

[15] Ultralytics, «¡Los momentos destacados de Ultralytics en YOLO Vision 2025!,» 29 septiembre 2025. [En línea]. Available: https://www.ultralytics.com/es/blog/ultralytics-key-highlights-from-yolo-vision-2025. [Último acceso: octubre 2025].

[16] K. Norman, B. Shneiderman, B. Harper y L. Slaughter, «QUIS™: Questionnaire for User Interaction Satisfaction™ 7.0 (ISR IP),» de *ACM Conference on Human Factors in Computing Systems.*, College Park, Maryland, 2007. https://doi.org/10.3390/s22155664

[17] M. A. Zamora Antuniado, L. F. Luque Vega, R. Hernandez Quesada, N. Farrera Vázquez, R. Carrasco Navarro, C. A. Gonzalez Gutierrez y Y. Aguilar Molina, «Methodology for the Development of Augmented Reality Applications: MeDARA. Drone Flight Case Study,» *Sensors,* vol. 22, nº 15, p. 5664, 28 julio 2022.

[18] R. Cecil Martin, Clean Architecture: A Craftsman's Guide to Software Structure and Design, 1 ed., Boston: Prentice Hall, 2018.

[19] H. Developers, «Hive Documentación técnica flutter,» 31 octubre 2025. [En línea]. Available: https://pub.dev/documentation/hive/latest/. [Último acceso: marzo 2026].

[20] Q. D. Team, «QGIS Documentation,» 2024. [En línea]. Available: https://docs.qgis.org/latest/en/docs/user_manual/managing_data_source/opening_data.html.

[21] Mapbox, «MBTiles Specification,» 2024. [En línea]. Available: https://github.com/mapbox/mbtiles-spec. [Último acceso: 03 03 2026].

[22] J. Glen y Q. Jing, «Ultralytics YOLO26,» Ultralytics, 14 Enero 2026. [En línea]. Available: https://github.com/ultralytics/ultralytics. [Último acceso: 04 Marzo 2026].

[23] Ultralytics, «Ultralytics YOLO11,» Ultralytics, 10 Septiembre 2024. [En línea]. Available: https://docs.ultralytics.com/es/models/yolo11. [Último acceso: 23 Agosto 2026].

[24] Ultralytics, «GitHub ultralytics,» octubre 2025. [En línea]. Available: https://github.com/ultralytics/ultralytics/commits/main/?after=c9ecb4218b81b0e2745145ab5edc2d9cb65c4124+1644. [Último acceso: octubre 2025].

[25] ultralytics, «https://platform.ultralytics.com/,» 15 diciembre 2025. [En línea]. Available: https://platform.ultralytics.com/ultralytics/yolo26/yolo26n. [Último acceso: 2025].

[26] Google LLC, «TensorFlow Lite,» 2025. [En línea]. Available: https://www.tensorflow.org/lite. [Último acceso: Marzo 2026].

[27] E. Ghaderpour, C. D. Nekoulnang, H. M. Noudjiko, P. P. Rossi, R. Rotunno y S. di Lernia, «A YOLO-Based Workflow for Detecting and Mapping Archaeological Stone Cairns in Satellite Imagery: A Case Study from Western Ennedi, Chad,» *Heritage,* vol. 9, nº 6, p. 237, 18 Junio 2026.

[28] R. Silva, R. Jesus y P. Jorge, «Development and Evaluation of a Mobile Application with Augmented Reality for Guiding Visitors on Hiking Trails,» *Multimodal Technologies and Interaction,* vol. 7, nº 6, p. 58, 31 Mayo 2023.

[29] A. A. Rodas, «Aplicación móvil con realidad aumentada para el guiado turístico del Centro Arqueológico de Sondor en Andahuaylas,» Apurímac, 2018.

[30] A. Graser, Learning QGIS, Packt Publishing, 2016.

[31] M. E. Quijano Esparza y C. A. Rey Bermúdez, «Implementación de un sistema de realidad aumentada (AR) con Unity que permita obtener información sobre artefactos históricos del Museo Guane de la UNAB, utilizando reconocimiento de imágenes,» Bucaramanga, Colombia, 2020.

[32] R. R. Díaz Vila y M. J. Vilca Lingán, «Aplicación móvil de realidad aumentada en la calidad de la información del recorrido turístico de un sitio arqueológico de Trujillo,» Trujillo, Perú, 2019.

[33] A. F. Haro Sarango, G. E. Proaño Altamirano, G. L. Merino Lema y J. C. Niama Jativa, «Metodología de la investigación desde el enfoque cuantitativo, cualitativo y mixto,» *Revista Educación,* vol. 4, nº 1, 25 septiembre 2025. https://doi.org/10.56712/latam.v6i4.4577