

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Desarrollo de modelos 3D de montículos
arqueológicos de Kaminaljuyú para su
implementación en realidad aumentada**

Trabajo de graduación presentado por Marco Vinicio Ramirez Centes
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería en Ciencia de
la Computación y Tecnologías de la información

Guatemala,

2025

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Desarrollo de modelos 3D de montículos
arqueológicos de Kaminaljuyú para su
implementación en realidad aumentada**

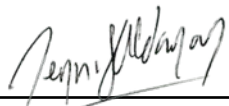
Trabajo de graduación presentado por Marco Vinicio Ramirez Centes
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería en Ciencia de
la Computación y Tecnologías de la información

Guatemala,

2025

Vo.Bo.:

(f) 
Inga. Dulce María Chacón Muñoz

(f) 
Ing. Dennis Mortiz Aldana Moscoso

Fecha de aprobación: Guatemala, 18 de noviembre de 2025.

Lista de figuras	VI
Resumen	VII
Abstract	VIII
1 Introducción	1
2 Antecedentes	3
2.1 Antecedentes internacionales	3
2.2 Antecedentes nacionales	3
2.3 Antecedentes tecnológicos	4
2.3.1 Tecnologías 3D para la preservación del patrimonio cultural	4
2.3.2 Aplicaciones educativas de la tecnología 3D y los recorridos virtuales	4
3 Justificación	6
3.1 Justificación	6
4 Objetivos	8
4.1 Objetivo general	8
4.2 Objetivos específicos	8
5 Alcance	9
5.1 Alcance del proyecto	9
5.2 Recursos disponibles	9
5.3 Tiempo disponible	9
5.4 Fuentes de información	10
5.5 Limitaciones del estudio	10
5.6 Autorización para publicar la información	10
5.7 Áreas de excelencia que abarcó (Computación)	11
6 Marco teórico	12
7 Metodología	25

7.1	Enfoque metodológico	25
7.2	Etapas de desarrollo	27
7.2.1	Planificación y asignación de tareas	27
7.2.2	Recolección y análisis de información arqueológica	27
7.2.3	Configuración del entorno de trabajo en Blender	27
7.2.4	Modelado tridimensional de estructuras	27
7.2.5	Aplicación de texturas	27
7.2.6	Validación arqueológica y ajustes	27
7.2.7	Asesoramiento técnico externo	28
7.2.8	Evaluar la calidad y precisión del modelado 3d en su integración con la aplicación de realidad aumentada	28
7.2.9	Registro	28
8	Resultados	29
8.1	Resultados	29
8.1.1	Montículo 3	29
8.1.2	Montículo 7	31
8.1.3	Montículo 12	32
8.1.4	Montículo 13	33
8.1.5	Montículo 14	34
8.1.6	Montículo La Palangana	35
8.1.7	Resultados de la encuesta	36
9	Discusión de resultados	37
9.0.1	Modelado geométrico	37
9.0.2	Texturizado y materiales	37
9.0.3	Modelos en ambiente virtual (RA)	38
9.0.4	Validación arqueológica y coherencia entre modelos	38
9.0.5	Comparación y síntesis del conjunto	38
9.0.6	Limitaciones	39
9.0.7	Trabajo futuro	39
9.0.8	Parámetros técnicos y escala de los modelos	39
9.0.9	Encuesta de percepción: resultados e interpretación (n=17)	39
9.0.10	Demografía y alcance de la muestra	40
9.0.11	Alineación con los objetivos	40
9.0.12	Implicaciones y acciones de mejora	40
10	Conclusiones	42
10.1	Conclusiones	42
11	Recomendaciones	43
12	Bibliografía	44
13	Glosario	49

Lista de figuras

Figura 1:	Montículo 3, panel de vistas	29
Figura 2:	Montículo 3 visualizado en la aplicación de realidad aumentada, mostrando la reconstrucción superpuesta en el entorno real del parque arqueológico	30
Figura 3:	Montículo 7, panel de vistas	31
Figura 4:	Montículo 7 visualizado en la aplicación de realidad aumentada, mostrando la reconstrucción superpuesta en el entorno real del parque arqueológico	31
Figura 5:	Montículo 12, panel de vistas	32
Figura 6:	Montículo 12 visualizado en la aplicación de realidad aumentada, mostrando la reconstrucción superpuesta en el entorno real del parque arqueológico	32
Figura 7:	Montículo 13, panel de vistas	33
Figura 8:	Montículo 13 visualizado en la aplicación de realidad aumentada, mostrando la reconstrucción superpuesta en el entorno real del parque arqueológico	33
Figura 9:	Montículo 14, panel de vistas	34
Figura 10:	Montículo 14 visualizado en la aplicación de realidad aumentada, mostrando la reconstrucción superpuesta en el entorno real del parque arqueológico	34
Figura 11:	Montículo La Palangana, panel de vistas	35
Figura 12:	Montículo La Palangana visualizado en la aplicación de realidad aumentada, mostrando la reconstrucción superpuesta en el entorno real del parque arqueológico	35
Figura 13:	Resultados de la encuesta aplicada a los usuarios	36

El proyecto tuvo como propósito preservar digitalmente y divulgar el patrimonio cultural guatemalteco mediante el desarrollo de seis modelos tridimensionales del sitio arqueológico Kaminaljuyú. Este sitio, de gran relevancia histórica para el altiplano central de Guatemala, se encuentra en gran parte sepultado por la urbanización, lo que ha limitado su acceso, estudio y apreciación.

Para atender esta problemática, se elaboraron seis modelos tridimensionales de montículos seleccionados con base en información arqueológica validada por especialistas. El proceso de modelado se realizó utilizando el software Blender 4.3.2, lo que permitió reconstruir digitalmente estructuras no visibles en la actualidad y optimizarlas para su integración en una aplicación de realidad aumentada con fines educativos y de difusión cultural.

Los modelos resultantes incorporaron texturas y acabados que facilitaron la comprensión de la apariencia original de los montículos, así como la exploración virtual en entornos abiertos. Los archivos finales se almacenaron en formatos compatibles con motores de realidad aumentada, garantizando su preservación y posible reutilización en futuras investigaciones o proyectos de divulgación.

La validación se llevó a cabo mediante pruebas de visualización e interacción en realidad aumentada, complementadas con la retroalimentación de usuarios con experiencia en arqueología y tecnología. Se concluye que la digitalización de sitios arqueológicos a través del modelado tridimensional y su aplicación en entornos de realidad aumentada constituye una estrategia eficaz para la conservación y enseñanza del patrimonio cultural guatemalteco.

The project aimed to digitally preserve and disseminate Guatemalan cultural heritage through the development of three-dimensional models of the archaeological site of Kaminaljuyú. This site, of great historical significance for the central highlands of Guatemala, is largely buried beneath urban development. This situation has hindered its access and study.

To address this issue, six three-dimensional models of selected mounds were created based on archaeological information validated by specialists. The work made it possible to digitally reconstruct structures that are no longer visible today and to prepare these models for integration into an augmented reality application oriented toward education and cultural dissemination.

Faithful three-dimensional representations were obtained. These incorporated textures and finishes that enhanced the understanding of the original appearance of the mounds. The final files were stored in compatible formats, ensuring their preservation and potential reuse in future research or dissemination projects.

It was concluded that the digitalization of archaeological sites through three-dimensional modeling and its application in augmented reality environments constitutes an effective strategy for heritage conservation. Its continuation is suggested in other archaeological areas of the country.

El avance de las tecnologías digitales transformó las formas de preservar, estudiar y difundir el patrimonio cultural. En este contexto, el modelado tridimensional (3D), junto con la realidad aumentada (RA), se consolidaron como herramientas fundamentales en la arqueología y la museología. Estas tecnologías permitieron recrear digitalmente sitios históricos, incluidos aquellos parcialmente desaparecidos o, como Kaminaljuyú, aún enterrados.

Kaminaljuyú, ubicado en el altiplano central guatemalteco, fue una de las ciudades más importantes del período preclásico mesoamericano. Su ocupación abarcó aproximadamente desde el año 1200 a. C. hasta el 900 d. C., extendiéndose sobre una superficie de alrededor de cinco kilómetros cuadrados y conformándose por más de 230 montículos. Debido al crecimiento urbano de la Ciudad de Guatemala, gran parte del sitio fue destruido o cubierto por construcciones modernas, conservándose únicamente cerca de cuarenta montículos, de los cuales nueve permanecen resguardados dentro del Parque Arqueológico Kaminaljuyú. Entre las estructuras más representativas que aún se mantienen visibles se encuentran la Acrópolis (C-II-4) y la Estructura E de La Palangana. Asimismo, hay estructuras que se encuentran cubiertas por la vegetación, dificultando su interpretación volumétrica. Esta pérdida progresiva del paisaje arqueológico ha planteado la necesidad de recurrir a herramientas digitales para documentar, preservar y facilitar la comprensión visual de lo que permanece del sitio.

En este marco, el trabajo tuvo como propósito modelar en 3D una selección de estructuras de Kaminaljuyú, con el fin de integrarlas en una aplicación de realidad aumentada que posibilitara su visualización e interacción digital. El desarrollo se basó en el uso del software Blender, empleando datos técnicos proporcionados por el área de arqueología, la cual validó cada modelo. La planificación del proyecto se gestionó de manera centralizada a través de la plataforma Notion, donde se documentaron los avances y se asignaron las tareas correspondientes.

El proceso incluyó la recopilación y análisis de información arqueológica, la construcción progresiva de los modelos desde las bases hasta las secciones superiores, la incorporación de texturas seleccionadas desde Poly Haven y la validación arqueológica respectiva. Los modelos finales fueron almacenados en un repositorio privado en GitHub en formatos compatibles, mientras que los archivos fuente se conservaron en OneDrive para garantizar su preservación.

La investigación demostró que el uso de herramientas digitales contribuyó a la preserva-

ción y difusión del patrimonio maya guatemalteco. Asimismo, se planteó que los resultados no se limitaron al ámbito académico o técnico, sino que también ofrecieron beneficios para instituciones culturales, turísticas y educativas interesadas en promover el conocimiento del pasado mediante experiencias tecnológicas inmersivas.

El trabajo se estructura en capítulos que abordan el contexto arqueológico, la metodología de modelado y desarrollo, los resultados obtenidos y la discusión final.

En conjunto, el trabajo evidenció que la integración de tecnologías tridimensionales y de realidad aumentada constituye una herramienta viable para la conservación digital del patrimonio arqueológico guatemalteco.

2.1. Antecedentes internacionales

Uno de los referentes internacionales más relevantes en la aplicación de tecnologías tridimensionales para la conservación y difusión del patrimonio cultural es el proyecto desarrollado por el Museo Británico en colaboración con la organización CyArk. En 2014, ambas instituciones emprendieron la digitalización tridimensional de la colección de relieves asirios utilizando escáneres de luz estructurada (Artec Eva). El objetivo fue crear copias digitales de alta resolución que permitieran preservar los detalles de estas piezas históricas, al tiempo que se facilitaba su estudio y visualización desde cualquier ángulo sin riesgo para los originales [1].

El proyecto consistió en capturar más de 200 metros cuadrados de superficie escultórica, generando alrededor de 113 GB de datos de geometría y textura. Posteriormente, los modelos fueron procesados en software especializado (Artec Studio, Autodesk 3ds Max y Adobe Photoshop) para crear animaciones interpretativas que recreaban la iluminación y el ambiente original de los palacios asirios. Esta iniciativa forma parte de los esfuerzos de CyArk por construir un archivo digital mundial del patrimonio cultural amenazado, demostrando cómo las tecnologías 3D pueden integrarse en los procesos museográficos y educativos para fomentar una comprensión más profunda del pasado [1].

Este caso evidencia la utilidad del escaneo tridimensional no solo como herramienta de conservación, sino también como medio de divulgación accesible y dinámica, una tendencia que ha influido en diversos museos y proyectos arqueológicos a nivel global.

2.2. Antecedentes nacionales

En Guatemala, las iniciativas de digitalización del patrimonio cultural han comenzado a cobrar relevancia en los últimos años. En junio de 2024, el Ministerio de Cultura y Deportes, a través del Viceministerio de Patrimonio Cultural y Natural, en conjunto con la Fundación para la Conservación de los Recursos Naturales y Ambiente en Guatemala (FCG), firmó un convenio de cooperación para ejecutar el programa *“Diseño, creación e implementación de un sistema digital para registro de bienes culturales en Guatemala”* [2].

Este programa tiene como propósito prevenir el tráfico ilegal de piezas prehispánicas y eclesiásticas, además de promover la educación y sensibilización sobre la importancia del patrimonio cultural mediante el uso de herramientas tecnológicas. La viceministra Laura Cotí destacó que las tecnologías digitales aplicadas a la documentación del patrimonio son fundamentales para preservar sus valores culturales materiales y simbólicos, incentivando la participación de la juventud en procesos de innovación y conservación digital.

Aunque esta iniciativa representa un avance importante en la gestión patrimonial del país, todavía son escasos los proyectos orientados a la recreación tridimensional o la visualización inmersiva de sitios arqueológicos. En este sentido, la presente investigación se enmarca como una contribución complementaria, enfocada en la preservación digital de Kaminaljuyú a través del modelado 3D y su integración en entornos de realidad aumentada con fines educativos y de divulgación cultural.

2.3. Antecedentes tecnológicos

2.3.1. Tecnologías 3D para la preservación del patrimonio cultural

En los últimos años, el uso de herramientas digitales tridimensionales ha adquirido un papel fundamental en la conservación del patrimonio cultural, tanto tangible como intangible. La revisión sistemática realizada por Skublewska-Paszkowska et al. [3] demuestra que las tecnologías 3D, como el modelado tridimensional, la visualización 3D, la realidad aumentada (RA), la realidad virtual (RV) y los sistemas de captura de movimiento, constituyen las herramientas más empleadas en proyectos de documentación, reconstrucción y difusión del patrimonio cultural.

El estudio evidencia que estas tecnologías permiten preservar no solo objetos y monumentos, sino también manifestaciones culturales inmateriales, como la danza, la narración oral y las técnicas artesanales tradicionales, mediante su digitalización en entornos interactivos. De esta forma, se facilita la transmisión intergeneracional del conocimiento y se contribuye a evitar la pérdida de prácticas culturales amenazadas por los procesos de globalización y migración.

Asimismo, los autores destacan que el modelado y la visualización 3D han evolucionado de ser meras herramientas de documentación a convertirse en medios educativos y participativos que fortalecen la comprensión del patrimonio cultural. Estas tecnologías, al integrarse con RA y RV, posibilitan la creación de museos virtuales, aplicaciones interactivas y experiencias inmersivas orientadas tanto a la conservación como a la educación patrimonial. En conjunto, los resultados subrayan la creciente importancia de las tecnologías digitales tridimensionales como pilares en la preservación del legado cultural para las futuras generaciones [3].

2.3.2. Aplicaciones educativas de la tecnología 3D y los recorridos virtuales

La incorporación de aplicaciones tridimensionales y RA/RV al aula ha mostrado beneficios educativos claros: mayor comprensión de conceptos abstractos, incremento del compromiso estudiantil, mejoras en accesibilidad e impulso de habilidades del siglo XXI (pensamiento crítico, resolución de problemas, creatividad y alfabetización digital). En particular, los *recorridos virtuales* permiten visitar museos, sitios históricos y ecosistemas remotos sin las barreras de tiempo o costo, abriendo experiencias inmersivas y ubicuas que complementan

la enseñanza tradicional [4]. Estas prácticas han sido aprovechadas para divulgar colecciones y contextos culturales con narrativas interactivas, alineadas con enfoques de educación patrimonial.

En paralelo, la evidencia en educación superior, especialmente en ciencias médicas, muestra que los *modelos digitales 3D* superan limitaciones del material 2D (imágenes planas) al posibilitar exploración, rotación, descomposición y animación de estructuras complejas, con efectos positivos en la motivación y la comprensión del estudiantado. Su adopción sugiere transitar de un uso esporádico a uno sistemático, acompañado de desarrollo de competencias digitales docentes y estrategias didácticas específicas para integrar estos recursos al currículo [5]. En conjunto, tanto los recorridos virtuales como los modelos 3D configuran un marco tecnológico-educativo coherente con las tendencias contemporáneas de enseñanza activa e inmersiva, y son transferibles a escenarios de educación patrimonial y arqueológica como los que aborda este trabajo. Estos antecedentes sustentan la pertinencia del presente trabajo, centrado en la aplicación del modelado tridimensional y la realidad aumentada para la conservación y divulgación del patrimonio arqueológico de Kaminaljuyú.

3.1. Justificación

El modelado tridimensional de las ruinas arqueológicas de Kaminaljuyú constituye un aporte pertinente para la preservación y la divulgación del patrimonio cultural guatemalteco, al ofrecer representaciones digitales que facilitan el acceso, la interpretación y el aprendizaje sobre un sitio cuyo paisaje arqueológico ha sido sustancialmente alterado por la urbanización.

Dimensión patrimonial: pérdida por urbanización y acceso al patrimonio

Durante la época prehispánica, Kaminaljuyú abarcó aproximadamente cinco kilómetros cuadrados y estuvo conformado por más de 230 montículos. Debido al crecimiento urbano de la ciudad de Guatemala, gran parte del sitio fue destruido o quedó cubierto por construcciones modernas; se estima que hoy se conservan de forma visible alrededor de cuarenta montículos, de los cuales nueve se resguardan en el Parque Arqueológico Kaminaljuyú [6]. Esta reducción del paisaje original limita la posibilidad de observación y estudio in situ, particularmente en estructuras emblemáticas como la Acrópolis (C-II-4) o sectores de La Palangana, donde la erosión y el paso del tiempo dificultan comprender sus volúmenes y relaciones espaciales. En este contexto, la reconstrucción digital aporta una ventana interpretativa que, sin sustituir el trabajo arqueológico, posibilita recuperar visualmente formas, jerarquías y disposiciones que hoy no son evidentes [7]. Además, se alinea con iniciativas nacionales de digitalización de bienes culturales impulsadas por el Ministerio de Cultura y Deportes [2].

Dimensión educativa: aprendizaje significativo y divulgación accesible

La integración de modelos 3D en entornos de realidad aumentada favorece procesos de aprendizaje activo, al permitir la exploración situada de estructuras y la relación entre el espacio físico y la información digital. La literatura señala que la RA incrementa la motivación y mejora la comprensión de contenidos complejos al ofrecer visualizaciones interactivas y contextuales, con efectos positivos en la retención del conocimiento [8], [9], [10]. En el ámbito universitario y museográfico, estas experiencias facilitan la enseñanza de historia y

arqueología al presentar reconstrucciones creíbles, comparaciones antes/después y lecturas volumétricas del sitio; al mismo tiempo, habilitan recursos inclusivos para públicos no especializados mediante dispositivos móviles de amplio acceso. En consecuencia, el proyecto aporta materiales didácticos reutilizables para cursos, visitas guiadas y programas de mediación cultural, contribuyendo a la alfabetización patrimonial y tecnológica de estudiantes y visitantes.

Dimensión tecnológica: documentación 3D y RA como estrategia de preservación digital

Desde el punto de vista técnico, el uso de Blender para modelado y texturizado, junto con la preparación de activos para su integración en RA, promueve buenas prácticas de documentación y preservación digital (formatos interoperables, metadatos, trazabilidad de versiones). La estandarización hacia formatos orientados a tiempo real facilita la portabilidad entre plataformas y la sostenibilidad a largo plazo de los recursos digitales. Estas prácticas se encuentran en sintonía con los lineamientos internacionales sobre preservación del patrimonio digital, que enfatizan la accesibilidad, autenticidad y continuidad de los contenidos culturales en entornos digitales [11]. En conjunto, el proyecto no solo provee visualizaciones para la difusión, sino que genera insumos técnicos que pueden integrarse en repositorios académicos o institucionales para su conservación y reutilización futura.

Síntesis

La convergencia de estas tres dimensiones justifica la pertinencia del proyecto: (i) responde a la pérdida material del sitio mediante reconstrucciones verificables; (ii) habilita experiencias educativas accesibles y significativas; y (iii) establece un proceso técnico alineado con la preservación digital y la interoperabilidad, fortaleciendo el ecosistema de investigación y divulgación del patrimonio arqueológico guatemalteco.

4.1. Objetivo general

Desarrollar modelos tridimensionales de las ruinas arqueológicas de Kaminaljuyú para su integración en entornos de realidad aumentada, mediante herramientas de modelado y animación 3D, con el fin de contribuir a la preservación digital y divulgación del patrimonio cultural guatemalteco.

4.2. Objetivos específicos

- Diseñar seis modelos tridimensionales de montículos pertenecientes al sitio arqueológico Kaminaljuyú, con el propósito de representar digitalmente sus estructuras originales mediante el uso de software especializado en modelado y animación 3D.
- Implementar texturas en los modelos 3D para mejorar la precisión visual y la experiencia inmersiva, mediante técnicas de renderización y simulación.
- Evaluar la calidad y precisión de los modelos 3D en su integración con la realidad aumentada, mediante pruebas de visualización, interacción y retroalimentación de usuarios con experiencia en arqueología y tecnología.

5.1. Alcance del proyecto

El proyecto abarcó el modelado de seis montículos de Kaminaljuyú en Blender 4.3.2, la preparación de materiales y texturas para visualización en tiempo real y la optimización de activos para su integración en una experiencia de realidad aumentada compatible con ARCore. El alcance incluye: (i) reconstrucción geométrica y texturizado PBR de las estructuras seleccionadas; (ii) exportación en formatos intercambiables (`.obj/.mtl`) con UV mapping preservado; (iii) pruebas funcionales de visualización e interacción en RA sobre dispositivos Android compatibles. Quedan fuera del alcance: escaneo tridimensional in situ (fotogrametría, LiDAR), animaciones avanzadas, y el desarrollo de una aplicación multiplataforma completa (iOS/ARKit), si bien los activos se dejaron preparados para conversión a glTF/USDZ.

5.2. Recursos disponibles

El proyecto contó con los recursos necesarios para su desarrollo, incluyendo una estación de trabajo personal con capacidad para ejecutar software de modelado 3D (Blender 4.3.2), conexión a internet estable y acceso a plataformas como GitHub, OneDrive y Notion para el manejo de versiones, almacenamiento y seguimiento de tareas. Asimismo, se dispuso de la colaboración directa del departamento de arqueología y de la coordinación general del proyecto.

5.3. Tiempo disponible

El modelado se desarrolló con una programación semanal, estimándose la elaboración de un modelo tridimensional por semana, lo cual se ajustó a los plazos establecidos por el equipo. Se previó que la carga de trabajo resultara manejable dentro del calendario definido para el proyecto.

5.4. Fuentes de información

El proyecto contó con acceso a fuentes primarias proporcionadas por el departamento de arqueología, consistentes en medidas, croquis e imágenes de los montículos. Además, se consultaron fuentes secundarias como artículos académicos, sitios institucionales y documentos de divulgación arqueológica con respaldo oficial, entre ellos el Archivo General de Centroamérica (AGN), la Fundación Wiese y prensa especializada.

5.5. Limitaciones del estudio

- **Captura tridimensional.** No se contó con campañas de fotogrametría, escaneo láser o LiDAR del sitio; el modelado fue *manual* a partir de croquis, medidas y referencias arqueológicas validadas, lo que limita la precisión métrica absoluta en comparación con un levantamiento instrumental.
- **Dependencia de fuentes arqueológicas.** La geometría, proporciones y acabados respondieron a la información proporcionada por el área de arqueología. Cualquier actualización de dichas fuentes puede requerir iteraciones sobre los modelos.
- **Restricciones de hardware y reproducibilidad.** El desarrollo se realizó en una MacBook M1 Pro (16 GB RAM). No se presentaron cuellos de botella críticos bajo este entorno; sin embargo, para replicación se recomienda como referencia mínima 16 GB de RAM, almacenamiento SSD y, de ser posible, GPU con soporte moderno para shaders. Texturas de alta resolución incrementan uso de memoria y tiempos de carga.
- **Limitaciones de RA en móviles.** La visualización interactiva depende de dispositivos Android compatibles con ARCore. Teléfonos no soportados o con sensores/cámaras fuera de especificación pueden presentar inestabilidad de *tracking*, caídas de FPS o incompatibilidad. No se abordó la portabilidad nativa a iOS (ARKit) dentro del cronograma.
- **Restricciones de software y formatos.** La versión objetivo fue Blender 4.3.2 con exportación `.obj/.mtl`. El flujo de RA exige activos optimizados (conteo poligonal moderado, número reducido de materiales, atlas de texturas cuando aplica).
- **Rendimiento y tamaño de activos.** Para asegurar usabilidad en RA móvil, se priorizó estabilidad del *tracking* y tasa de cuadros sobre detalle extremo. Esto implica límites prácticos al poligonaje y a la resolución/ cantidad de texturas, lo que puede reducir microdetalle visual respecto a un render fuera de línea.

5.6. Autorización para publicar la información

Se obtuvo autorización del equipo responsable del proyecto para difundir el material como parte del trabajo académico. Los modelos no fueron publicados de forma abierta, sino que se alojaron en repositorios privados y fueron respaldados en OneDrive, respetando el control del equipo sobre su uso.

5.7. Áreas de excelencia que abarcó (Computación)

El trabajo se enmarcó en tres áreas de excelencia del Departamento de Computación de la Universidad del Valle de Guatemala (UVG):

1. **Ingeniería de software:** por la gestión sistemática del desarrollo de modelos digitales, el control de versiones, la documentación en Notion y el uso de herramientas colaborativas como GitHub.
2. **Visualización de datos e interfaces gráficas:** al crear representaciones tridimensionales con fines de divulgación, educación y exploración virtual del patrimonio.
3. **Tecnologías emergentes:** mediante la aplicación del modelado 3D y su integración en plataformas de realidad aumentada como ARCore, en concordancia con las tendencias actuales de digitalización del patrimonio.

Modelado 3D: fundamentos y aplicaciones

El modelado 3D se definió como una técnica de creación digital que permitió construir representaciones tridimensionales de objetos, mediante herramientas computacionales. Fue considerado una forma de escultura digital, en la cual se partía de formas básicas —como cubos, planos o esferas— y se añadía geometría para generar volumen y detalle [12]. Este proceso combinó aspectos técnicos y artísticos, pues requirió tanto del dominio de programas especializados como de la comprensión de la forma, el espacio y los elementos visuales.

En el ámbito del modelado tridimensional, la **topología 3D** se refiere a la estructura matemática y geométrica que define cómo los vértice (vertex), arista (edge) y cara (face) de una malla se conectan entre sí, determinando la continuidad y coherencia del modelo. Este concepto tiene sus raíces en la topología matemática, disciplina que estudia las propiedades invariantes de los objetos bajo deformaciones continuas —como estiramientos o contracciones— sin que se produzcan rupturas ni nuevas uniones [13]. En otras palabras, la topología se ocupa de la forma en que los elementos de una superficie se relacionan espacialmente, más que de sus dimensiones métricas. En modelado digital, una buena topología garantiza la correcta deformación del modelo, una distribución eficiente de poligonaje y un flujo de geometría adecuado para aplicar texturizado o animaciones. Por el contrario, una topología deficiente puede generar artefactos visuales, errores de sombreado o un rendimiento ineficiente al renderizar en tiempo real, especialmente en entornos de realidad aumentada.

Topología óptima en el modelado tridimensional

Además del fundamento matemático de la topología, en la práctica del modelado 3D se busca una *topología óptima*, entendida como una organización eficiente de la malla que permite conservar el detalle visual con la menor cantidad de poligonaje posible. Este principio asegura un flujo de bordes coherente con la forma del objeto, evita distorsiones en el sombreado y mejora el rendimiento en entornos interactivos. Una malla con topología optimizada facilita la animación, el texturizado y la exportación a formatos ligeros, utilizados en aplicaciones de realidad aumentada. Estos criterios de optimización, reconocidos en la

práctica profesional del modelado tridimensional [14], fueron considerados en la elaboración de los modelos arqueológicos del presente proyecto.

Normales: definición y efecto en iluminación y sombreado (Blender)

En una malla, las *normales* son vectores perpendiculares asociados a cara (face), arista (edge) o vértice (vertex) que determinan la orientación aparente de la superficie para el cálculo de iluminación y el sombreado. En términos prácticos, las normales controlan cómo responde el modelo a la luz (difusa y especular) y cómo se interpola el sombreado entre caras adyacentes; por ello, errores en las normales producen artefactos como bandas, brillos irregulares, oscurecimientos y *backface* evidente en tiempo real. En Blender, las operaciones clave incluyen invertir normales, recalcularlas hacia fuera/dentro, definir las desde caras, rotarlas o apuntarlas a un objetivo, y gestionar normales personalizadas mediante modificadores como *Editar Normales* o *Influir Normales*; también es posible usar la Intensidad de Cara para ponderar qué caras contribuyen más al valor resultante en un vértice [15].

Para visualización y depuración, los modos de sombreado de la Vista 3D permiten evidenciar problemas de orientación: el modo Sólido con *Cavities*, la opción de desechar caras traseras (*backface culling*), *MatCaps* y la previsualización de materiales (Eevee) ayudan a identificar normales invertidas y transiciones abruptas de sombreado. Ajustar la iluminación de estudio y habilitar sombras en la vista facilita detectar discontinuidades de normales y autosombreado [16]. En el contexto de RA móvil, una topología limpia con normales coherentes reduce artefactos de sombreado, mejora la estabilidad visual al exportar a `.obj/.mtl` (preservando UV mapping y materiales), y favorece la consistencia al convertir a formatos ligeros.

UV mapping: fundamento, desenvoltura (unwrap) y relevancia práctica

El *UV mapping* es el proceso de proyectar una malla tridimensional (XYZ) sobre un plano bidimensional (UV) para asociar, píxel a píxel, una imagen o textura con las cara (face) del modelo. En Blender, el Editor UV permite desenvolver (*unwrap*) la malla, definir costuras (*seams*), organizar islas UV y asignar mapas UV activos; de este modo, cada vértice (vertex) obtiene coordenadas U, V que referencian posiciones exactas en la textura [17]. A diferencia de las texturas procedurales, el mapeo UV ofrece control total para detalles no repetitivos (desgaste, manchas, arañazos, inscripciones) y para calcar patrones provenientes de fotografías o pinturas digitales.

La calidad del mapeo UV incide directamente en el realismo del sombreado y de los materiales PBR: una distribución de islas con área proporcional a la geometría reduce el estiramiento, costuras ubicadas en zonas de baja visibilidad evitan cortes perceptibles, y una densidad texel consistente entre islas mantiene nitidez uniforme en todo el modelo. Para formas complejas, los algoritmos automáticos (proyecciones cúbica/cilíndrica/esférica o *Smart UV*) suelen ser insuficientes; el uso deliberado de costuras guía el aplanado con menor distorsión [17]. En este proyecto, el flujo consideró: (i) marcación de costuras sobre cambios de curvatura; (ii) verificación de estiramiento con la cuadrícula de prueba; (iii) empaquetado de islas con márgenes adecuados para evitar *bleeding*; y (iv) conservación del mapa UV al exportar a `.obj/.mtl`. Un mapeo UV bien ejecutado es crucial para lograr texturas realistas y coherentes en los modelos arqueológicos destinados a entornos de realidad aumentada.

Texturizado PBR (Physically Based Rendering): principios y aplicación en Blender

El *texturizado PBR* es un enfoque de materiales e iluminación que busca reproducir de forma coherente cómo la luz interactúa con las superficies, utilizando modelos físicamente fundados. En la práctica, PBR estandariza el uso de mapas como *Base Color/Albedo*, *Roughness* (rugosidad), *Metallic* (metalidad), *Normal* (espacio tangente) y, cuando corresponde, *ambient occlusion*; estos canales permiten predecir el comportamiento de reflexión difusa y especular, el efecto de Fresnel y la conservación de energía, logrando activos consistentes bajo diferentes condiciones de iluminación [18].

Para el flujo de trabajo con Blender, PBR mejora la precisión visual porque separa propiedades físicas del material (por ejemplo, piedra estucada versus superficies metálicas) de la iluminación de la escena, evitando ajustes ad hoc de color o brillo y manteniendo resultados estables entre visores. Aunque la exportación `.obj/.mtl` preserva UV mapping y mapas básicos, la organización de texturas en el esquema PBR facilita la conversión posterior a formatos orientados a tiempo real (glTF/USDZ) empleados en RA, donde los canales *metallic-roughness*, *normales* y *ambient occlusion* son de uso común. En este proyecto, la preparación de materiales consideró este esquema para representar de forma más realista las superficies arqueológicas (piedra, tierra compactada, estuco), con variaciones de rugosidad que afectan la nitidez de los brillos y la respuesta angular esperada (Fresnel), sin depender de la iluminación específica del entorno [18].

Retopología: concepto y pertinencia en el flujo de trabajo

La *retopología* es el proceso de rehacer u optimizar la topología (disposición de vértice (vertex), arista (edge) y cara (face)) de una malla para obtener una versión más eficiente, con flujo de aristas limpio y apta para deformación, UV mapping y renderizado en tiempo real. Suele aplicarse tras el esculpido de alta resolución o después de un escaneo 3D, cuando la malla resultante presenta densidad excesiva, triángulos irregulares o *n-gons* que dificultan el texturizado y la animación [19]. El objetivo es simplificar la geometría preservando rasgos esenciales: mejorar el *edge flow*, reducir el recuento de poligonaje, y facilitar UVs y materiales con menor distorsión.

Existen enfoques manuales (control total de bucles y colocación de vértice (vertex)), automáticos (algoritmos que generan mallas optimizadas con mínima intervención) y semi-automáticos (guías del artista sobre el algoritmo), que se eligen en función de los requisitos del proyecto y las restricciones de tiempo [19]. Aunque la retopología aporta ventajas claras (optimización, mejor deformación, reducción de tamaño de archivo, y UVs más consistentes), **este proyecto no la aplicó de forma específica** porque el modelado se realizó de manera directa en Blender con control de poligonaje orientado a RA móvil, evitando mallas de alta densidad propias del esculpido o del escaneo. No obstante, su inclusión como referencia metodológica es relevante, dado que proyectos futuros basados en fotogrametría o LiDAR podrían requerir una etapa de retopología para lograr activos eficientes y coherentes con los límites de rendimiento de RA.

Buenas prácticas de optimización para modelos 3D en RA móvil

El despliegue en RA móvil impone restricciones de CPU/GPU, memoria y ancho de banda. Para sostener la tasa de cuadros y evitar latencias, conviene preparar los activos con criterios de bajo costo de render (poligonaje, materiales, texturas) y baja sobrecarga

de envío (draw call). A continuación, se resumen lineamientos prácticos compatibles con el flujo de Blender y exportación `.obj/.mtl`, pensados para una conversión posterior a formatos orientados a tiempo real (glTF/USDZ).

- **poligonaje** y *edge flow*. Mantener el conteo poligonal tan bajo como sea razonable sin sacrificar silueta; priorizar quads limpios y detalle aparente vía mapas de normales/bump en lugar de geometría adicional. En móviles, el rendimiento se degrada con mallas densas; algunos lineamientos industriales sugieren presupuestos moderados y escalables por escena para asegurar compatibilidad amplia [20].
- **Materiales y draw call**. Reducir el número de materiales y combinaciones objeto/material para limitar draw call; agrupar texturas en atlas de texturas cuando corresponda y reutilizar materiales para favorecer el batching del motor [21]. En glTF, la estandarización PBR metallic-roughness ayuda a reutilizar shaders [22].
- **Texturas (resolución, compresión, mipmaps)**. Ajustar resolución a la distancia de visión esperada (p. ej., 512–2048 px); usar mipmaps para estabilidad visual; preferir compresión GPU cuando el visor lo permita (KTX2/Basis Universal en glTF) para reducir memoria y acelerar carga [23]. En USDZ, Apple restringe formatos a JPEG/PNG/EXR/AVIF, por lo que conviene dimensionar y comprimir con esas limitaciones en mente [24].
- **UVs y empaquetado**. Asegurar UV mapping sin estiramientos marcados, con densidad de texel consistente; márgenes suficientes para evitar *bleeding* en mipmaps. Evitar *overdraw* de capas de materiales.
- **LOD y culling**. Preparar niveles de detalle (LOD) y habilitar frustum culling/occlusion culling en el visor para reducir cómputo según la distancia/cobertura de cámara [21].
- **Validación en dispositivo objetivo**. Probar en hardware real (Android/ARCore, iOS/ARKit) y ajustar sobre perfiles de rendimiento: ARCore recomienda diseño centrado en estabilidad (anclajes) y pruebas variadas de dispositivo [20]. Para flujos web/Android, validar con el *Scene Viewer* de Google (`.gltf/.glb`) antes del despliegue [25].

En este proyecto, se controló el poligonaje desde Blender (sin esculpido pesado), se limitaron materiales y se preservaron UV mapping al exportar `.obj/.mtl`. Estos activos pueden convertirse a glTF/USDZ para RA, alineando mapas PBR (albedo, normales, metallic-roughness) y aplicando compresión de texturas cuando el visor lo soporte.

Captura tridimensional para patrimonio: fotogrametría, escaneo láser y LiDAR

Fotogrametría: principios y uso para generar modelos tridimensionales

La fotogrametría es el proceso de obtener mediciones fiables a partir de fotografías para reconstruir la geometría de objetos o escenas. A partir de múltiples imágenes con solape y distinta perspectiva, los algoritmos estiman puntos de correspondencia, calculan la orientación de cámara y reconstruyen una nube densa de puntos; posteriormente se genera una malla y se proyectan texturas derivadas de las propias fotografías. Este enfoque permite

obtener modelos con alto nivel de detalle a partir de capturas asequibles (cámaras DSLR o incluso móviles), por lo que es ampliamente utilizado en patrimonio, cartografía y VFX [26].

La calidad del resultado depende de factores como: (i) cobertura y solape entre disparos (vistas perimetrales y desde diferentes alturas); (ii) control de iluminación para minimizar reflejos y *motion blur*; (iii) presencia de patrones o marcadores que ayuden a la detección de características; y (iv) calibración/EXIF consistentes. Aunque la fotogrametría puede producir mallas muy densas que requieren *retopología* y limpieza para su uso en tiempo real, es una alternativa sólida cuando se busca fidelidad geométrica en activos del patrimonio cultural.

Ámbito en este proyecto. La fotogrametría no se utilizó en el presente trabajo: los modelos arqueológicos se construyeron por modelado directo en Blender, con control de poligonaje orientado a RA móvil. Se incluye aquí como marco metodológico, dado que en líneas de investigación futuras (p. ej., campañas de documentación del sitio) podría incorporarse para generar modelos a partir de capturas in situ y posteriormente optimizarlos para visualización en RA.

Fotogrametría, escaneo láser y LiDAR: diferencias y aplicaciones

En documentación del patrimonio existen varias técnicas de captura tridimensional con naturalezas distintas. A efectos de comparación práctica:

- **Naturaleza del sensor.** *Fotogrametría* es *pasiva*: infiere geometría a partir de imágenes 2D mediante correspondencias y triangulación; depende de iluminación y textura visible. *LiDAR/escaneo láser* es *activa*: emite pulsos láser y mide tiempos de vuelo para obtener distancias directas; puede operar de día o de noche y tolera baja textura superficial [27], [28].
- **Salida de datos.** Fotogrametría produce nubes de puntos densas, mallas y texturas fotorrealistas (RGB). LiDAR genera nubes de puntos 3D con coordenadas e intensidad; puede integrarse con cámaras para *colorizar* la nube o combinarse con fotogrametría para texturizar [27], [28].
- **Vegetación y terreno.** En cobertura densa, los pulsos LiDAR pueden atravesar ojos de follaje y recuperar “*bare earth*” (terreno desnudo); la fotogrametría, al ser line-of-sight, no reconstruye lo oculto por la vegetación [27], [28].
- **Exactitud, coste y tiempo.** LiDAR suele ofrecer alta precisión vertical y captura rápida de grandes extensiones, con mayor coste de hardware y pericia; la fotogrametría reduce costes pero exige condiciones de captura y un posproceso más intensivo para grandes áreas [27], [28].
- **Casos de uso típicos.** LiDAR: silvicultura, monitoreo ambiental, cartografía de terreno bajo dosel y arqueología de paisaje. Fotogrametría: modelos fotorrealistas de yacimientos despejados, arquitectura, VFX y objetos/artefactos [27], [28].

Relevancia para sitios mayas (p. ej., Tikal, Petén). En selva cerrada, LiDAR aero-transportado facilita *DEM* y microtopografía de estructuras ocultas bajo el dosel; la fotogrametría resulta complementaria para texturizar y documentar elementos visibles tras desbroce selectivo o a escala de detalle. Aunque en este proyecto no se aplicaron estas técnicas, se incluyen para enmarcar opciones metodológicas futuras según objetivos (terreno desnudo vs. fotorrealismo) y presupuesto.

Ejemplo documentado: mapeo LiDAR de Tikal (Petén, Guatemala)

Un caso representativo del uso de *LiDAR* en arqueología de paisaje es el mapeo aéreo en Petén (Guatemala), que reveló más de 60,000 estructuras mayas previamente no registradas bajo el dosel forestal, incluyendo plataformas habitacionales, calzadas elevadas y fortificaciones. El estudio, difundido por BBC Mundo (2 de febrero de 2018), destaca que el LiDAR permitió “retirar digitalmente” la cobertura de selva y obtener una imagen tridimensional del terreno, evidenciando una red de asentamientos interconectados y una densidad poblacional mayor a la asumida anteriormente [29]. Entre los hallazgos, se subraya la identificación de una pirámide de siete niveles cubierta por vegetación y la detección de murallas defensivas en sitios como El Zotz, elementos que pasaron inadvertidos con métodos tradicionales de prospección en campo [29].

Pertinencia para esta tesis. Aunque el presente trabajo no empleó LiDAR ni fotogrametría, este ejemplo sustenta la inclusión de estas técnicas en el marco teórico: en contextos de selva densa (p. ej., Tikal), el LiDAR aero-transportado es clave para cartografiar microtopografía y *bare earth*; posteriormente, los modelos pueden integrarse en flujos de optimización y visualización (p. ej., glTF/USDZ) para experiencias de RA.

Preservación digital del patrimonio cultural

La **preservación digital del patrimonio cultural** se entiende como el conjunto de políticas, procesos técnicos y marcos legales destinados a asegurar la *accesibilidad, autenticidad y estabilidad a largo plazo* de los recursos con valor patrimonial que existen en formato digital. Abarca tanto la *información nacida digitalmente* (p. ej., sitios web, publicaciones en línea, bases de datos, multimedia) como el *patrimonio digitalizado* (conversiones a digital de soportes analógicos), reconociendo que ambos requieren estrategias diferenciadas pero complementarias [30]. En términos operativos, su objetivo no es sólo conservar “el soporte”, sino *el contenido y su contexto* a través del tiempo, de modo que pueda seguir siendo interpretado y reutilizado por las generaciones futuras.

Alcance y gobernanza (UNESCO, Memoria del Mundo)

A nivel internacional, la UNESCO ha articulado lineamientos mediante el programa *Memoria del Mundo* y la *Carta sobre la Preservación del Patrimonio Digital* (2003), que creó conciencia sobre la necesidad de políticas para proteger el patrimonio documental en formato digital y asignó a los Estados la responsabilidad primaria de su preservación [11], [30]. Entre sus principios destacan: i) priorizar lo nacido digital, ii) promover la continuidad digital durante todo el ciclo de vida (desde la creación al uso) y iii) equilibrar el acceso público con los derechos de propiedad intelectual [11].

Componentes clave

- **Selección y curaduría.** La preservación digital es inseparable de políticas claras de selección: qué se conserva y por qué. La literatura reciente enfatiza que la selección informada puede ser más urgente que la pura accesibilidad técnica, para evitar “pérdidas por desatención” [30].
- **Autenticidad y estabilidad.** Los objetos digitales deben ser verificables y trazables a lo largo de migraciones y cambios de formato. Los metadatos de preservación proveen

el *contexto* necesario para evaluar la autenticidad en el tiempo [11], [30].

- **Acceso presente y a largo plazo.** La preservación se define por posibilitar el *uso sostenido*. Se distinguen dos planos: la accesibilidad a largo plazo (mitigando obsolescencia) y el acceso actual (condiciones legales, culturales y técnicas para el uso efectivo) [30].
- **Depósito legal digital.** La Carta de la UNESCO señala el *depósito legal* como medida central: actualizar la legislación para incluir publicaciones web permite a bibliotecas/archivos nacionales recolectar y custodiar una muestra representativa del ecosistema digital del país [11], [30].
- **Archivo de la web.** Dada la vida útil efímera de las páginas (se ha estimado en promedios de semanas), la recolección automatizada y selectiva de sitios (*web harvesting*) crea acervos históricos de publicaciones en línea y reduce el riesgo de pérdida [30].

Pertinencia para esta tesis

En el marco de reconstrucciones arqueológicas y experiencias de RA, la preservación digital aporta (i) criterios de *selección* (qué versiones, recursos y metadatos conservar), (ii) *garantías de autenticidad* (procedencia, cadena de custodia de modelos, texturas y mapas PBR) y (iii) *acceso sostenible* (formatos abiertos como glTF/USDZ, documentación técnica y licencias que favorezcan la reutilización académica). De este modo, los modelos 3D y materiales asociados se integran a una política de preservación que trasciende la demostración técnica y sustenta la *memoria digital* del sitio arqueológico.

Realidad aumentada como herramienta educativa y cultural

Definiciones y diferencias: realidad aumentada (RA), realidad virtual (RV) y realidad mixta (RM)

A efectos de marco conceptual, distinguimos tres enfoques:[31]

- **Realidad Virtual (RV).** Inmersión completa en un entorno sintético: el usuario queda visual y auditivamente aislado del mundo real mediante visores opacos (HMD) y audio espacial; los sensores de seguimiento (cabeza/manos) controlan la navegación e interacción en el mundo virtual.
- **Realidad Aumentada (RA).** Superposición de elementos digitales (modelos, anotaciones, imágenes) sobre la vista del entorno real, ya sea con visores ópticos *see-through* o a través de la cámara de dispositivos móviles. El usuario sigue viendo su contexto físico, enriquecido con información digital.
- **Realidad Mixta (RM).** Integración de RA y RV: objetos virtuales y reales coexisten e interactúan de forma coherente; algunos cascos permiten alternar entre modos de inmersión total y superposición sobre el entorno mediante *passthrough* y *tracking* avanzado.

En esta tesis, la RA se emplea para situar reconstrucciones 3D sobre el entorno físico del sitio arqueológico (o entornos análogos), priorizando visualización contextual y accesible en dispositivos móviles.

Hitos históricos en el desarrollo de la realidad aumentada (RA)

La evolución de la RA combina avances conceptuales y tecnológicos que habilitaron su uso actual en dispositivos móviles. Una síntesis útil para este marco es la siguiente:[32]

- **1901.** L. Frank Baum anticipa, en ficción, unas “gafas” que superponen información sobre las personas.
- **1968.** Ivan Sutherland y Bob Sproull construyen la *Sword of Damocles*, uno de los primeros visores montados en cabeza (HMD) con gráficos superpuestos.
- **1990.** Thomas Caudell y David Mizell (Boeing) acuñan el término *Augmented Reality* al diseñar ayudas visuales para montaje industrial.
- **1992.** Louis Rosenberg desarrolla *Virtual Fixtures*, combinando superposiciones con tareas hápticas.
- **1998.** Aplicación temprana en NASA (X-38) con superposición informativa para operaciones.
- **2000.** Bruce Thomas lanza *ARQuake*, uno de los primeros juegos de RA con HMD y mochila de cómputo.
- **2016.** *Pokémon GO* populariza la RA móvil entre el público general.
- **2017–2018.** Despliegue de marcos de desarrollo *mobile* (Apple *ARKit* y Google *ARCore*), que estandarizan seguimiento y renderizado en iOS/Android, catalizando casos como *IKEA Place* y experiencias educativas.

Estos hitos explican el paso desde prototipos de laboratorio hacia ecosistemas móviles; en esta tesis, la disponibilidad de *toolkits* móviles es el fundamento práctico que permite integrar modelos arqueológicos en RA sobre dispositivos de amplio acceso.

Plataformas móviles: ARCore (Google) y ARKit (Apple)

En dispositivos móviles, dos marcos dominan el desarrollo de RA: **ARCore** (Android) y **ARKit** (iOS). Para desarrolladores, ambos son *frameworks* de seguimiento y renderizado que exponen capacidades de RA al sistema operativo y a los entornos de desarrollo; para usuarios, representan funciones nativas de sus teléfonos que habilitan experiencias de superposición en tiempo real [33].

Capacidades comunes (paridad funcional básica). En términos prácticos, ARCore y ARKit ofrecen un conjunto de funciones muy similar para experiencias ancladas en el entorno:

- *Seguimiento de pose y mapeo del entorno (VIO/SLAM).* Estiman en tiempo real la posición y orientación del dispositivo y construyen un mapa local del entorno inmediato, base para posicionar contenido estable en el espacio [33].
- *Detección de superficies planas y anclajes.* Identifican planos (horizontales/verticales) y permiten crear *anchors* para fijar objetos 3D con persistencia local.
- *Hit testing/raycasting.* Intersección de rayos con la geometría comprendida por el sistema para colocar o seleccionar objetos.

- *Estimación de luz.* Exponen intensidad y, según plataforma, características del entorno para adaptar la iluminación del contenido virtual al contexto real.
- *Seguimiento por imagen/objeto.* Permiten registrar imágenes de referencia (posters, marcas) u objetos escaneados para activar contenido cuando se detectan.
- *Comprensión de profundidad y oclusión.* Proveen APIs de profundidad/oclusiones que ayudan a integrar correctamente el orden visual entre objetos reales y virtuales.

Rasgos destacados por plataforma.

- *ARCore (Android).* Incluye APIs como Depth (oclusiones/colocación más precisa) y *Augmented Images/Faces*; su diseño favorece el despliegue amplio en terminales compatibles y la iteración con visores/web Android [34].
- *ARKit (iOS).* En dispositivos con *TrueDepth*/LiDAR, habilita *face tracking*, *people occlusion*, *scene reconstruction* (malla del entorno) y mejoras de *raycasting*/iluminación que elevan la fusión visual cuando el hardware lo permite [35].

Compatibilidad. ARKit está disponible desde iOS 11 (con funciones avanzadas condicionadas al hardware); ARCore soporta Android 7.0+ en una lista de dispositivos certificados. En ambos casos, la disponibilidad de funciones específicas depende del modelo y del sensor (cámara/IMU/LiDAR) [33], [34], [35].

Nota sobre el proyecto. La aplicación de esta tesis se desarrolló inicialmente para Android (ARCore). Con vistas a una futura portabilidad a iOS (ARKit), se priorizó el uso de capacidades con *paridad* entre plataformas (seguimiento de pose, planos, anclajes, estimación de luz e interacción básica), evitando depender de funciones exclusivas de hardware (p. ej., LiDAR/face tracking) que no son necesarias para los casos de uso en sitio arqueológico.

Formatos tridimensionales compatibles con realidad aumentada (OBJ, FBX, glTF, USDZ)

El formato de archivo determina la portabilidad, el rendimiento y la fidelidad visual de los modelos tridimensionales en aplicaciones de realidad aumentada. Entre la amplia variedad existente, cuatro estándares concentran la mayor compatibilidad en entornos móviles y web: OBJ, FBX, glTF/GLB y USDZ [36], [37].

OBJ (Wavefront Object). Es un formato neutro y ampliamente soportado por programas de modelado, impresión 3D y motores de visualización. Describe la geometría mediante vértices, normales, coordenadas UV y caras poligonales, acompañadas opcionalmente por un archivo *.mtl* que define materiales y texturas. Su estructura de texto plano y su independencia de software lo hacen ideal para el intercambio entre aplicaciones, aunque no incluye animaciones ni estructuras jerárquicas complejas.

FBX (Filmbox). Desarrollado por Autodesk, es un formato propietario orientado a flujos de trabajo de animación y videojuegos. Permite almacenar geometría, cámaras, luces, materiales, esqueletos y animaciones completas. Su fortaleza radica en la interoperabilidad entre software 3D (Blender, Maya, Unity, Unreal Engine), aunque su tamaño y naturaleza cerrada lo hacen menos eficiente para entornos móviles o web livianos.

glTF y GLB (GL Transmission Format). Creado por el *Khronos Group*, es un estándar abierto y gratuito optimizado para visualización en tiempo real y aplicaciones web (*WebAR*). glTF utiliza estructura JSON con recursos externos (texturas, binarios), mientras

que GLB encapsula todo en un único archivo binario. Ambos soportan animación, materiales PBR, compresión de texturas (KTX2/BasisU) y rápida carga, por lo que se consideran el “JPEG de los 3D” en RA moderna.

USDZ (Universal Scene Description Zip). Desarrollado por Pixar y Apple, es el formato nativo para RA en iOS y macOS (*Quick Look, RealityKit*). Basado en el estándar USD, agrupa geometría, materiales, luces y animaciones en un solo contenedor sin necesidad de descompresión. Su estructura binaria está altamente optimizada para dispositivos Apple, pero es un formato propietario y menos editable fuera de ese ecosistema.

Comparativa práctica. En Android y WebAR, glTF/GLB ofrece el mejor equilibrio entre compatibilidad, ligereza y fidelidad visual; en iOS, USDZ es obligatorio para RA nativa. Los formatos OBJ y FBX siguen siendo útiles para etapas de producción o conversión intermedia. Por tanto, un flujo de trabajo ideal para proyectos multiplataforma consiste en modelar y texturizar en .obj/.fbx y luego convertir los activos optimizados a .glb o .usdz, preservando mapas PBR y jerarquías de escena.

Pertinencia en este proyecto. Los modelos arqueológicos se exportaron en .obj/.mtl por su compatibilidad con Blender y su facilidad de conversión posterior a formatos de RA (glTF/USDZ). Este flujo asegura interoperabilidad entre plataformas Android, iOS y WebAR, alineado con la estrategia de accesibilidad y preservación digital del patrimonio cultural.

Aplicaciones educativas y museológicas de la RA

Ejemplos de aplicaciones de RA para patrimonio cultural y educación

La literatura reciente destaca casos que ilustran el potencial de la RA en museos y sitios patrimoniales, así como en contextos educativos móviles. A continuación se sintetizan ejemplos representativos, útiles para contextualizar el alcance de las experiencias diseñadas en esta tesis [38]:

- **Sorolla Museum AR (España).** Aplicación que superpone contenidos interpretativos sobre obras seleccionadas del Museo Sorolla. El visitante activa la cámara y, al alinear la obra, recibe explicaciones guiadas (personificación del autor, contexto histórico, técnica) y puede capturar fotografías aumentadas. Caso emblemático de mediación educativa con RA in situ [38].
- **Museo Sefardí (Toledo, España).** App con recorridos aumentados, audioguías, subtítulos, lengua de signos y un *recorrido táctil* para personas con discapacidad visual. Integra maquetas y objetos *tocables* descritos por audio y RA, ejemplificando accesibilidad e inclusión en patrimonio [38].
- **Museo del Louvre (Francia).** App oficial que centraliza información de colecciones, audio-tours y recorridos; complementariamente, experiencias de RA y asistentes conversacionales facilitan la orientación en sala, la exploración de obras maestras y la difusión a públicos remotos [38].
- **Louvre Chatbot.** Integración de *chat* con contenidos multimedia y relatos aumentados para presentar obras mediante historias guiadas y preguntas heurísticas; fortalece la interpretación del patrimonio y la participación del visitante [38].

Relevancia para este trabajo. Estos casos respaldan el uso de RA como herramienta para: (i) enriquecer la interpretación del patrimonio mediante superposiciones contextuales;

(ii) fomentar aprendizaje experiencial y autónomo; y (iii) mejorar accesibilidad e inclusión (audiodescripción, subtítulos, lengua de signos). La aplicación desarrollada en esta tesis adopta principios afines (anclajes en sitio, materiales PBR, modelos optimizados) con despliegue móvil (ARCore) y base exportable a iOS (ARKit).

Programas y declaraciones internacionales para la preservación y digitalización del patrimonio cultural

La preservación y digitalización del patrimonio cultural cuentan con respaldo en diversos instrumentos internacionales impulsados por la **UNESCO**, que buscan garantizar el acceso equitativo, la continuidad y la autenticidad del legado cultural en entornos digitales. Entre los más relevantes destacan:

- **Carta sobre la Preservación del Patrimonio Digital (UNESCO, 2003).** Adoptada por la Conferencia General, establece que los recursos de carácter cultural, educativo, científico o administrativo generados o convertidos a formato digital constituyen un nuevo tipo de patrimonio digno de protección. Reconoce el peligro de pérdida por obsolescencia tecnológica y urge a los Estados a elaborar políticas nacionales de preservación, fortalecer el depósito legal digital, promover el acceso equitativo y fomentar la cooperación internacional [11].
- **Programa Memoria del Mundo (UNESCO, 1992).** Busca garantizar la preservación del patrimonio documental de la humanidad y su acceso universal, fomentando la cooperación entre archivos, bibliotecas y museos. Este programa amplía hoy su alcance a contenidos digitales, promoviendo la digitalización de acervos, la normalización de metadatos y el acceso abierto [39].
- **Programa Información para Todos – IFAP (UNESCO, 2000).** Establece un marco internacional para el desarrollo de políticas de información, alfabetización digital y preservación del conocimiento. Promueve la creación de capacidades y la integración de estrategias de preservación digital en los sistemas nacionales de información y cultura [40].
- **Agenda 2030 y Objetivo de Desarrollo Sostenible 11.4.** Incluye entre sus metas fortalecer los esfuerzos para proteger y salvaguardar el patrimonio cultural y natural del mundo, integrando la preservación digital como componente transversal en la gestión sostenible de la cultura.

Relevancia para esta tesis. Estas declaraciones respaldan la digitalización y documentación 3D de sitios arqueológicos como parte de la preservación del patrimonio cultural. Al adherirse a los principios de la UNESCO, la tesis contribuye al objetivo de garantizar la continuidad del conocimiento, la accesibilidad pública y la reutilización académica de los modelos digitales generados.

Beneficios de la digitalización para la investigación, conservación y educación pública

La **digitalización** de contenidos culturales y educativos ofrece beneficios estratégicos que trascienden la mera conversión tecnológica: facilita la investigación, garantiza la conservación a largo plazo y democratiza el acceso al conocimiento. Diversas fuentes —como la UNESCO

y estudios recientes sobre educación digital— subrayan su valor en tres dimensiones clave [41], [42].

- **Investigación y conocimiento abierto.** La digitalización incrementa la disponibilidad de recursos para el análisis científico y el trabajo interdisciplinar. En el ámbito patrimonial, los modelos tridimensionales, bases de datos y archivos digitales permiten reproducir observaciones, compartir conjuntos de datos y realizar estudios comparativos sin depender del acceso físico a las piezas originales. Esto reduce el riesgo de manipulación de objetos frágiles y fomenta la colaboración internacional.
- **Conservación y acceso sostenible.** Digitalizar implica crear copias de seguridad y representaciones de alta fidelidad que mitigan los riesgos de pérdida o deterioro del patrimonio físico. Además, las estrategias de preservación digital permiten mantener la integridad y trazabilidad de los contenidos a largo plazo. En entornos museológicos o arqueológicos, estas copias digitales actúan como salvaguarda frente a catástrofes, obsolescencia o vandalismo, asegurando la continuidad de la memoria cultural.
- **Educación y divulgación pública.** La digitalización potencia la enseñanza activa y colaborativa, al integrar recursos interactivos, simulaciones y contenidos aumentados en los procesos formativos. Según la UNESCO, las tecnologías digitales “complementan, enriquecen y transforman la educación”, favoreciendo la inclusión y la resiliencia de los sistemas educativos. Estudios sobre digitalización educativa demuestran que esta facilita el aprendizaje a distancia, la personalización del ritmo académico y el acceso equitativo al conocimiento, además de mejorar la motivación y la comprensión mediante entornos visuales e inmersivos [41], [42].

Pertinencia para esta tesis. En el contexto del proyecto, la digitalización de modelos 3D y su integración en una aplicación de RA para Kaminaljuyú contribuyen simultáneamente a los tres ámbitos mencionados: sirven como material de investigación reproducible, como recurso de preservación digital y como herramienta educativa abierta al público. De esta manera, la RA se consolida no sólo como medio tecnológico, sino como estrategia de divulgación cultural alineada con los objetivos de acceso universal y aprendizaje sostenible promovidos por la UNESCO.

Comparación entre métodos tradicionales y experiencias inmersivas

La investigación reciente ha analizado comparativamente el impacto de los entornos inmersivos frente a los métodos tradicionales en la enseñanza y difusión del patrimonio cultural. Bekele y Champion (2019) identificaron que las tecnologías de realidad aumentada (RA), realidad virtual (RV) y realidad mixta (RMx) mejoran el aprendizaje cultural al generar una relación contextual entre el usuario, el entorno real y los contenidos digitales.

El estudio evalúa tres factores clave para la eficacia educativa de estas experiencias: **relación contextual, colaboración y nivel de participación**. Los resultados muestran que la *Realidad Mixta* ofrece el equilibrio más alto entre los tres, permitiendo una interacción simbiótica entre elementos reales y virtuales, mientras que la RV logra mayor inmersión visual, pero menor conexión con el entorno físico. Por su parte, la RA facilita colaboración presencial y una mayor accesibilidad mediante dispositivos móviles, aunque con menor integración entre los dos mundos.

Asimismo, se compararon seis tipos de interfaces de interacción —tangibles, colaborativas, multimodales, basadas en sensores, en dispositivos e híbridas—, concluyendo que las

interfaces **colaborativas y multimodales** son las más efectivas para fomentar el aprendizaje cultural, al asemejar la interacción natural humana y distribuir la carga cognitiva entre varios usuarios.

Estos hallazgos sustentan el valor pedagógico de los entornos inmersivos frente a los métodos tradicionales, al permitir una mayor implicación sensorial, social y cognitiva en el proceso de aprendizaje cultural [43].

Las aplicaciones del modelado 3D abarcaron múltiples sectores, entre ellos el cine, los videojuegos, la arquitectura, el diseño industrial y, de forma creciente, la museología y la arqueología. En este último ámbito, los modelos tridimensionales facilitaron la reconstrucción de estructuras antiguas con precisión, favoreciendo su estudio y conservación, especialmente cuando los restos físicos estaban fragmentados, deteriorados o, como en Kaminaljuyú, ocultos bajo la urbanización contemporánea. Dichas reconstrucciones se integraron además en entornos de realidad aumentada, ofreciendo experiencias inmersivas independientes del estado físico del sitio.

La realidad aumentada (RA) se describió como una tecnología que permitió superponer elementos digitales —modelos tridimensionales, imágenes, textos o sonidos— sobre la percepción del mundo real en tiempo real. A diferencia de la realidad virtual, que construyó un entorno completamente simulado, la RA combinó el espacio físico con información digital interactiva, enriqueciendo la experiencia del usuario sin aislarlo de su contexto [44].

En el ámbito artístico-cultural, la RA abrió nuevas posibilidades para la presentación, interpretación y difusión del patrimonio. Museos y centros de interpretación la adoptaron como parte de sus estrategias museográficas, posibilitando el acceso a información ampliada sobre objetos culturales, la simulación de entornos históricos y la visualización de reconstrucciones virtuales de elementos desaparecidos o dañados. Estas aplicaciones fortalecieron la accesibilidad y la comprensión del contenido expuesto [44].

Desde la educación, la RA demostró ser una herramienta eficaz. Su incorporación en procesos de enseñanza-aprendizaje promovió la participación activa, el aprendizaje experiencial y la comprensión de conceptos complejos mediante la interacción directa con representaciones visuales y tridimensionales. Investigaciones recientes evidenciaron que la RA incrementó la motivación del estudiante, mejoró la retención del conocimiento y favoreció el aprendizaje significativo, especialmente en contextos donde los contenidos resultaron difíciles de representar de manera tradicional [8], [9]. Ambos conceptos, el modelado tridimensional y la realidad aumentada, constituyen los pilares teóricos del presente trabajo, orientado al desarrollo de modelos arqueológicos interactivos para la preservación y divulgación del sitio Kaminaljuyú.

7.1. Enfoque metodológico

La investigación respondió a un enfoque aplicado, con características proyectivas, descriptivas y cualitativas, orientado al desarrollo de modelos tridimensionales de estructuras arqueológicas del sitio Kaminaljuyú. El proyecto se desarrolló entre marzo y finales de octubre de 2025, utilizando una computadora personal con entorno de trabajo configurado específicamente para las tareas de modelado y documentación digital. El proyecto buscó representar digitalmente estos elementos mediante técnicas de modelado 3D, basadas en datos arqueológicos previamente verificados y validados por profesionales en el área, sin manipulación de variables cuantitativas. Se trató de una investigación enfocada en la reconstrucción visual y contextual de un sitio patrimonial con fines educativos, culturales y tecnológicos.

El desarrollo se realizó en un entorno interdisciplinario que integró conocimientos de arqueología, diseño digital y tecnologías de visualización. La planificación y el seguimiento de las actividades se gestionaron por medio de una plataforma digital colaborativa, la cual permitió asignar tareas semanales, validar avances y centralizar la documentación del proceso. El modelado de los montículos se basó en información técnica proporcionada por especialistas en arqueología, quienes entregaron croquis, medidas e imágenes de referencia que posibilitaron representar las estructuras con fidelidad.

Una vez recibida la información, se configuró el entorno de trabajo en el software de modelado Blender, donde se establecieron las escalas apropiadas y se organizaron carpetas por montículo. La construcción tridimensional de las estructuras se inició desde las bases y avanzó progresivamente hacia las secciones superiores. Se emplearon técnicas mixtas de modelado de caja, y se previó un ritmo de producción de aproximadamente un modelo por semana, ajustado a la complejidad de cada estructura y a la retroalimentación técnica y arqueológica recibida.

Las texturas y materiales utilizados en los modelos fueron seleccionados desde el repositorio de recursos digitales Poly Haven y se aplicaron bajo la supervisión del área de arqueología, garantizando coherencia visual y contextual con los materiales históricos originales, como el barro, la piedra y los techados vegetales. Se prestó especial atención a la correcta proyección UV, evitando estiramientos o errores de mapeo en las texturas aplica-

das. Cada modelo completado fue validado por especialistas arqueológicos, quienes emitieron observaciones sobre proporciones, formas y texturas. En función de estas observaciones, se realizaron los ajustes necesarios para asegurar la fidelidad de las representaciones.

Como parte del proceso de mejora técnica, se contó con la participación activa de la comunidad oficial de Blender. Se recibieron aportes y recomendaciones de expertos sobre aspectos específicos del modelado, tales como la correcta organización de la topología para optimizar su uso en entornos de realidad aumentada, la verificación de proporciones y escala dentro del espacio tridimensional, y la revisión del mapeo UV de las texturas para evitar artefactos visuales. Las observaciones obtenidas se aplicaron directamente a los modelos, lo que fortaleció la solidez técnica y la eficiencia de los archivos finales.

El modelado se realizó utilizando Blender versión 4.3.2, en un entorno macOS sobre una MacBook M1 Pro con 16 GB de memoria RAM. Los modelos fueron exportados en formatos `.obj` y `.mtl`, conservando su escala de trabajo en 1:1 dentro de Blender, lo que permitió mantener proporciones reales durante la integración en los entornos de realidad aumentada. Esta configuración facilitó la adaptación de los modelos a diferentes tamaños dentro del motor de RA sin alterar sus proporciones ni distorsionar la geometría. Las texturas principales se aplicaron a una resolución promedio de 4096x4096 píxeles, balanceando calidad visual y rendimiento para su uso en dispositivos móviles compatibles con ARCore.

El proceso de validación arqueológica se desarrolló en colaboración directa con el área de arqueología, la cual revisó cada modelo tras su finalización. Los criterios de aceptación se basaron en la correspondencia visual y dimensional con los croquis y medidas originales proporcionadas. Un modelo se consideró aceptable cuando las proporciones, formas y detalles coincidían con la documentación arqueológica de referencia. Las observaciones se registraron, y los ajustes derivados de dichas revisiones se aplicaron inmediatamente hasta cumplir con el estándar definido.

Los modelos finalizados fueron almacenados en un repositorio privado en GitHub, en formatos `.obj` y `.mtl`, preparados para su integración posterior. Los archivos fuente en formato `.blend` se conservaron localmente y estuvieron respaldados automáticamente en la nube mediante OneDrive, garantizando así la seguridad y la integridad del material original. Todo el proceso fue documentado gráficamente mediante capturas de pantalla y registros de validación, centralizados en Notion y WhatsApp.

Aunque la integración de los modelos tridimensionales en la aplicación de realidad aumentada no formó parte directa de las tareas del área de modelado, se tuvo prevista la participación en dicha fase. Esta colaboración permitió verificar el comportamiento de los modelos en el entorno digital, identificar posibles ajustes estructurales o visuales y asegurar la compatibilidad técnica con motores gráficos como ARCore.

El análisis de los modelos se llevó a cabo mediante un proceso de validación técnica y visual, sustentado en la retroalimentación de profesionales en arqueología, quienes evaluaron aspectos como proporción, escala y coherencia estética. Desde una perspectiva técnica, se revisó la topología, el mapeo de texturas y la compatibilidad con entornos digitales. Este análisis fue de tipo cualitativo, iterativo y no estadístico, dado que se orientó a la mejora continua de los modelos a través de observación crítica y ajuste progresivo.

Finalmente, se observaron consideraciones éticas relacionadas con la representación y difusión del patrimonio cultural. Este proyecto no implicó la recolección de datos personales ni el involucramiento de individuos o comunidades. Sin embargo, se asumió el compromiso de representar con precisión los elementos arqueológicos modelados, evitando distorsiones que pudieran inducir a errores históricos o técnicos. Se mantuvo una actitud de respeto hacia la memoria cultural del pueblo maya, utilizando las tecnologías digitales con fines educativos,

académicos y de conservación.

7.2. Etapas de desarrollo

7.2.1. Planificación y asignación de tareas

La gestión del proyecto se llevó a cabo a través de la plataforma Notion, en la cual el equipo responsable de la coordinación general asignó semanalmente las tareas correspondientes a cada fase del modelado. Cada semana se estableció la elaboración de un montículo específico, en función de la disponibilidad de los datos técnicos proporcionados por el área de arqueología. El avance de cada actividad quedó documentado en dicha plataforma, lo que permitió su trazabilidad y el control de entregas.

7.2.2. Recolección y análisis de información arqueológica

El equipo arqueológico especializado proporcionó las medidas, croquis e imágenes de referencia necesarios para modelar cada una de las estructuras seleccionadas. Esta información fue analizada e interpretada para ser adaptada al entorno digital, asegurando la fidelidad estructural y contextual de los modelos.

7.2.3. Configuración del entorno de trabajo en Blender

Se utilizó el software Blender, versión 4.3.2, como herramienta principal para el modelado tridimensional. Se crearon entornos de trabajo independientes para cada estructura, organizados en carpetas con nombres específicos por montículo. Se verificó la escala general del espacio tridimensional con base en los datos arqueológicos recibidos, garantizando la coherencia entre los modelos digitales y las dimensiones reales.

7.2.4. Modelado tridimensional de estructuras

El proceso de construcción de los modelos se inició desde las bases estructurales hasta los niveles superiores, respetando las proporciones y características definidas en los registros arqueológicos. El ritmo de trabajo estimado fue de un modelo por semana, dependiendo de la complejidad de cada montículo y con una semana adicional destinada a la retroalimentación obtenida tras cada revisión.

7.2.5. Aplicación de texturas

Las texturas fueron seleccionadas desde el repositorio libre Poly Haven (<https://polyhaven.com>), con el acompañamiento del equipo arqueológico para asegurar coherencia con los materiales originales utilizados históricamente (barro, piedra, techados vegetales, entre otros). Se revisó la correcta proyección de las texturas para evitar estiramientos o distorsiones, realizando los ajustes necesarios cuando fue requerido.

7.2.6. Validación arqueológica y ajustes

Cada modelo finalizado fue enviado al equipo especializado en arqueología para su revisión técnica y contextual. Las observaciones emitidas fueron documentadas y, en caso de ser necesario, se implementaron los ajustes técnicos correspondientes en el diseño tridimensional.

7.2.7. Asesoramiento técnico externo

Durante el desarrollo del proyecto, se previó la participación en la comunidad oficial de Blender, donde se consultaron dudas específicas relacionadas con herramientas o procesos técnicos de modelado. Estas interacciones permitieron optimizar el flujo de trabajo y mejorar la calidad de los modelos generados.

7.2.8. Evaluar la calidad y precisión del modelado 3d en su integración con la aplicación de realidad aumentada

Se llevó a cabo la evaluación de la integración de los modelos 3D en la aplicación de realidad aumentada, verificando su precisión, calidad visual y comportamiento interactivo, e incorporando la retroalimentación de usuarios especializados en arqueología y tecnología para garantizar su fidelidad y compatibilidad técnica.

7.2.9. Registro

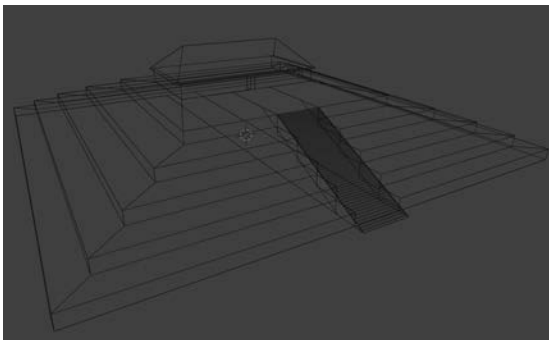
Durante todo el desarrollo se generó documentación gráfica mediante capturas de pantalla, así como versiones intermedias y finales de cada modelo compartidas por medio de WhatsApp. Las observaciones técnicas también fueron archivadas. Los archivos finales en formato .obj y .mtl fueron subidos a un repositorio privado en GitHub con fines de respaldo y distribución técnica. Los archivos fuente en formato .blend fueron almacenados localmente y respaldados de forma automática en la nube (OneDrive), evitando así pérdidas o ediciones no autorizadas.

8.1. Resultados

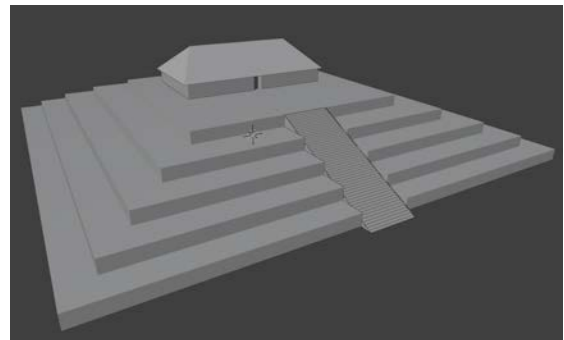
8.1.1. Montículo 3

Figura 1: Montículo 3, panel de vistas

(a) Vista en malla (wireframe)



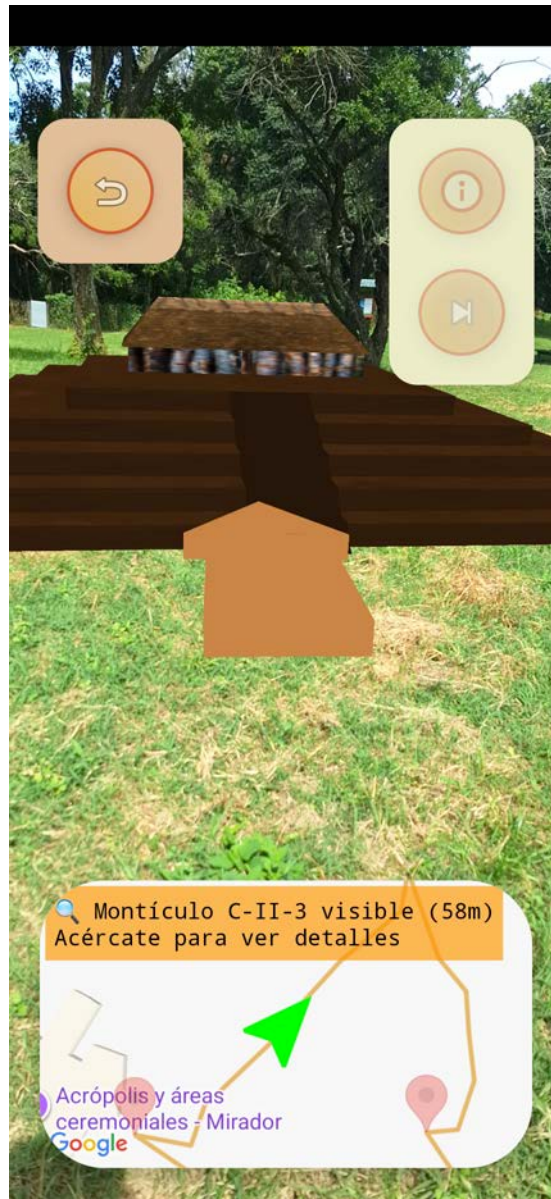
(b) Vista sólida sin texturas



(c) Vista con materiales/texturas



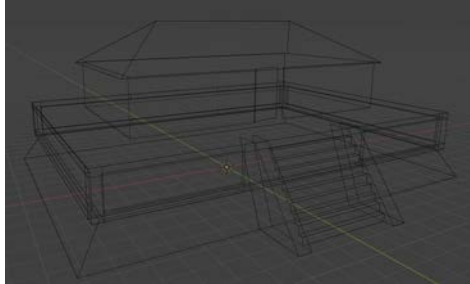
Figura 2: Montículo 3 visualizado en la aplicación de realidad aumentada, mostrando la reconstrucción superpuesta en el entorno real del parque arqueológico



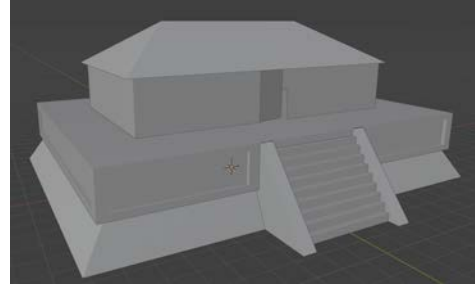
8.1.2. Montículo 7

Figura 3: Montículo 7, panel de vistas

(a) Vista en malla (wireframe)



(b) Vista sólida sin texturas



(c) Vista con materiales/texturas

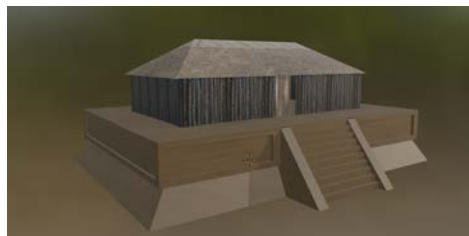
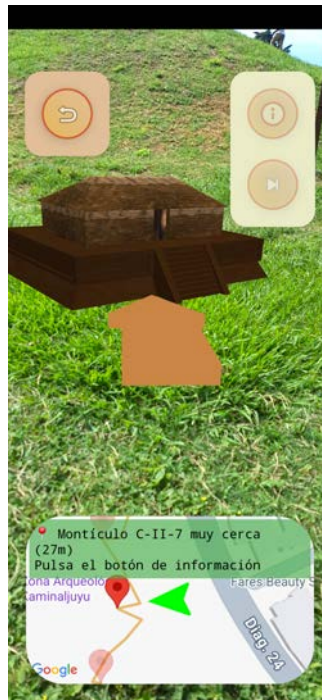


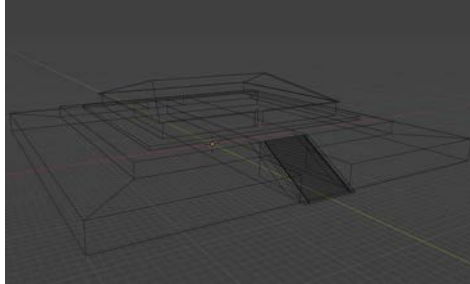
Figura 4: Montículo 7 visualizado en la aplicación de realidad aumentada, mostrando la reconstrucción superpuesta en el entorno real del parque arqueológico



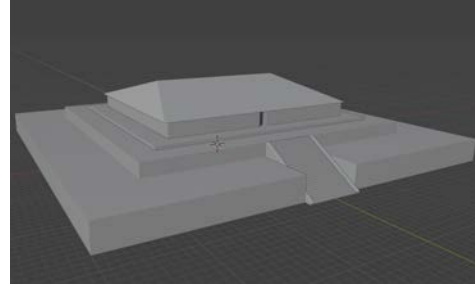
8.1.3. Montículo 12

Figura 5: Montículo 12, panel de vistas

(a) Vista en malla (wireframe)



(b) Vista sólida sin texturas



(c) Vista con materiales/texturas



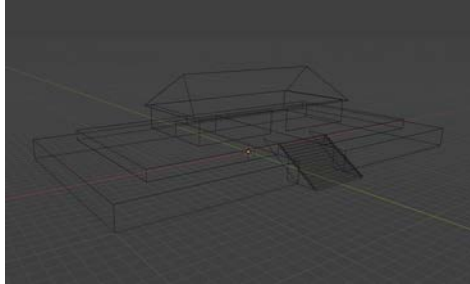
Figura 6: Montículo 12 visualizado en la aplicación de realidad aumentada, mostrando la reconstrucción superpuesta en el entorno real del parque arqueológico



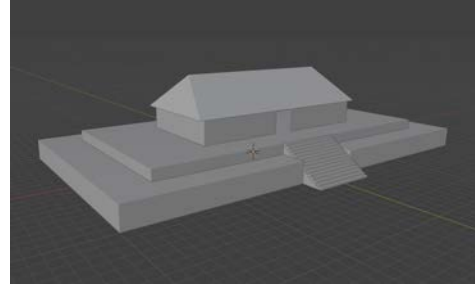
8.1.4. Montículo 13

Figura 7: Montículo 13, panel de vistas

(a) Vista en malla (wireframe)



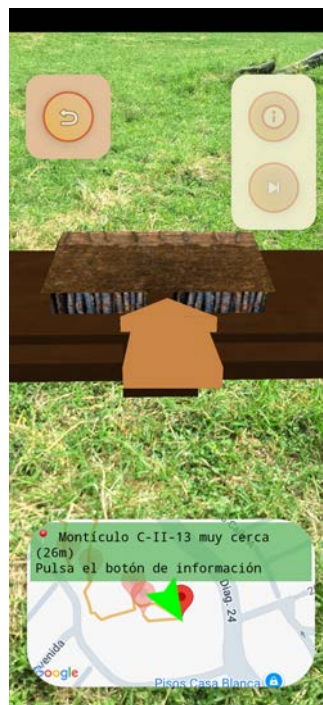
(b) Vista sólida sin texturas



(c) Vista con materiales/texturas



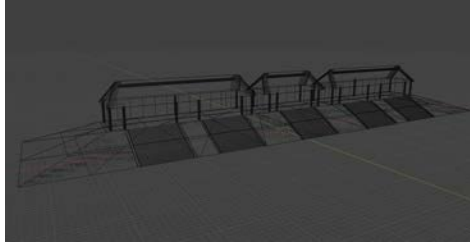
Figura 8: Montículo 13 visualizado en la aplicación de realidad aumentada, mostrando la reconstrucción superpuesta en el entorno real del parque arqueológico



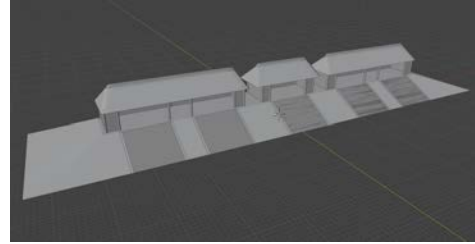
8.1.5. Montículo 14

Figura 9: Montículo 14, panel de vistas

(a) Vista en malla (wireframe)



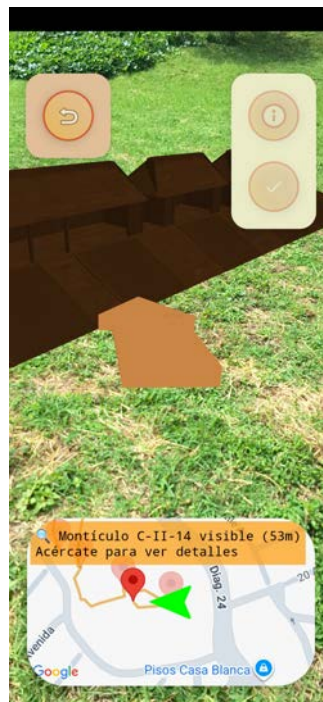
(b) Vista sólida sin texturas



(c) Vista con materiales/texturas



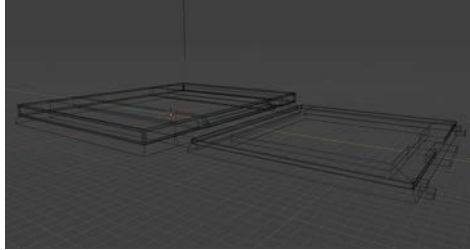
Figura 10: Montículo 14 visualizado en la aplicación de realidad aumentada, mostrando la reconstrucción superpuesta en el entorno real del parque arqueológico



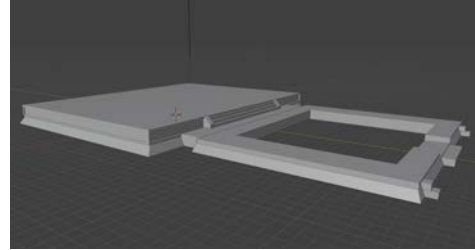
8.1.6. Montículo La Palangana

Figura 11: Montículo La Palangana, panel de vistas

(a) Vista en malla (wireframe)



(b) Vista sólida sin texturas



(c) Vista con materiales/texturas

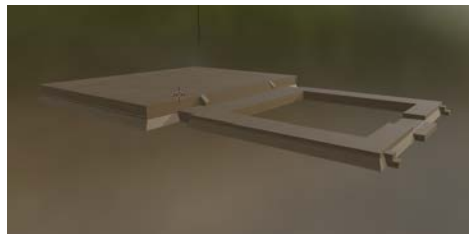
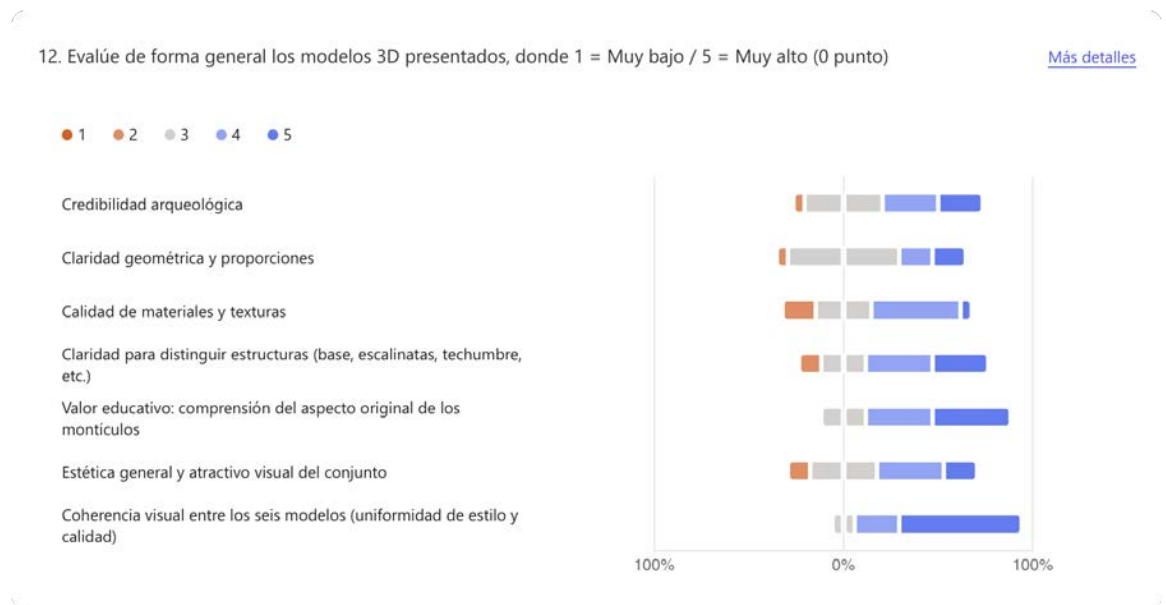


Figura 12: Montículo La Palangana visualizado en la aplicación de realidad aumentada, mostrando la reconstrucción superpuesta en el entorno real del parque arqueológico



8.1.7. Resultados de la encuesta

Figura 13: Resultados de la encuesta aplicada a los usuarios



Este capítulo discute el conjunto de modelos desarrollados (Montículos 3, 7, 12, 13, 14 y La Palangana), analizando el flujo de trabajo empleado y los resultados alcanzados en tres etapas: modelado geométrico, aplicación de materiales/texturas e integración prevista a un ambiente de realidad aumentada (RA). Se incluyen, además, consideraciones de validación arqueológica, rendimiento, limitaciones y líneas de trabajo futuro.

9.0.1. Modelado geométrico

Se completó el modelado tridimensional de los seis montículos propuestos siguiendo un procedimiento uniforme. El flujo por etapas (malla $\rightarrow$ sólido $\rightarrow$ texturizado) permitió validar progresivamente la calidad del resultado:

- **Geometría base (Wireframe).** Esta vista facilitó la inspección de proporciones, alineación de escalones, continuidad de taludes y simetrías. Fue útil para detectar y corregir aristas/caras innecesarias, evitar geometría y asegurar una topología limpia.
- **Volumetría (sólido).** La visualización sin materiales aisló la forma general de cada montículo y ayudó a comprobar la relación entre plataformas, escalinatas y superestructuras, así como la pendiente y los cambios de nivel.
- **Aplicación de materiales (texturizado).** En esta fase se verificó la correspondencia entre las texturas asignadas y los materiales originales documentados, cuidando la orientación y escala para obtener una representación realista.

9.0.2. Texturizado y materiales

La aplicación de materiales se orientó a reflejar acabados de barro, paja y maderas creíbles para Kaminaljuyú, manteniendo uniformidad visual entre modelos:

- **Criterios visuales.** Se priorizaron gamas de barro en superficies expuestas, y tonos rocosos para bordes o elementos constructivos, siguiendo recomendaciones del área de Arqueología.

- **UV y repetición.** Se cuidó el desplegado UV para minimizar estiramientos perceptibles y favorecer patrones repetibles sin artefactos notorios en planos amplios (plataformas y taludes).
- **Preparación para RA.** La cantidad de materiales se mantuvo acotada para reducir mallas, y las texturas pueden consolidarse y emplear compresión en la exportación.

9.0.3. Modelos en ambiente virtual (RA)

Los modelos tridimensionales fueron preparados para su integración en un entorno de realidad aumentada en Android, en el cual podrán visualizarse superpuestos al espacio físico. Para facilitar su uso, cada modelo se exportó en formato *.obj* con su correspondiente archivo *.mtl*, manteniendo materiales simples y compatibles con los motores gráficos empleados en la aplicación. Se cuidó la orientación en los ejes y la ubicación del origen en (0,0,0), de modo que los modelos puedan escalarse y posicionarse con facilidad dentro del entorno virtual. Asimismo, se verificó la coherencia de escala entre los seis montículos y la uniformidad del estilo visual, garantizando una correcta correspondencia espacial y visual al momento de su despliegue en RA. Se trabajó en conjunto para evaluar la implementación en la aplicación así validar la correcta colocación, escala y comportamiento de los montículos durante su integración en la experiencia de realidad aumentada, asegurando que los modelos respondieran adecuadamente dentro del entorno interactivo.

9.0.4. Validación arqueológica y coherencia entre modelos

El conjunto mantiene una lectura coherente con los rasgos registrados para Kaminaljuyú:

- **Forma escalonada.** Las proporciones de plataformas y la relación con la escalinata principal son consistentes entre montículos, respetando las variaciones particulares observadas en cada caso.

9.0.5. Comparación y síntesis del conjunto

En conjunto, los seis modelos mantienen una coherencia formal y visual que refleja adecuadamente las características arquitectónicas de Kaminaljuyú. Todos fueron elaborados mediante el mismo flujo de trabajo, lo que permitió conservar la proporción entre plataformas, taludes y escalinatas, así como una topología limpia y eficiente gracias a la eliminación de caras no visibles. El resultado evidencia que el pipeline es reproducible y puede aplicarse a futuros montículos o variantes sin comprometer la consistencia general.

En términos de balance entre fidelidad y rendimiento, la simplificación geométrica se mantuvo dentro de límites adecuados para conservar los rasgos constructivos esenciales, garantizando al mismo tiempo un desempeño óptimo para su uso en entornos de realidad aumentada. Asimismo, la uniformidad de materiales y texturas, con excepción del Montículo 14, que requirió ajustes particulares, favorece la lectura visual del conjunto como parte de un mismo sitio arqueológico.

Finalmente, la representación tridimensional obtenida contribuye a propósitos educativos y de divulgación, al ofrecer una forma accesible y visualmente coherente de aproximarse a cómo pudieron verse originalmente las estructuras, facilitando su comprensión por parte del público general y de visitantes en experiencias de realidad aumentada.

9.0.6. Limitaciones

- **Datos de partida.** Algunas suposiciones de materiales y acabado superficial son creíbles pero no definitivas, podrían refinarse con campañas de documentación adicionales.
- **Iluminación de referencia.** Las vistas de *viewport* no equivalen a un render físicamente basado, el aspecto puede variar con condiciones de iluminación realistas en RA.
- **Detalle fino.** Elementos menores (erosión, irregularidades, grietas) fueron simplificados para priorizar legibilidad y rendimiento.

9.0.7. Trabajo futuro

- **Afinar materiales PBR.** Incorporar mapas de normales y oclusión ambiental derivados de texturas reales o fotogrametría puntual para detalles finos.
- **Ampliación del corpus.** Extender el pipeline a otros montículos o variantes históricas y documentar discrepancias para análisis comparativo.

9.0.8. Parámetros técnicos y escala de los modelos

Todos los modelos se trabajaron en **escala 1:1** en Blender 4.3.2 y se exportaron en `.obj/.mtl`. En la aplicación de RA se aplicó una escala uniforme en tiempo de ejecución sin alterar proporciones, lo que permitió *acercar/alejar* manteniendo relaciones geométricas correctas. Las texturas principales se configuraron a **4096×4096 px** (*4K*); se limitó la cantidad de materiales por modelo y se preservó el UV mapping para asegurar consistencia visual. La aprobación de cada activo siguió el criterio definido con el área de Arqueología: *aceptable* cuando el volumen, las proporciones y los rasgos estructurales coincidían con croquis y medidas de referencia; los modelos no conformes se iteraron hasta cumplir el estándar.

9.0.9. Encuesta de percepción: resultados e interpretación (n=17)

Los ítems se evaluaron en una escala de 1 (muy bajo) a 5 (muy alto). A continuación se resumen los porcentajes y la interpretación por indicador, junto con el promedio aproximado ($\bar{x}$).

- **Credibilidad arqueológica** ($\bar{x} \approx 3.71$): 2 (5.9 %), 3 (41.2 %), 4 (29.4 %), 5 (23.5 %). *Lectura:* percepción moderada-alta de verosimilitud; la distribución sugiere que las formas y proporciones son creíbles para la mayoría, con margen para precisar detalles finos en ciertos modelos.
- **Claridad geométrica y proporciones** ($\bar{x} \approx 3.47$): 2 (5.9 %), 3 (58.8 %), 4 (17.6 %), 5 (17.6 %). *Lectura:* la geometría es entendible pero aún perfectible; se recomienda reforzar bordes, escalones y pendientes con referencias visuales adicionales.
- **Calidad de materiales y texturas** ($\bar{x} \approx 3.41$): 2 (17.6 %), 3 (29.4 %), 4 (47.1 %), 5 (5.9 %). *Lectura:* punto más débil relativo; conviene optimizar mapas y control de repetición/tiling para mejorar respuesta a iluminación variable en RA.

- **Claridad para distinguir estructuras** ($\bar{x} \approx 3.82$): 2 (11.8 %), 3 (23.5 %), 4 (35.3 %), 5 (29.4 %). *Lectura*: buena identificación de base, taludes y escalinatas; mantener la economía de materiales ayudó a la legibilidad.
- **Valor educativo** ($\bar{x} \approx 4.18$): 3 (23.5 %), 4 (35.3 %), 5 (41.2 %). *Lectura*: fortaleza clara; los usuarios reportan que la reconstrucción facilita comprender el aspecto original de los montículos.
- **Estética general y atractivo visual** ($\bar{x} \approx 3.59$): 2 (11.8 %), 3 (35.3 %), 4 (35.3 %), 5 (17.6 %). *Lectura*: percepción positiva con espacio para pulir materiales de ciertos casos.
- **Coherencia visual entre los seis modelos** ($\bar{x} \approx 4.53$): 3 (11.8 %), 4 (23.5 %), 5 (64.7 %). *Lectura*: mejor desempeño; el pipeline común aseguró uniformidad de estilo y calidad a nivel de conjunto.

9.0.10. Demografía y alcance de la muestra

Participaron **17 estudiantes** de **1.º a 5.º año**. Se trata de un público en formación con familiaridad tecnológica heterogénea; la validación experta estuvo cubierta en paralelo por la *revisión arqueológica* de los modelos. Como limitación, la encuesta no distingue formalmente especialistas de arqueología/tecnología; futuras iteraciones deberían segmentar por perfil y experiencia.

9.0.11. Alineación con los objetivos

- **Objetivo 1 (diseño de seis modelos)**. La alta *coherencia visual del conjunto* ($\bar{x} \approx 4.53$) y la *credibilidad arqueológica* moderada-alta ($\bar{x} \approx 3.71$) evidencian que el diseño fue consistente y verosímil respecto a las referencias.
- **Objetivo 2 (texturas y precisión visual)**. Los resultados de *materiales y texturas* ($\bar{x} \approx 3.41$) y *estética* ($\bar{x} \approx 3.59$) muestran aceptación positiva con mejoras enfocadas en PBR, tiling y respuesta a iluminación.
- **Objetivo 3 (evaluación en RA con retroalimentación)**. Los indicadores *claridad para distinguir estructuras* ($\bar{x} \approx 3.82$) y *valor educativo* ($\bar{x} \approx 4.18$) confirman utilidad formativa. La revisión del área de Arqueología aportó el componente experto del criterio de aceptación.

9.0.12. Implicaciones y acciones de mejora

De los hallazgos se desprenden acciones concretas: (i) consolidar *atlas de texturas* y normal/roughness calibrados para RA; (ii) añadir guías visuales ligeras (secciones o *overlays* de escala) para reforzar claridad geométrica; (iii) documentar por modelo el número de materiales/texturas y tamaño de archivos, y segmentar futuras encuestas por perfil de experiencia para medir impacto diferencial.

Los resultados de la encuesta aplicada reflejan una valoración positiva general de los modelos. Los indicadores con calificaciones más altas corresponden al **valor educativo**, la **coherencia visual del conjunto** y la **claridad geométrica**, lo que confirma que la representación digital logra comunicar con eficacia la forma y disposición original de las

estructuras. Los participantes destacaron la facilidad con la que podían distinguir elementos constructivos como las escalinatas y plataformas, lo cual se traduce en una buena legibilidad visual dentro del entorno aumentado.

En cuanto a la **credibilidad arqueológica**, la mayoría de los evaluadores otorgó puntuaciones altas. Señalaron que las proporciones y el estilo constructivo de los modelos resultan creíbles respecto a las referencias arqueológicas disponibles. Esto sugiere que la colaboración con el área de Arqueología fue fundamental para mantener la fidelidad formal sin sacrificar rendimiento ni claridad visual. Asimismo, la **coherencia de estilo y materiales** entre los seis montículos fue valorada como satisfactoria, lo que indica que el flujo de trabajo empleado garantizó uniformidad estética dentro del entorno virtual.

Si bien la evaluación general fue positiva, se identificaron oportunidades de mejora relacionadas principalmente con la optimización de la visualización bajo distintas condiciones de iluminación. En algunos casos, las texturas podrían beneficiarse del uso de materiales basados en propiedades físicas (PBR), que permitirían una mejor respuesta a la iluminación natural y aumentarían la sensación de realismo. No se registraron inconvenientes de escala ni de visualización significativa durante las pruebas, lo que confirma la estabilidad de los modelos en el entorno de RA implementado para dispositivos Android.

Durante las pruebas se observó que el Montículo 14 presentó dificultades para renderizar correctamente sus texturas dentro de la aplicación de realidad aumentada. Este comportamiento se atribuye al mayor número de materiales asignados y a la complejidad de su mapeo UV, lo que generó ligeras inconsistencias en la visualización. Aun así, el modelo mantuvo una forma geométrica estable y su legibilidad general no se vio comprometida, por lo que se considera una oportunidad de optimización en futuras versiones.

En términos de **valor educativo**, los resultados confirman que la aplicación logra su propósito principal: ofrecer una aproximación visual a cómo pudieron verse originalmente los montículos. La posibilidad de recorrer el parque y observar la reconstrucción tridimensional sobre el terreno incrementa la comprensión espacial del sitio y promueve un aprendizaje activo basado en la exploración. Este efecto educativo se potencia gracias a la precisión de los modelos, que sirven como un puente entre la evidencia arqueológica y la interpretación visual accesible para todo público.

En síntesis, la discusión evidencia que el trabajo de modelado y texturizado cumplió con los objetivos de fidelidad, coherencia y aplicabilidad en RA. Las calificaciones obtenidas en la encuesta respaldan la efectividad del pipeline empleado, tanto en términos de calidad técnica como de valor divulgativo. Los hallazgos sugieren que la combinación de modelado 3D y realidad aumentada constituye una herramienta eficaz para la preservación y comunicación del patrimonio arqueológico, siempre que se mantenga el equilibrio entre precisión científica y claridad visual para el usuario final. En conjunto, los resultados confirman el logro del objetivo general y de los tres objetivos específicos, validando el proceso metodológico implementado y consolidando la eficacia del modelado tridimensional y la realidad aumentada como herramientas de preservación digital y divulgación arqueológica.

10.1. Conclusiones

- Se desarrollaron seis modelos 3D correspondientes a los montículos seleccionados del sitio arqueológico Kaminaljuyú, logrando representar de forma precisa y coherente sus estructuras originales a partir de referencias arqueológicas. El proceso de modelado, realizado con Blender 4.3.2, demostró la viabilidad técnica de reconstruir digitalmente elementos del patrimonio arqueológico mediante herramientas de diseño tridimensional, contribuyendo a su documentación y preservación visual.
- La aplicación de materiales y texturas permitió mejorar la percepción visual de los modelos, destacando detalles estructurales y volumétricos. La coherencia entre topología, escala y acabados visuales fortaleció la experiencia inmersiva de los usuarios, garantizando resultados consistentes, replicables y adecuados para entornos de visualización tridimensional y realidad aumentada.
- Las pruebas de visualización e interacción en entornos de realidad aumentada confirmaron la funcionalidad de los modelos como herramienta educativa y de divulgación patrimonial. La retroalimentación obtenida de usuarios con experiencia en arqueología y tecnología evidenció la utilidad del proyecto para la interpretación del sitio en contexto, consolidando el potencial del modelado 3D y la RA como recursos de preservación digital y aprendizaje activo.

Recomendaciones

- Optimizar los materiales aplicados a los modelos tridimensionales mediante el uso de técnicas basadas en propiedades físicas (PBR), con el fin de mejorar la respuesta a distintas condiciones de iluminación y aumentar el realismo visual en entornos de realidad aumentada.
- Realizar pruebas de visualización directamente en el parque arqueológico Kaminaljuyú, para evaluar el comportamiento de los modelos en su contexto original y ajustar parámetros de escala, orientación y desempeño en campo.
- Replicar la metodología de modelado tridimensional en otros sitios arqueológicos de Guatemala, adaptándola a las condiciones particulares de cada entorno y con el acompañamiento de especialistas en arqueología, diseño digital y educación patrimonial.
- Incorporar estrategias de accesibilidad digital y recursos educativos complementarios que permitan a los usuarios interactuar con el patrimonio de forma inclusiva, fortaleciendo el vínculo entre la tecnología y la preservación cultural.

- [1] Artec 3D. “El Museo Británico (British Museum) captura en 3D su colección de relieves asirios.” Consultado el 20 de octubre de 2025. dirección: <https://www.artec3d.com/es/news/el-museo-britanico-british-museum-captura-en-3d-su-coleccion-de>.
- [2] Ministerio de Cultura y Deportes de Guatemala. “Impulsan digitalización de bienes culturales de Guatemala.” Consultado el 7 de noviembre de 2025. dirección: <https://noticias.mcd.gob.gt/2024/06/25/impulsan-digitalizacion-de-bienes-culturales-de-guatemala/>.
- [3] M. Skublewska-Paszkowska, M. Milosz, P. Powroznik y E. Lukasik, “3D technologies for intangible cultural heritage preservation—literature review for selected databases,” *Heritage Science*, vol. 10, n.º 1, pág. 3, 2022, Consultado el 28 de octubre de 2025. DOI: 10.1186/s40494-021-00633-x. dirección: <https://doi.org/10.1186/s40494-021-00633-x>.
- [4] Calbend Media. “La Importancia de la Tecnología 3D y los Recorridos Virtuales en la Educación.” Consultado el 30 de octubre de 2025. dirección: <https://calbendmedia.com/la-importancia-de-la-tecnologia-3d-y-los-recorridos-virtuales-en-la-educacion/>.
- [5] J. M. Izquierdo Pardo, M. E. Pardo Gómez y J. M. Izquierdo Lao, “Modelos digitales 3D en el proceso de enseñanza-aprendizaje de las ciencias médicas,” *MEDISAN*, vol. 24, n.º 5, págs. 1035-1048, 2020.
- [6] Hemeroteca PL. “Kaminaljuyú: el cerro de los muertos.” Consultado el 18 de agosto de 2025. dirección: <https://www.prensalibre.com/hemeroteca/kaminaljuyu-el-cerro-de-los-muertos/>.
- [7] Fundación Wiese. “El uso de la tecnología 3D en pro de la arqueología y el arte.” Consultado el 18 de agosto de 2025. dirección: <https://www.fundacionwiese.org/blog/es/uso-la-tecnologia-3d-pro-la-arqueologia-arte/>.
- [8] A. Barroso Constante. “Realidad aumentada en la educación: motivación y aprendizaje significativo.” Consultado el 18 de agosto de 2025. dirección: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8437275>.

- [9] A. B. Sevilla. “Realidad Aumentada en Educación.” Consultado el 18 de agosto de 2025. dirección: https://oa.upm.es/45985/1/Realidad_Aumentada_Educacion.pdf.
- [10] T. Handley. “Escáneres 3D revelan secretos de una momia egipcia de 3.000 años.” Consultado el 18 de agosto de 2025. dirección: <https://es.gizmodo.com/escaneres-3d-revelan-secretos-de-una-momia-egipcia-de-3-000-anos-2000133446>.
- [11] UNESCO, *Carta sobre la preservación del patrimonio digital*, Resolución de la Conferencia General GC Res 42, XXXII, Consultado el 7 de noviembre de 2025, 2003. dirección: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000122275>.
- [12] L. Teijeiro. “¿Qué es el modelado 3D y cuáles son sus aplicaciones?” Consultado el 18 de agosto de 2025. dirección: <https://www.tokioschool.com/formaciones/creacion-modelado-personajes-3d-videojuegos/que-es/>.
- [13] M. Macho Stadler, “¿Qué es la Topología?” *SIGMA*, n.º 20, págs. 63-77, 2002, Consultado el 7 de noviembre de 2025. dirección: <https://www.ehu.eus/~mtwmastm/sigma20.pdf>.
- [14] LinkedIn Contributors. “¿Cómo crear modelos 3D con una topología óptima?” Consultado el 7 de noviembre de 2025. dirección: <https://www.linkedin.com/advice/0/how-can-you-create-3d-models-optimal-topology-ceagc>.
- [15] Blender Online Community. “Normales — Blender 2.93 Manual (ES).” Consultado el 7 de noviembre de 2025. dirección: <https://docs.blender.org/manual/es/2.93/modeling/meshes/editing/mesh/normals.html>.
- [16] Blender Online Community. “Sombreado de la Vista — Blender 3.4 Manual (ES).” Consultado el 7 de noviembre de 2025. dirección: <https://docs.blender.org/manual/es/3.4/editors/3dview/display/shading.html>.
- [17] Blender Online Community. “Introducción al Editor UV — Blender 2.91 Manual (ES).” Consultado el 7 de noviembre de 2025. dirección: <https://docs.blender.org/manual/es/2.91/editors/uv/introduction.html>.
- [18] Adobe. “En qué consiste la representación basada en la física (PBR).” Consultado el 7 de noviembre de 2025. dirección: <https://www.adobe.com/gt/products/substance3d/discover/pbr.html>.
- [19] Autodesk. “What is retopology?” Consultado el 7 de noviembre de 2025. dirección: <https://www.autodesk.com/solutions/retopology>.
- [20] Google Developers. “Performance considerations | ARCore.” Consultado el 7 de noviembre de 2025. dirección: <https://developers.google.com/ar/develop/performance>.
- [21] Unity Technologies. “Optimizing draw calls.” Consultado el 7 de noviembre de 2025. dirección: <https://docs.unity3d.com/2022.3/Documentation/Manual/optimizing-draw-calls.html>.
- [22] Khronos Group. “glTF 2.0 Specification.” Consultado el 7 de noviembre de 2025. dirección: <https://registry.khronos.org/glTF/specs/2.0/glTF-2.0.html>.
- [23] Khronos Group. “Universal GPU Compressed Textures for glTF using KTX 2.0.” Consultado el 7 de noviembre de 2025. dirección: https://www.khronos.org/assets/uploads/apis/KTX-2.0-Launch-Overview-Apr21_.pdf.

- [24] Apple Developer Documentation. “Creating USD files for Apple devices.” Consultado el 7 de noviembre de 2025. dirección: <https://developer.apple.com/documentation/usd/creating-usd-files-for-apple-devices>.
- [25] Google Developers. “Using Scene Viewer to display interactive 3D models in AR.” Consultado el 7 de noviembre de 2025. dirección: <https://developers.google.com/ar/develop/scene-viewer>.
- [26] K. Mubanga. “¿Qué es la fotogrametría? Guía y fundamentos.” Consultado el 7 de noviembre de 2025. dirección: <https://www.artec3d.com/es/learning-center/what-is-photogrammetry>.
- [27] YellowScan. “LiDAR vs. Fotogrametría: Principales diferencias y aplicaciones.” Consultado el 7 de noviembre de 2025. dirección: <https://www.yellowscan.com/>.
- [28] Propeller Aero. “LiDAR vs. fotogrametría: ¿Qué es mejor para su lugar de trabajo?” Consultado el 7 de noviembre de 2025. dirección: <https://www.propelleraero.com/blog/drone-surveying-misconceptions-lidar-vs-photogrammetry/>.
- [29] BBC Mundo, Redacción. “Las impresionantes ruinas mayas descubiertas con una nueva tecnología láser en la jungla de Guatemala.” Consultado el 7 de noviembre de 2025. dirección: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-42918183>.
- [30] J. A. Pabón Cadavid, “Preservación del patrimonio cultural digital: retos y perspectivas para la escritura de la historia,” *Boletín de Historia y Antigüedades*, vol. 104, n.º 865, págs. 199-229, 2017, Consultado el 7 de noviembre de 2025. dirección: <https://www.researchgate.net/publication/353677462>.
- [31] Y. Fernández. “Diferencias entre realidad aumentada, realidad virtual y realidad mixta.” Consultado el 7 de noviembre de 2025. dirección: <https://www.xataka.com/basics/diferencias-entre-realidad-aumentada-realidad-virtual-y-realidad-mixta>.
- [32] P. J. Sáez Martínez. “El pasado, presente y futuro de la Realidad Aumentada.” Última modificación 22 de junio de 2021. Consultado el 7 de noviembre de 2025. dirección: <https://www.onirix.com/es/el-pasado-presente-y-futuro-de-la-realidad-aumentada/>.
- [33] P. J. Sáez Martínez. “ARKit vs ARCore: La realidad aumentada móvil de Apple y Google.” Última modificación 28 de marzo de 2023. Consultado el 7 de noviembre de 2025. dirección: <https://www.onirix.com/es/arkit-vs-arcore-realidad-aumentada-movil/>.
- [34] Google Developers. “ARCore overview.” Consultado el 7 de noviembre de 2025. dirección: <https://developers.google.com/ar/develop/>.
- [35] Apple Developer Documentation. “ARKit Overview.” Consultado el 7 de noviembre de 2025. dirección: <https://developer.apple.com/augmented-reality/arkit/>.
- [36] S. Schechter. “Essential Guide to 3D File Formats.” Publicado originalmente el 5 de mayo de 2020. Consultado el 7 de noviembre de 2025. dirección: <https://3dcloud.com/3d-file-formats/>.
- [37] Pixel Lab. “8 Best 3D File Formats You Should Use in 2025.” Consultado el 7 de noviembre de 2025. dirección: <https://www.thepixellab.net/8-best-3d-file-formats>.

- [38] V. Hernández Hernández y Z. S. López Collazo, “Aplicaciones móviles educativas para el Patrimonio Cultural,” *Revista Científica Pedagógica Horizonte Pedagógico*, vol. 10, n.º 1, enero-marzo, 2021, Recibido: 06/02/2021; Aceptado: 16/03/2021; Publicado: 19/03/2021. dirección: <https://horizontepedagogico.cu/index.php/hop/article/view/185/307>.
- [39] UNESCO, *Programa Memoria del Mundo*, Iniciativa internacional para la preservación del patrimonio documental, Consultado el 7 de noviembre de 2025, 1992. dirección: <https://www.unesco.org/en/memory-world>.
- [40] UNESCO, *Programa Información para Todos (IFAP)*, Marco internacional sobre políticas de información y preservación digital, Consultado el 7 de noviembre de 2025, 2000. dirección: <https://www.unesco.org/en/ifap>.
- [41] Redacción TICPymes. “Las ventajas de la digitalización en la educación.” Publicado originalmente el 18 de mayo de 2021. Consultado el 7 de noviembre de 2025. dirección: <https://www.channelpartner.es/ticpymes/las-ventajas-de-la-digitalizacion-en-la-educacion/>.
- [42] UNESCO. “Aprendizaje digital y transformación de la educación.” Consultado el 7 de noviembre de 2025. dirección: <https://www.unesco.org/es/digital-education>.
- [43] M. K. Bekele y E. Champion, “Comparación de realidades inmersivas y métodos de interacción: aprendizaje cultural en el patrimonio virtual,” *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 6, pág. 91, 2019, Consultado el 7 de noviembre de 2025. DOI: 10.3389/frobt.2019.00091. dirección: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7806021/>.
- [44] D. R. Torres, “El papel de la realidad aumentada en el ámbito artístico-cultural,” Consultado el 18 de agosto de 2025, Tesis doct., Universidad de La Rioja, 2013. dirección: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=58673>.

3D: Término que se refiere a representaciones tridimensionales, es decir, con ancho, alto y profundidad. 1, 6, 8, 9, 11, 12, 14, 18, 24, 25, 28, 41, 48

ambient occlusion: Técnica de sombreado que simula el oscurecimiento en áreas donde la luz ambiental es parcialmente bloqueada por la geometría circundante. 14, 48

ARCore: Plataforma de desarrollo de realidad aumentada creada por Google, que permite construir aplicaciones que integran elementos digitales en el mundo real. 9, 10, 11, 15, 26, 48

arista (edge): Segmento que conecta dos vértices en una malla 3D y define los límites de las caras. 12, 13, 14, 48

ARKit: Plataforma de desarrollo de realidad aumentada creada por Apple, que permite construir aplicaciones que integran elementos digitales en el mundo real en dispositivos iOS. 10, 48

atlas de texturas: Imagen única que agrupa varias texturas en un solo archivo, permitiendo reducir draw calls y optimizar el rendimiento en tiempo real. 10, 15, 48

cara (face): Superficie plana definida por tres o más vértices y aristas en una malla 3D. 12, 13, 14, 48

draw call: Instrucción enviada por la CPU a la GPU para dibujar un conjunto de geometría; un número elevado de draw calls puede afectar negativamente el rendimiento. 15, 48

Fresnel: Efecto óptico que describe cómo la reflectividad de una superficie varía según el ángulo de visión, importante en materiales realistas. 14, 48

frustum culling: Técnica que descarta objetos fuera del volumen visible de la cámara (frustum) para no procesarlos ni renderizarlos. 15, 48

glTF: Formato estándar de archivo para la transmisión y carga eficiente de modelos 3D y escenas, ampliamente utilizado en aplicaciones web y de RA. 9, 14, 15, 17, 18, 48

LOD: Acrónimo de Level of Detail; técnica que utiliza diferentes versiones de un modelo 3D, con menor o mayor cantidad de polígonos, según la distancia a la cámara para optimizar el rendimiento. 15, 48

malla: Estructura formada por vértices, aristas y caras que define la geometría de un objeto tridimensional. 12, 13, 14, 15, 48

metallic-roughness: Modelo de materiales PBR que utiliza mapas de metalicidad y rugosidad para definir el comportamiento reflectante y difuso de una superficie. 14, 15, 48

normales: Vectores perpendiculares a una superficie, asociados a vértices, caras o aristas, que determinan la orientación para el cálculo de iluminación y sombreado. 13, 14, 15, 48

occlusion culling: Técnica de optimización que evita renderizar objetos no visibles porque están ocultos tras otros objetos en la escena. 15, 48

PBR: Acrónimo de Physically Based Rendering, técnica de renderizado que simula el comportamiento físico de la luz para lograr representaciones más realistas de materiales y superficies. 9, 13, 14, 15, 18, 21, 22, 39, 41, 43, 48

pipeline: Conjunto de procesos y etapas secuenciales que se siguen para lograr un objetivo específico, como la creación de modelos 3D o el desarrollo de software. 38, 48

poligonaje: Cantidad y distribución de polígonos que conforman una malla 3D; afecta el nivel de detalle y el rendimiento en tiempo real. 10, 12, 14, 15, 48

RA: Acrónimo de Realidad Aumentada, tecnología que superpone elementos digitales en el entorno físico del usuario. 1, 4, 7, 48

retopología: Proceso de rehacer u optimizar la topología de una malla para mejorar su eficiencia, facilitar la animación, el texturizado y el renderizado en tiempo real. 14, 48

RV: Acrónimo de Realidad Virtual, tecnología que sumerge al usuario en un entorno digital completamente generado por computadora. 4, 48

shader: Programa ejecutado en la GPU que define cómo se procesan los vértices y píxeles para generar efectos visuales y materiales en gráficos 3D. 15, 48

texturizado: Proceso de aplicar imágenes o mapas (texturas) a la superficie de un modelo 3D para definir su apariencia visual. 12, 14, 48

topología: Estructura que define cómo los vértices, aristas y caras de una malla se conectan, determinando la continuidad y coherencia del modelo 3D. 12, 13, 14, 48

USDZ: Formato de archivo desarrollado por Apple basado en USD, optimizado para la visualización de modelos 3D en realidad aumentada en dispositivos iOS. 9, 14, 15, 17, 18, 48

UV mapping: Proceso de proyectar una malla 3D sobre un plano 2D para asociar coordenadas de textura (UV) a cada vértice o cara del modelo. 9, 13, 14, 15, 39, 48

vértice (vertex): Punto en el espacio 3D que constituye la unidad fundamental de una malla, donde se unen aristas. 12, 13, 14, 48

Wireframe: Representación visual de un modelo tridimensional utilizando líneas y aristas para mostrar su estructura básica sin superficies sólidas. 37, 48