



**Desarrollo de un recorrido virtual interactivo 3D para la Universidad de las Fuerzas
Armadas ESPE sede Santo Domingo, Bloque B.**

Galarza Jaramillo, John Fernando y Pantoja Chavez, Andres David

Departamento de Ciencias de la Computación

Carrera de Ingeniería en Tecnologías de la Información

Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero en Tecnologías de
la Información

Mgtr. López López, Andrea Margarita.

31 de julio de 2026

UIC Desarrollo de un recorrido virtual interactivo 3D para la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Santo Domingo, Bloque B

ID : c8a0254660b9a70e53bc309a7d48335363bdaab3



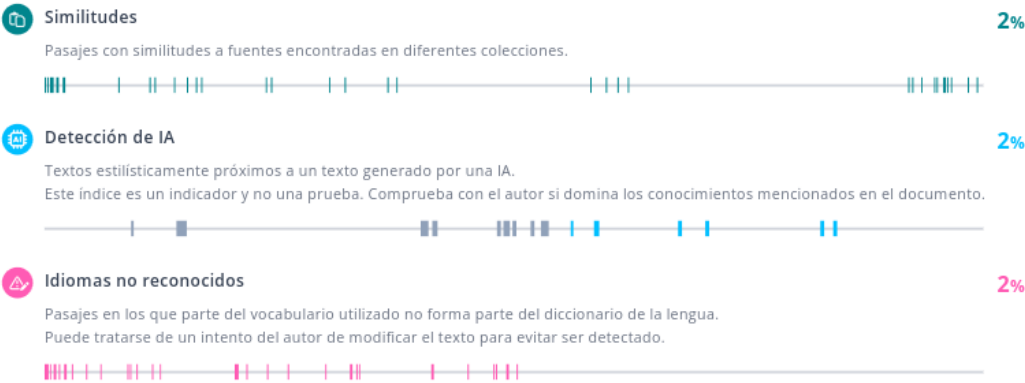
Nombre del fichero : UIC Desarrollo de un recorrido virtual interactivo 3D para la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Santo Domingo, BloqueB.txt	Depositante : ANDREA MARGARITA LOPEZ LOPEZ
Tamaño del archivo original : 33,06 MB	Fecha de depósito : 25 de agosto de 2026
Número de palabras : 24.158	Tipo de carga : interface
	fecha de fin de análisis : 25 de agosto de 2026

 Resumen (sección 1/2)

Localización de los textos sospechosos en el documento :



Incluido en el porcentaje de textos sospechosos :



No incluido en el porcentaje de textos sospechosos :



Mgtr. López López, Andrea Margarita
Directora



Departamento de Ciencias de la Computación

Carrera de Ingeniería en Tecnologías de la Información

Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular: **“Desarrollo de un recorrido virtual interactivo 3D para la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Santo Domingo, Bloque B.”** fue realizado por el/los señor/señores **Galarza Jaramillo John Fernando y Pantoja Chavez Andrés David**, el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE; habiéndose efectuado una revisión integral de forma y de fondo conforme a los lineamientos y formatos institucionales vigentes. Además, fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Santo Domingo, 31 de Julio de 2026

Mgtr. López López, Andrea Margarita

Directora

C.C.: 1600687733



Departamento de Ciencias de la Computación

Carrera de Ingeniería en Tecnologías de la Información

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **Galarza Jaramillo John Fernando y Pantoja Chavez Andrés David**, con cédula/cédulas de ciudadanía n° 0706157815 y n° 1206822023, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: **Desarrollo de un recorrido virtual interactivo 3D para la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Santo Domingo, Bloque B** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Santo Domingo, 31 de Julio de 2026

Galarza Jaramillo, John Fernando

C.C.: 0706157815

Pantoja Chavez, Andres David

C.C.: 1206822023



Departamento de Ciencias de la Computación

Carrera de Ingeniería en Tecnologías de la Información

Autorización de Publicación

Nosotros **Galarza Jaramillo, John Fernando y Pantoja Chavez, Andrés David**, con cédula/cédulas de ciudadanía n° 0706157815 y n° 1206822023, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: **Título: Desarrollo de un recorrido virtual interactivo 3D para la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Santo Domingo, Bloque B** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi/nuestra responsabilidad.

Santo Domingo, 31 de Julio de 2026

Galarza Jaramillo, John Fernando

C.C.: 0706157815

Pantoja Chavez, Andres David

C.C.: 1206822023

Dedicatoria

Le dedicamos todo este trabajo final a nuestros padres, familiares y parejas por todo el apoyo brindado en todos estos años en la Universidad, como siempre creyeron en nosotros en los momentos difíciles.

Pantoja Chavez, Andrés David,
Galarza Jaramillo, John Fernando

Agradecimiento

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a nuestra tutora, Mgtr. Andrea Lopez, por su confianza, enseñanzas y apoyo durante el desarrollo de nuestro proyecto de titulación. Esperamos que el trabajo realizado contribuya al propósito institucional que impulsa y represente un aporte favorable para la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Agradecemos de igual manera a todos nuestros profesores y compañeros que han coincidido en nuestra etapa en la universidad hemos aprendido mucho de ellos y han sido de ayuda para culminar nuestro camino en esta bella universidad.

Pantoja Chavez, Andrés David,
Galarza Jaramillo, John Fernando.

Índice de contenidos

Certificación.....	3
Responsabilidad de Autoría.....	4
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento.....	7
Resumen.....	14
Abstract.....	15
Capítulo I.....	16
Introducción.....	16
Planteamiento del problema.....	17
Formulación de la pregunta de investigación.....	19
Objetivos.....	19
Objetivo general:.....	19
Objetivos específicos:.....	19
Justificación.....	20
Capítulo II.....	21
Estado del arte.....	21
Tecnologías inmersivas en la difusión académica.....	21
Evolución del renderizado Web3D y selección de herramientas.....	22
Factibilidad y desempeño multiplataforma: Babylon.js vs. Three.js en entornos de hardware diverso.....	23
Estrategias de optimización de modelos tridimensionales.....	24
Evolución de usabilidad y rendimiento del software.....	25
Aporte de la investigación y cierre de brechas.....	26
Marco teórico.....	27
Fundamentos técnicos de gráfica 3D web.....	28
Motores de alto nivel: Babylon.js.....	29
Estrategias de optimización y rendimiento en el hardware heterogéneo.....	29
Posprocesado en tiempo real y calidad visual.....	30
Modelos de usabilidad e Interacción Humano-Computadora (IHC).....	30
IHC Y Carga Cognitiva.....	31
Accesibilidad WCAG en Web3D.....	31
Evaluación con SUS.....	32
Marco conceptual.....	33
Accesibilidad Web (WCAG).....	33

Babylon.js.....	34
Blender.....	34
Compresión DRACO.....	34
Descarte por Frustum (Frustum Culling).....	35
Gamificación.....	35
Interacción Humano-Computadora (IHC).....	35
Optimización gráfica.....	36
Recorrido virtual interactivo.....	36
Realidad Virtual.....	36
Usabilidad.....	36
Web3D.....	37
Capítulo III.....	37
Metodología.....	37
Enfoque de investigación.....	37
Análisis de requerimientos.....	38
Requerimientos Funcionales.....	39
Requerimientos no Funcionales.....	40
Requerimientos del Sistema.....	41
Arquitectura de Software.....	42
Arquitectura Física.....	44
Arquitectura Lógica.....	46
Metodología de desarrollo.....	48
Determinación de roles.....	49
Planificación del Product Backlog.....	50
Distribución propuesta de Sprints.....	52
Planificación de los Sprints y Criterios de Aceptación.....	55
Tipo y diseño de investigación.....	61
Capítulo IV.....	67
Análisis y discusión de los resultados.....	67
Resultados del Sprint 4.....	81
Procesamiento de fotografías 360°:.....	81
Funcionamiento en gafas VR:.....	82
Lógica de transición entre modelo 3D y fotografías 360°:.....	83
Configuración del almacenamiento en Cloudflare R2:.....	84
Integración de la red de entrega de contenido (CDN):.....	85
Resultados del Sprint 5.....	86
Configuración de flujos de trabajo (Workflows) en GitHub Actions:.....	86

Refactorización y modularización del código fuente:.....	87
Configuración inicial del soporte WebXR:.....	88
Adaptación de controles de navegación dentro del recorrido:.....	89
Resultados del Sprint 6.....	90
Ejecución de pruebas de rendimiento (Desktop):.....	90
Pruebas de compatibilidad responsive (Mobile):.....	90
Depuración y resolución de errores:.....	91
Redacción de la documentación técnica y manuales:.....	92
Resultados de encuesta para medir usabilidad.....	93
Resultados del cuestionario SUS.....	94
Puntuación Global de Usabilidad.....	95
Resultados de Pruebas de Accesibilidad.....	96
Análisis automatizado del DOM (WAVE).....	98
Pruebas de Rendimiento.....	99
Resultados de las pruebas de rendimiento (Bloque B).....	100
Análisis Técnico del Rendimiento.....	104
Capítulo V.....	107
Conclusiones.....	107
Recomendaciones.....	108
Referencias.....	110

Índice de tablas

Tabla 1 Requerimientos funcionales del recorrido virtual	40
Tabla 2 Requerimientos no funcionales del recorrido virtual	41
Tabla 3 Requerimientos del Sistema	42
Tabla 4 Determinación de roles del proyecto	50
Tabla 5 Product Backlog del recorrido virtual	51
Tabla 6 Distribución propuesta de los Sprint	53
Tabla 7 Planificación y criterios de aceptación del Sprint 1	56
Tabla 8 Planificación y criterios de aceptación del Sprint 2	57
Tabla 9 Planificación y criterios de aceptación del Sprint 3	58
Tabla 10 Planificación y criterios de aceptación del Sprint 4	59
Tabla 11 Planificación y criterios de aceptación del Sprint 5	60
Tabla 12 Planificación y criterios de aceptación del Sprint 6	61
Tabla 13 Diferencias en tiempo de carga y tamaño con comprensión Draco	72
Tabla 14 Descripción resumida de los ítems del cuestionario SUS	95
Tabla 15 Resumen de los resultados obtenidos mediante la evaluación global SUS	97
Tabla 16 Evaluación de accesibilidad del recorrido virtual con base en las pautas WCAG 2	98
Tabla 17 Comparativa de rendimiento del recorrido virtual del Bloque B en diferentes configuraciones de hardware	104

Índice de figuras

Figura 1 Arquitectura de Software del recorrido	44
Figura 2 Arquitectura Física del recorrido	46
Figura 3 Arquitectura lógica del recorrido	47
Figura 4 Repositorio del proyecto y configuración de ramas en GitHub.	67
Figura 5 Ejecución del entorno de desarrollo local mediante Docker.	68
Figura 6 Optimización de la malla y reducción de polígonos del Bloque B en Blender.	69
Figura 7 Nuevas y mejoras de zonas en el modelo GLB del Bloque B	70
Figura 8 Reducción en el tamaño del GLB	71
Figura 9 Inicialización de la escena base y motor de renderizado web con Babylon.js.	72
Figura 10 Validación del modelo arquitectónico exportado en formato GLB.	72
Figura 11 Renderizado del modelo arquitectónico GLB dentro de la aplicación web.	73
Figura 12 Configuración de la cámara y controles de navegación en el entorno 3D.	74
Figura 13 Implementación de mallas de colisión y límites físicos de navegación.	75
Figura 14 Modelo tridimensional masculino genérico usado como personaje	76
Figura 15 Diseño y maquetación de la interfaz gráfica de usuario principal.	76
Figura 16 Pantalla de carga vinculada al gestor de recursos de la aplicación.	77
Figura 17 Distribución espacial de marcadores interactivos en el modelo.	78
Figura 18 Panel multimedia emergente activado desde un punto de interés.	79
Figura 19 Diseño del plano bidimensional integrado como minimapa.	80
Figura 20 Sincronización en tiempo real del indicador de posición en el minimapa.	81
Figura 21 Procesamiento de imágenes esféricas equirectangulares capturadas con dron.	82
Figura 22 Funcionamiento de realidad inmersiva en celular y gafas de realidad virtual por medio de la extensión.	82
Figura 23 Interfaz y lógica de intercambio entre el entorno tridimensional y fotográfico.	84
Figura 24 Configuración del bucket de almacenamiento de objetos en Cloudflare R2.	85
Figura 25 Consumo asíncrono de recursos arquitectónicos a través de la CDN.	86
Figura 26 Configuración del pipeline de Integración Continua mediante YAML.	87
Figura 27 Estructura modular del código fuente del proyecto.	88

Figura 28	Habilitación del componente de acceso a la experiencia WebXR.	89
Figura 29	Sistema de teletransportación y navegación por medio del mapa.	89
Figura 30	Análisis de rendimiento y consumo de recursos en entorno de escritorio.	90
Figura 31	Validación responsiva y controles táctiles en entorno móvil.	91
Figura 32	Commits de depuración para la versión final del recorrido.	92
Figura 33	Documentación técnica y guía de despliegue del proyecto.	93
Figura 34	Valoración media de preguntas SUS	95
Figura 35	Resultados de la evaluación de accesibilidad (WAVE)	98
Figura 36	Evaluación del rendimiento de carga inicial mediante Google PageSpeed	99
Figura 37	Registro de FPS máquina 1	101
Figura 38	Consumo de memoria RAM en la Máquina 1	101
Figura 39	Registro de la utilización del procesador (CPU) en la Máquina 1	102
Figura 40	Registro del consumo de memoria gráfica (VRAM) en la Máquina 1	103
Figura 41	Panel de métricas generales del recorrido virtual	106
Figura 42	Análisis de interacción de los usuarios con el recorrido virtual	106

Resumen

El presente trabajo tiene como finalidad establecer un recorrido interactivo 3D del Bloque B de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Santo Domingo, utilizando Blender para el modelado tridimensional y Babylon.js como motor Web3D. Actualmente, la institución no cuenta con una herramienta digital interactiva que facilite la difusión estudiantil y sirva de promoción institucional, por lo que este proyecto surge para cubrir dicha necesidad. Se realizó con un método no experimental con alcance descriptivo y con enfoque mixto, pues utilizó instrumentos tanto cuantitativos como cualitativos. La ejecución del proceso se llevó a cabo siguiendo la metodología ágil Scrum, que se compone de 6 Sprints, lo cual permitió llevar a cabo la optimización de los modelos GLB, además de incluir aspectos como la navegación en primera persona, la utilización de puntos de información, la integración de fotografías 360°, el minimapa y la compatibilidad con WebXR. Los resultados técnicos mostraron un excelente rendimiento en el gráfico y una elevada eficiencia en la carga de los recursos mediante CDN, permitiendo un buen flujo del contenido multiplataforma, siendo la escala SUS, aplicada a 105 estudiantes, categorizada "Excelente" en usabilidad e informes de accesibilidad positivos, según las pautas WCAG, siendo excelentes. Se concluye que el sistema constituye una herramienta tecnológica innovadora, escalable y multiplataforma que fortalece la difusión institucional, mejorando la experiencia de aspirantes y visitantes mediante una exploración inmersiva, interactiva y accesible de cómo es realmente el bloque B de la sede.

Palabras clave: Web3D, Babylon.js, usabilidad, inmersivo, accesibilidad

Abstract

This project aims to create an interactive 3D tour of Block B at the ESPE Armed Forces University, Santo Domingo campus, using Blender for 3D modeling and Babylon.js as the Web3D engine. A non-experimental, descriptive, and mixed-methods approach was employed, utilizing both quantitative and qualitative instruments. The process was executed following the Scrum agile methodology, which consists of six sprints. This allowed for the optimization of the GLB models and the inclusion of features such as first-person navigation, information points, 360° photo integration, a mini-map, and WebXR compatibility. The technical results showed excellent graphic performance and high efficiency in resource loading via CDN, enabling smooth cross-platform content flow. The SUS scale, applied to 105 students, categorized usability as "Excellent," and accessibility reports were positive, according to WCAG guidelines. It is concluded that the system constitutes an innovative, scalable and multi-platform technological tool that strengthens institutional dissemination, improving the experience of applicants and visitors through an immersive, interactive and accessible exploration of what Block B of the headquarters is really like.

Keywords: Web3D, Babylon.js, usability, immersive, accessibility

Capítulo I

Introducción

Actualmente las instituciones educativas, buscan la incorporación de herramientas digitales interactivas que les ofrezcan el fortalecimiento de su presencia institucional y mejorar la experiencia de los usuarios al acceder a información sobre su infraestructura, servicios y oferta académica. En este contexto, la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE se ha consolidado como una institución de educación superior comprometida con la excelencia educativa, la innovación tecnológica, y la formación integral de sus estudiantes.

Esta tendencia responde a la innovación de tecnologías web y del modelado tridimensional ha impulsado el desarrollo de entornos virtuales interactivos con capacidad de ofrecer experiencias inmersivas y dinámicas. En este sentido, los recorridos virtuales 3D se han convertido en una alternativa innovadora para la presentación de espacios físicos, permitiendo a los usuarios interactuar de manera remota con estos espacios desde plataformas distintas y a través de interfaces intuitivas adaptadas y accesibles.

Actualmente, la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE en su sede Santo Domingo dispone de medios digitales de información que difunden sus actividades e infraestructura; sin embargo, estos recursos son limitados en cuanto interactividad y experiencia visual, puesto que, se presentan en formato de lecturas, imágenes y videos, lo que dificulta ofrecer a los aspirantes y público en general una experiencia abierta, inmersiva e interactiva que les permita conocer a detalle las instalaciones y los espacios académicos de la institución sin la necesidad de estar presentes en ella. Ante esta necesidad, surge la propuesta de desarrollar un recorrido virtual interactivo 3D enfocado en el Bloque B de la universidad, permitiendo ofrecer una experiencia más moderna e inmersiva.

Para dar respuesta a esta propuesta, en el presente trabajo se desarrolló un recorrido virtual interactivo 3D del Bloque B de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, sede Santo Domingo. Mediante el modelado 3D de la edificación a través de Blender y su integración en una aplicación Web desarrollada con Babylon.js incluyendo mecanismos de navegación interactiva, puntos de información, compatibilidad con distintos dispositivos y optimización del rendimiento para asegurar una experiencia que se mantuviera fluida. Finalmente, el sistema fue sometido a pruebas de funcionamiento, rendimiento, usabilidad, accesibilidad y compatibilidad; resultados los cuales permitieron evaluar la viabilidad del sistema como herramienta tecnológica innovadora para la difusión institucional, evidenciando una navegación estable, bajos requisitos de hardware y la posibilidad de ejecución tanto en equipos convencionales como en dispositivos de realidad virtual.

Planteamiento del problema

La Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Santo Domingo busca constantemente fortalecer sus mecanismos de difusión institucional con el objetivo de atraer nuevos estudiantes y mejorar la interacción con la comunidad educativa y el público en general. Actualmente, la universidad dispone de una página web institucional que proporciona información sobre carreras, instalaciones, noticias, etc; sin embargo, esta plataforma presenta una estructura principalmente informática y estática, limitando la experiencia interactiva de los usuarios al momento de conocer las instalaciones del campus universitario. Esta situación resulta más evidente al considerar que la sede Santo Domingo cuenta con un amplio campus de hasta unas 160 hectáreas, conformado por aulas, laboratorios especializados, áreas administrativas, espacios deportivos, zonas recreativas y otras instalaciones destinadas al desarrollo estudiantil, científico y académico, los cuales en una plataforma con limitación, y únicamente con videos, fotografías y descripciones textuales, no se puede llegar a apreciar el potencial que tienen.

A pesar de que la institución forma parte de actividades promocionales como ferias universitarias, casas abiertas y eventos académicos; estos medios no siempre logran generar el impacto esperado en futuros estudiantes, especialmente en aquellos que no pueden asistir presencialmente a las instalaciones de la universidad. Por ende, la falta de herramientas digitales inmersivas dificulta que los futuros aspirantes e interesados en conocer la universidad puedan realizar una exploración de la sede de manera dinámica e interactiva, pudiendo explorar los diferentes espacios académicos como laboratorios, áreas administrativas y zonas recreativas de la sede Santo Domingo.

Además, la información visual disponible actualmente se limita principalmente a fotografías y descripciones textuales, reduciendo la interacción sin permitir ofrecer una experiencia cercana a un recorrido presencial. Asimismo, si bien se cuenta con iniciativas tecnológicas previas en la sede relacionadas con recorridos virtuales en 3D, esas iniciativas no han tenido su implementación en una solución institucional integrada con la página web de la universidad, ni cuentan con un servicio público disponible de forma permanente. Por tal motivo, la institución sigue sin tener en su disponibilidad una herramienta interactiva accesible que permite recorrer virtualmente sus instalaciones y poder usar este tipo de tecnologías como soporte de promoción institucional.

Por lo tanto, el problema de investigación se centra en la limitada interactividad y accesibilidad de los medios digitales actuales utilizados por la ESPE sede Santo Domingo para la difusión de sus instalaciones, lo que reduce el interés y con ello, la capacidad de exploración virtual por parte de los futuros estudiantes y visitantes.

En respuesta a la problemática, se plantea desarrollar un recorrido virtual interactivo en 3D para el Bloque B de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Santo Domingo, que permita a los estudiantes, aspirantes y visitantes recorrer virtualmente las instalaciones mediante una aplicación web accesible e interactiva. La adopción de este proyecto en el portal

institucional contribuirá en una mejora en la experiencia de los usuarios, fortalecer la presencia digital de la institución y proporcionar un medio innovador de difusión de la infraestructura universitaria.

Formulación de la pregunta de investigación

- ¿Qué tecnologías web y herramientas de modelado 3D son más adecuadas para desarrollar un recorrido virtual interactivo del Bloque B de la universidad?
- ¿Cómo influye la optimización de los modelos 3D en el rendimiento y la velocidad de carga de la aplicación web interactiva?
- ¿Cuál es el nivel de aceptación y satisfacción de los usuarios al utilizar un recorrido virtual interactivo 3D para conocer las instalaciones universitarias?

Objetivos

Objetivo general:

Desarrollar un recorrido virtual interactivo en 3D del Bloque B de la ESPE Santo Domingo, usando herramientas web como Babylon.js y modelado tridimensional, para que los usuarios puedan recorrer las instalaciones desde cualquier lugar y conocer mejor sus espacios.

Objetivos específicos:

- Adaptar los espacios y objetos tridimensionales empleando Blender, para su integración en una aplicación web interactiva.
- Desarrollar el recorrido utilizando Babylon.js, para que los usuarios puedan explorar las instalaciones del Bloque B, moverse por el entorno e interactuar con los espacios en tiempo real.
- Evaluar el rendimiento, la usabilidad y la accesibilidad del recorrido virtual a través pruebas técnicas y funcionales, en el marco de su aplicación como herramienta de apoyo a la difusión institucional de la ESPE Santo Domingo.

Justificación

Actualmente, las instituciones de educación superior necesitan incorporar herramientas tecnológicas innovadoras para reforzar la presencia digital y ampliar los mecanismos de difusión de su oferta académica e infraestructura institucional. La Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Santo Domingo, a pesar de contar con los medios informativos digitales y participar en actividades de promoción académica, presenta limitaciones en cuanto a la interacción y experiencia visual que ofrece a futuros estudiantes y visitantes al dar a conocer sus instalaciones.

Este proyecto busca mejorar la forma en que la ESPE sede Santo Domingo presenta sus espacios. Con el recorrido virtual, aspirantes, estudiantes y público en general podrán conocer desde cualquier lugar las aulas, laboratorios, oficinas administrativas y zonas recreativas del campus, sin depender de una visita presencial al campus, así como reducir las limitaciones de tiempo y distancia. Una persona interesada en la universidad podrá revisar sus instalaciones desde un celular o una computadora, con una experiencia más inmersiva que una galería de fotos tradicional.

Desde el punto de vista técnico, el proyecto resulta viable debido a la disponibilidad de herramientas de software especializadas para el renderizado y modelado tridimensional, así como frameworks modernos que facilitan la integración de estos modelos de gráficos tridimensionales en aplicaciones web. Además, el recorrido virtual podrá ser escalable y adaptable para futuras ampliaciones hacia otras áreas de la universidad.

Finalmente, este proyecto busca ofrecer una herramienta tecnológica útil para que los usuarios recorran virtualmente el Bloque B de la sede y conozcan mejor sus espacios. Al mismo tiempo, puede apoyar la promoción institucional de la Universidad de las Fuerzas

Armadas ESPE sede Santo Domingo, mostrando sus instalaciones de una forma más visual, accesible y actual.

Capítulo II

Estado del arte

En la actualidad, la transformación digital de las instituciones de educación superior como herramienta de promoción, ha impulsado el interés para encontrar nuevas formas innovadoras para presentar su infraestructura y servicios, con la finalidad de generar marketing y captar el interés de nuevos estudiantes. En la presente sección se analiza la literatura científica y académica reciente (2020 - 2026) relacionada al desarrollo de los recorridos virtuales, tomando en cuenta la evaluación de corrientes tecnológicas actuales y estableciendo las bases metodológicas que justifican la implementación de un modelo tridimensional interactivo para el Bloque B de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, sede Santo Domingo.

Tecnologías inmersivas en la difusión académica

En la literatura investigada, se hace énfasis en el impacto positivo de los entornos virtuales tridimensionales y las tecnologías inmersivas como herramientas para la comunicación educativa, la interacción con usuarios y la representación de información en contextos científicos y académicos [1]. En la educación superior el marketing digital también se describe, como un componente estratégico para captar la atención de futuros aspirantes, fortalecer la reputación institucional y mejorar los resultados de captación [2], [3].

Estudios enfocados en el uso de tecnologías inmersivas demuestran que la realidad virtual en la web (WebVR) logra eliminar barreras geográficas y físicas a la hora de presentar la infraestructura, permitiendo a los usuarios una exploración detallada, interactiva y autónoma de

los espacios universitarios [4], ampliando el acceso a los usuarios remotos sin exigir presencia física en la institución, evitando límites de aforo y con menores costos logísticos [5], [6].

En el contexto institucional, la comunicación digital universitaria tiende a fortalecer la imagen institucional, la visibilidad y el vínculo con público como aspirantes, familiares, egresados y socios externos [3]. Además, el uso optimizado de plataformas digitales se asocia con mayor conocimiento público, interés y participación de potenciales estudiantes, incluso con incrementos observados en postulaciones en estudios regionales [7].

Según la literatura, a nivel regional existen varios casos de estudios universitarios enfocados en la implementación de recorridos virtuales. En Ecuador, la Universidad Tecnológica de Israel desarrolló un modelo 3D para que los usuarios conozcan sus instalaciones desde sus hogares con interacción digital del espacio y orientación realista [8]. En México, la Universidad Veracruzana implementó un recorrido virtual 3D del campus Poza Rica - Tuxpan para fortalecer la difusión de sus programas educativos y aumentar la demanda estudiantil [9]. En Colombia, la Universidad Popular del Cesar integró en su web institucional un recorrido tridimensional que permite ubicar salones, laboratorios y oficinas mediante visitas guiadas [10].

Evolución del renderizado Web3D y selección de herramientas

En la evolución del renderizado Web3D, la literatura señala que un cambio decisivo fue el paso de usar soluciones que dependen de complementos hacia soluciones completamente funcionales nativamente en el navegador, esto gracias a la consolidación de WebGL y de HTML5 como la base usada comúnmente para gráficos interactivos tridimensionales [11]. Este cambio tecnológico impactó en la publicación de contenido 3D en línea y también estimuló la aparición de múltiples motores y bibliotecas capaces de funcionar directamente en la web,

llegando a impactar diversas áreas como el turismo, arquitectura, educación y visualización inmersiva [11], [12].

Dentro de este ecosistema, se describe el uso directo de WebGL como técnicamente posible, pero no tan práctico cuando la escena incorpora numerosos componentes, por lo que bibliotecas de más alto nivel reducen la complejidad y hacen más rápido el desarrollo [11], [13]. Three.js suele presentarse como una capa de abstracción más flexible, puesto que cuenta con un amplio soporte de geometrías, así como materiales, luces, animación y control de cámara, además cuenta con documentación madura y una comunidad extensa [11], [13]. Babylon.js, por su parte, aparece caracterizado como un motor más orientado a aplicaciones Web3D complejas, con soporte integrado para físicas, animación y experiencias VR/AR, así como la madurez suficientes para ser usada en simulaciones interactivas de mayor exigencia [13].

La evidencia muestra que la elección del framework para desarrollar el entorno tridimensional no depende de su popularidad actual. Depende más bien del equilibrio entre la facilidad de desarrollo, la fidelidad visual, la carga computacional y el contexto de uso [15]. En trabajos centrados en el renderizado avanzado, por ejemplo, se eligió Three.js por su soporte para renderizado basado en la física y su popularidad entre los desarrolladores. Otros mencionan a Babylon.js como una alternativa madura para presentaciones 3D, demostraciones web y simulaciones arquitectónicas complejas [14], [16].

Factibilidad y desempeño multiplataforma: Babylon.js vs. Three.js en entornos de hardware diverso

En el desarrollo de recorridos virtuales 3D destinados a un amplio número de usuarios finales, uno de los principales desafíos consiste en garantizar la fluidez en equipos de escritorio y móviles, los cuales cuentan con distintos niveles de capacidad de procesamiento. Está bien documentado que Three.js y Babylon.js son motores de visualización 3D web maduros, sin

embargo en smartphones la fluidez depende mucho de la complejidad geométrica, de la estrategia de carga, del consumo de memoria y de la gestión de las llamadas de renderizado [14]. En este sentido, la herramienta Babylon.js se creó como un motor Web3D para contener funcionalidades que van más allá de una simple biblioteca gráfica modular [13]. Este cambio de enfoque es correcto en el caso que el recorrido deba permitir navegación libre, control de cámara, hotspots, animaciones, efectos de luces y hasta interacciones que pueden darse, por ejemplo, bajo físicas, XR o mini simulaciones de espacios universitarios.

La literatura sobre campus virtuales evidencia el uso de Babylon.js para integrar entornos tridimensionales modelados en Blender en aplicaciones web con una experiencia fluida de desplazamiento en primera persona, precisamente para representar el campus universitario navegable [15]. También, comparaciones metodológicas para aplicaciones de ingeniería proporcionan ventajas prácticas de Babylon.js como consola propia de depuración, GUI propia, compatibilidad con editores y flujos de exportación más completos desde Blender, 3ds Max, Maya y Cinema4D, lo cual da soporte a su elección cuando se busca un pipeline de desarrollo más controlado y mantenible.

Estrategias de optimización de modelos tridimensionales

La literatura señala que las limitaciones constantes del Web3D son el tamaño de los modelos, la latencia de la red y la reducida capacidad de cómputo de los navegadores, sobre todo, en dispositivos móviles o conexiones inestables [16], [17]. En este contexto, la viabilidad de un recorrido virtual depende de un trabajo previo de optimización, donde se incluya modelado, carga, renderizado, memoria y en la preparación de texturas [13].

En este sentido, técnicas como la reducción poligonal, la retopología o bien, el diseño topológico racional incrementan la eficiencia de renderizado de una forma directa, mientras que, los niveles de detalle (LOD, Levels of Detail) suavizan la complejidad del modelo en virtud

de una distancia de observación, y también, el coste computacional sin gran deterioro visual [18]. Asimismo, la optimización de texturas a partir de atlas e intercalaciones de texturas (texture baking) aligera la carga sobre la GPU, trasladando así, la parte de la información lumínica y superficial a recursos precalculados [18]. De manera complementaria, esta lógica así expuesta queda corroborada por análisis que indican la conveniencia de preparar conjuntamente geometría y con ello, texturas para poder soportar escenas web de gran rendimiento y buena calidad visual [19].

Sin embargo, la carga progresiva es considerada como una de las estrategias centrales. Por lo que, la evidencia en la literatura muestra que, cargar modelos completos de manera síncrona produce retardos considerables, o más bien, bloqueos temporales, del navegador, en tanto que, los esquemas asíncronos y bajo demanda permiten una mejor separación del tráfico y mejoran la interacción [16]. De hecho, en pruebas experimentales, separar los datos y hacerlo bajo demanda se tradujo en una reducción en la latencia de transmisión y renderizado de un 24.72% [16]; además, combinar un detalle multinivel con compresión de texturas, provocó una reducción de hasta el 70% en el volumen de datos, así como, una disminución en un 90% del tráfico repetido a raíz de la caché del cliente [17].

Evolución de usabilidad y rendimiento del software

La literatura especializada coincide en que la validación del recorrido virtual no debe basarse únicamente en indicadores de rendimiento gráfico, como la fluidez del aplicativo (FPS) o el consumo de recursos (GPU, CPU). Para obtener una evaluación integral, se recomienda además de las ya mencionadas métricas objetivas de desempeño con instrumentos de evaluación de experiencia de usuarios (User Experience, UX), permitiendo analizar tanto el comportamiento técnico del sistema como la percepción de los usuarios que interactúan en él [20]. Las dimensiones valoradas en mapas virtuales y exposiciones digitales son autenticidad,

interacción, navegación y aprendizaje, encontrándose que la navegación deficiente es la principal causa que deteriora la experiencia general [20].

En los estudios analizados se confirma que se puede hacer uso de varios instrumentos estandarizados para medir la usabilidad y la experiencia del usuario, entre los que destacan el System Usability Scale (SUS), la cual permite medir la facilidad de uso, aprendibilidad, eficiencia de navegación y percepción general del sistema. además de indicadores como FPS, tiempo de respuesta o precisión de navegación. Esta evaluación suele complementarse con métricas objetivas de desempeño, como los FPS, el tiempo de respuesta y el consumo de recursos, proporcionando una valoración complementaria tanto del funcionamiento técnico como la experiencia percibida por los usuarios [21], [22], [23].

Aporte de la investigación y cierre de brechas

Con respecto a la contribución de la investigación, la revisión de la literatura demuestra que existen experiencias universitarias similares que se relacionan con el desarrollo de recorridos virtuales 3D. Sin embargo, estas iniciativas han sido limitadas a su contexto local y existe una escasa adaptación de este tipo de soluciones a las necesidades específicas de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Santo Domingo. Se puede encontrar antecedentes de plataformas web para campus universitarios, que combinan interactividad, Building Information Modeling (BIM), gamificación, visualización tridimensional y recorridos virtuales, orientados a tener efectos positivos en ámbitos como la coordinación, el aprendizaje, y la interacción [24]. Sin embargo, también se indica que la adopción tecnológica en la educación superior depende de factores organizacionales, pedagógicos y tecnológicos propios de cada institución [25].

Con referencia a la evolución de los recorridos virtuales dentro de la institución, un antecedente directo para esta investigación corresponde al trabajo de titulación de Carvajal y

Castellano [26]. Los cuales como parte de la fase II del recorrido virtual de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Santo Domingo, llevaron a cabo un recorrido tecnológico en el cual inicialmente se centraron en el modelado del bloque B y el levantamiento de tomas aéreas, a partir de la biblioteca Three.js. Este trabajo antecedente constituyó el primer acercamiento al desarrollo de un recorrido virtual enfocado en el bloque B, estableciendo las base tecnológicas y metodológicas para llevar a cabo la digitalización de la infraestructura universitaria y evidenciando la factibilidad de emplear tecnologías web para la representación interactiva del campus.

Marco teórico

El sustento teórico de esta investigación se halla a partir de enfoques tanto científicos como tecnológicos y que continúan entre sí en lo que es el desarrollo de software interactivo. A continuación se presentan las teorías de aprendizaje/percepción aplicadas a entornos inmersivos, los principios de la computación gráfica orientada a la web, los modelos formales de interacción humano-computadora y los principios de la comunicación digital que dan soporte a la viabilidad y el funcionamiento del recorrido virtual interactivo para el Bloque B.

Teorías de percepción espacial y cognición ambiental en entornos inmersivos

La percepción espacial, la inmersión, la interacción y la presencia en los medios virtuales son dimensiones centrales a la hora de explicar la experiencia en los medios virtuales son dimensiones centrales a la hora de explicar la experiencia del usuario [27]. La presencia es entendida como la experiencia psicológica de “hallarse allí” y se incrementa en el momento que el entorno realiza una fusión coherente de inmersión e interacción [27], [28]. Las evidencias muestran que los entornos inmersivos transmiten la información espacial con mayor éxito que los medios tradicionales, así como que pueden mejorar la comprensión de configuraciones tridimensionales complejas [27], [29]. También se ha encontrado que la presencia está

asociada a una mayor implicación, satisfacción, memoria y rendimiento en tareas de cognición espacial [30].

Sin embargo, la literatura más reciente matiza que la presencia no depende exclusivamente de la tecnología avanzada. También tiene un papel las narrativas, las variables individuales, las variables contextuales socioculturales y la estructura intencional del usuario [28]. De la misma manera, el aumento de la carga cognitiva en los medios inmersivos se relaciona más con la ciberenfermedad que con la presencia espacial en sí misma [31]. Por lo que, para un recorrido virtual interactivo conviene mantener escalas arquitectónicas verosímiles, una navegación estable y una retroalimentación inmediata evitando latencias, aceleraciones visuales bruscas e inestabilidad de cámara [28], [31].

Fundamentos técnicos de gráfica 3D web

La infraestructura técnica que hace posible la realización del recorrido virtual se centra en la evolución de las interfaces de programación de aplicaciones (API) para gráficos en el navegador, destacando entre ellas el estándar fundamental WebGL (Web Graphics Library).

WebGL se consolidó como la API fundadora de la computación gráfica 3D para la web, porque permite el renderizado acelerado por hardware dentro del mismo navegador, siendo parte del ecosistema HTML5 aplicable a sistemas de escritorios o sistemas móviles [32]. Su base técnica de este se ejerce en la GPU para diversidad de preferencias de procesamiento, sombreadores de los vértices y fragmentos, buffers, texturas y una tubería de renderizado programable que es la encargada de la transformación geométrica, las luces y la salida final a la pantalla [32].

Motores de alto nivel: Babylon.js

Babylon.js y bibliotecas equivalentes se comportan como capas de abstracción sobre WebGL para la manipulación de cámaras, luces, materiales, animación e interacción en vez de programar línea a línea los detalles de bajo nivel [11]. Para aplicaciones científicas y escenas complejas Babylon.js une con facilidad soporte de WebGL y WebGPU con estrategias de optimización de su propio repertorio y la habilidad de construir escenas realistas e interactivas. El uso de motores de alto nivel es la respuesta a la situación práctica en la que programar en WebGL es cansado, con bibliotecas que permiten reducir el grado de dificultad y acelerar el desarrollo de entornos 3D web interactivos.

Estrategias de optimización y rendimiento en el hardware heterogéneo

Al aplicar recorridos virtuales sobre hardware heterogéneo, el hecho de que sean factibles o no se basa al menos de un único algoritmo y más de un esquema que combine simultáneamente el culling espacial, la reducción de traslados y las estrategias de carga bajo demanda. La literatura es unánime en la afirmación de que el culling, la carga bajo demanda y la minimización del trabajo CPU–GPU [33] son factores determinantes cuando la escena es grande o el cliente es móvil.

El frustum culling es la técnica que elimina las geometrías que están fuera del campo de visión y por tanto, permite disminuir el procesamiento innecesario [34]. Su aplicación se encuentra en motores WebGL actuales como una de las funcionalidades de los sistemas para escenas geoespaciales y grandes conjuntos de datos. La carga bajo demanda y la fragmentación de datos también permite disminuir latencias en dispositivos móviles [35].

El hecho de disminuir el trabajo entre CPU y GPU también sirve de guía para la consolidación de geometría, ya que los procedimientos que traspasan procesamiento a la GPU

o almacenan y vuelven a ejecutar comandos, evitan cuellos de botella por sincronización o latencia en CPU [36].

Posprocesado en tiempo real y calidad visual

El posproceso en tiempo real tiene como objetivo un mayor nivel de inmersión individual sin comprometer la tasa de cuadros, es decir, su justificación debe ser en sentido teórico logrando un equilibrio entre la fidelidad visual y coste computacional. Las evidencias disponibles actualmente reflejan motores web modernos que implementan primitivas optimizadas, iluminación escalable y procesos de renderizado adaptativo; los trabajos más recientes indican que la Web ha pasado de un modelo de renderizado de programación preprogramada a uno de los pipelines más programables y que mejor están utilizando la GPU [37].

En la Web, se necesitan efectos visuales que se ajusten a restricciones de cómputo, a restricciones de memoria y a restricciones de ancho de banda, en escenas grandes o clientes móviles. La aplicación de técnicas de mapeo tonal, de exposición, de contraste o de bloom se inscribe en el contexto teórico de la etapa de post procesado dado que se aplica sobre la imagen que ya ha sido renderizada para darle una mejor percepción y darle un mayor grado de realismo sin que por ello hubiera también alteraciones en la estructura geométrica de la escena. En un futuro, WebGPU extiende estas posibilidades al ofrecer un mayor control del pipeline, cómputo en GPU o cambios de estados con bastante menor coste, aunque WebGL sigue siendo en la actualidad la base más consolidada y extendida para los recorridos 3D en la web [38].

Modelos de usabilidad e Interacción Humano-Computadora (IHC)

Para la correcta sustentación teórica de un recorrido virtual 3D, se ordena la evidencia en tres ejes: IHC y carga cognitiva, accesibilidad WCAG aplicada a Web3D y evaluación

empírica por medio de SUS. En su conjunto, la literatura recaba que la IHC en entornos 3D ha de orientarse hacia el diseño de una interacción para la consecución de menor esfuerzo mental, emplear varias modalidades de interacción y contrastar la experiencias con métricas estandarizadas [39].

IHC Y Carga Cognitiva

La Interacción Humano-Computadora (IHC) estudia, diseña y evalúa sistemas interactivos para optimizar la comunicación entre las personas y computadoras, con base en la psicología cognitiva, el diseño y los factores humanos. En entornos virtuales de 3D, la carga cognitiva es una característica importante que también está relacionada con la experiencia de uso, pues la complejidad de navegación, orientación y manipulación del espacio produce una fuerte relación con la experiencia de uso [39].

Las interfaces 3D no siempre heredan las mismas reglas que el resto de las 2D, ya que los 3D incorporan dificultades como el campo visual, la orientación, la profundidad, la latencia. La evidencia experimental señala que ciertos diseños de 3D pueden superar a las 2D en relación a carga cognitiva sin perder desempeño pero el beneficio depende por tanto de la flotación de navegación y de evitar la locomoción innecesaria.

Accesibilidad WCAG en Web3D

Las WCAG del W3C forman el principal marco internacional sobre accesibilidad web agrupándolos en cuatro principios: perceptible, operable, comprensible y robusto. Si bien estas pautas fueron concebidas para garantizar la accesibilidad de contenidos web tradicionales, hay numerosos trabajos que demuestran que su aplicación en museos virtuales, sitios web complejos y en tecnologías Web3D sigue siendo válida y pertinente aunque con cuestiones prácticas de cómo integrar las tecnologías asistivas en la escena 3D [40].

El principio de perceptibilidad establece que la información y los componentes de la interfaz deben de presentarse de manera que puedan ser percibidos por todos los usuarios. Para ello, recomienda el uso de texto alternativo, un contraste adecuado y disponibilidad de contenido en diferentes formatos.

Operable hace referencia a la existencia de navegación que no solo sea dependiente del ratón y contemple el teclado y otros dispositivos de entrada o de apoyo.

Robusto hace referencia a que haya compatibilidad con el lector de pantallas o con otras tecnologías asistivas pero en Web3D esta persistencia a veces resulta limitada y complicada.

Evaluación con SUS

La Escala de Usabilidad del Sistema (System Usability Scale, SUS) es una herramienta corta y de uso extendido para determinar la usabilidad percibida de sistemas interactivos [41], llegando la literatura a describirla como una escala de 10 y respuestas de tipo Likert, que permite obtener una valoración global de la usabilidad y ha sido aplicada en sitios web, entornos inmersivos y prototipos accesibles.

En definitiva, la base teórica para modelos de la usabilidad y la IHC en recorridos virtuales tridimensionales de 3D favorece unos principios de diseño conformes a la carga cognitiva, unos criterios de accesibilidad multimodal WCAG y la declaración empírica mediante el SUS. La literatura apoya, para un recorrido virtual del Bloque B, la práctica de proporcionar navegación flexible, que sea perceptible y que pueda llegar a ser compatible con apoyos asistivos, y, después, la validación para corroborar si la usabilidad llega a los niveles, como mínimo, aceptables mediante SUS.

Teoría de la comunicación institucional y marketing digital educativo

Los entornos virtuales universitarios han dejado de ser únicamente herramientas de consulta para convertirse en recursos estratégicos de comunicación institucional y marketing digital educativo, al facilitar la difusión de la oferta académica, la infraestructura y los servicios de las instituciones de educación superior [42].

Diversos estudios destacan que los recorridos virtuales tridimensionales permiten fortalecer la presencia digital de las universidades al ofrecer experiencias inmersivas que incrementan el interés y la interacción de estudiantes potenciales y otros grupos de interés [43].

En este contexto, la implementación de un recorrido virtual 3D para el Bloque B de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, sede Santo Domingo, constituye una estrategia orientada a mejorar la presentación de su infraestructura y apoyar los procesos de difusión institucional mediante tecnologías inmersivas.

Marco conceptual

Con la finalidad de asegurar que la lectura de los componentes técnicos, metodológicos y arquitectónicos que integran la presente investigación, queden perfectamente explicados se desglosa el significado de los términos que aplican en la redacción del recorrido virtual interactivo del Bloque B.

Accesibilidad Web (WCAG)

La accesibilidad web se refiere a un conjunto de principios y recomendaciones que garantizan que todas las personas puedan utilizar los contenidos y aplicaciones que aparecen en la web. Este uso corresponde a las personas que pueden poseer dificultades visuales, auditivas, motrices o cognitivas. Las Web Content Accessibility Guidelines, conocidas como WCAG provienen del consorcio W3C. Son el estándar más destacado en todo el mundo para poder construir interfaces de usuario que sean utilizables por todo el mundo. Se estructuran a

partir de cuatro principios fundamentales: perceptible, operable, comprensible y robusto. Su aplicación favorece el desarrollo de aplicaciones web inclusivas y compatibles con tecnologías de asistencia [44].

Asequibilidad (*Affordance*)

La asequibilidad o *affordance* es propiedad de diseño y de interacción durante el uso de un entorno digital específico, que refuerza de forma inmediata las acciones que el usuario puede hacer a través de los objetos de la interfaz, o los elementos de la misma, sin necesitar de una instrucción previa. A partir de *affordances* cognitivos, físicas, sensoriales y funcionales para la asequibilidad en Interacción Humano-Computadora (IHC), se establece al usuario, indicando qué acciones realizar, en qué forma ejecutarlas y como percibir la interacción en el espacio tridimensional, tal cual como lo indican las *affordances* [45].

Babylon.js

Babylon.js es un motor gráfico, basado en JavaScript y de código abierto, sirve para desarrollar aplicaciones en tres dimensiones, y son ejecutadas directamente desde los navegadores mediante el uso de WebGL y WebGPU. Proporciona herramientas como renderizado en tiempo real, iluminación, animaciones, simulación de físicas, detección de colisiones, etcétera. Asimismo, soporta el uso de dispositivos de realidad aumentada y virtual mediante WebXR, siendo ampliamente utilizado para el desarrollo de experiencias inmersivas [46].

Blender

Blender es un software libre y de código abierto ampliamente utilizado en la creación de contenido tridimensional. Integra herramientas para modelado, esculpido, texturizado, animación, iluminación, simulación física y renderizado, además de soportar la exportación de

modelos en formatos compatibles con motores gráficos utilizados en aplicaciones Web3D como glb/glTF [47].

Compresión DRACO

DRACO es una tecnología de compresión diseñada por Google para reducir el tamaño de modelos tridimensionales y nubes de puntos. A través de algoritmos especiales disminuye drásticamente el peso de los archivos geométricos sin deteriorar la calidad visual percibible, lo que permite un mejor ahorro en el consumo de ancho de banda y una mejora en los tiempos de carga de las aplicaciones Web3D [48].

Descarte por Frustum (Frustum Culling)

El Frustum Culling es una técnica de optimización de gráficos que elimina objetos situados fuera del volumen de visión del ángulo de vista de la cámara. Borrando automáticamente los componentes que el usuario no puede ver, se reduce la carga computacional requerida para renderizar objetos y mejora el rendimiento de toda la aplicación [49].

Gamificación

La gamificación implica introducir componentes que se encuentran en la creación de videojuegos (recompensas, objetivos, feedback o avance) dentro de entornos que no son de juego, con el fin de aumentar la motivación, la implicación y la interacción de los usuarios. En espacios educativos se trata de una técnica empleada para fomentar el aprendizaje e impulsar la asociación con materiales digitales. [50].

Interacción Humano-Computadora (IHC)

La Interacción Humano-Computadora (IHC) es la disciplina que estudia el diseño, implementación y evaluación de sistemas interactivos considerando las capacidades cognitivas, perceptivas y físicas de las personas. Su propósito es desarrollar interfaces eficientes, comprensibles, accesibles y satisfactorias que permitan una comunicación efectiva entre los usuarios y los sistemas informáticos. [45].

Optimización gráfica

La optimización gráfica abarca todo un conjunto de técnicas enfocadas en disminuir la demanda de procesamiento durante el procesamiento de escenas tridimensionales sin dañar notablemente el nivel de calidad visual. Entre esas técnicas existe la reducción de geometría, la compresión del modelo, el descarte de objetos no visibles y la optimización de textura, lo cual contribuye a mejorar la eficiencia en los dispositivos con diferentes capacidades de hardware. [49].

Recorrido virtual interactivo

Un recorrido virtual interactivo consiste en una aplicación digital que permite representar y visitar un entorno físico a partir de escenarios tridimensionales navegables. A diferencia de una visualización estática, incorpora mecanismos de interacción que permiten al usuario desplazarse libremente, visualizar información contextual e interactuar con varios elementos del entorno, ofrecer la experiencia más cercana a la visita presencial [10].

Realidad Virtual

La Realidad Virtual (VR) es una tecnología que crea espacios digitales inmersivos a través de aparatos específicos, como gafas y mando. Su propósito es crear una impresión de

presencia dentro del escenario virtual, ofreciendo oportunidades de exploración, simulación y educación [50].

Usabilidad

La usabilidad es el ámbito que indica el grado al que un sistema puede ser utilizado con efectividad, eficiencia y satisfacción por usuarios determinados dentro de un contexto de uso definido. Constituye uno de los principales atributos de calidad de las interfaces interactivas y un criterio ampliamente utilizado para evaluar aplicaciones informáticas [51].

Web3D

Web3D hace referencia a un conjunto de tecnologías que hacen posible la visualización e interacción con escenarios tridimensionales directamente de los navegadores web sin requerir complementos adicionales. Estas aplicaciones aprovechan estándares de código abierto como WebGL y WebXR lo que permite ofrecer experiencias inmersivas compatibles en múltiples plataformas [52].

Capítulo III

Metodología

Enfoque de investigación

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque mixto, debido a que se orienta al desarrollo y evaluación de un recorrido virtual interactivo del Bloque B de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Santo Domingo. El enfoque cuantitativo permitió recopilar datos numéricos mediante pruebas técnicas, para verificar el correcto funcionamiento del producto desarrollado, este enfoque permite medir objetivamente indicadores relacionados con el rendimiento, tiempo de carga, la tasa de fotogramas por segundo (*FPS*), el consumo de

recursos y la percepción de los usuarios mediante la escala de *Sytem Usability Scale (SUS)*.

Los resultados obtenidos permitirán valorar el desempeño general del recorrido virtual.

El enfoque cualitativo se aplicó durante la etapa de levantamiento de requerimientos funcionales, mediante una entrevista de carácter informal realizada al Mgtr. Christian Coronel, Director de la carrera de Tecnologías de la Información, quien es uno de los principales interesados del proyecto, planteó la necesidad de mejorar y desarrollar una nueva versión del recorrido virtual incorporando nuevas tecnologías. Además, los requerimientos definidos se establecieron tomando como referencia las funcionalidades existentes en la primera versión del recorrido virtual del Bloque B desarrollada por Carvajal y Castellano [27], permitiendo establecer una base inicial para la evolución del sistema propuesto.

Análisis de requerimientos

Como primera etapa del desarrollo del recorrido virtual se realizó el levantamiento y análisis de los requerimientos necesarios para representar de forma virtual el Bloque B de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Santo Domingo. Para ello se efectuó la recopilación de información mediante fotografías de referencia de las áreas importantes que conforman el Bloque B, además de fotografías panorámicas de 360° obtenidas con un dron, permitiendo de esa manera identificar los espacios que formarían parte del recorrido y los elementos de interacción que debía incorporar la aplicación.

A partir de esta información, los requerimientos funcionales, no funcionales y técnicos del sistema se definieron mediante un proceso iterativo. Su origen principal se fundamenta en las sesiones de trabajo ejecutadas durante la fase de inicio o Sprint 0 de la metodología Scrum. En esta etapa, se establecieron reuniones estratégicas con el Product Owner (representante de los intereses institucionales) para definir los objetivos de negocio, priorizar las necesidades de orientación dentro del Bloque B y construir las historias de usuario iniciales.

Adicionalmente, para garantizar el rigor técnico del proyecto, estas necesidades operativas fueron analizadas y refinadas con base en la literatura revisada en el estado del arte. Las funcionalidades requeridas para la navegación tridimensional, la optimización de activos y las pautas de interacción espacial fueron parametrizadas tomando como referencia investigaciones previas y estándares metodológicos actuales para aplicaciones inmersivas. De esta convergencia entre los requerimientos del cliente (Sprint 0) y las mejores prácticas documentadas científicamente, se consolidó el Product Backlog, del cual se derivan los Sprints de desarrollo

Requerimientos Funcionales

Los requerimientos funcionales describen las principales funciones que debe ofrecer el recorrido virtual para proporcionar una experiencia de navegación interactiva, por ende, en la Tabla 1 se presentan las funcionalidades definidas durante la etapa de análisis, las cuales orientaron el desarrollo e integración de cada uno de los componentes del sistema.

Tabla 1

Requerimientos funcionales del recorrido virtual

Código	Requerimiento	Descripción
RF-001	Visualización del recorrido virtual	El sistema debe permitir recorrer virtualmente el Bloque B mediante un navegador web compatible con WebGL.
RF-002	Navegación tridimensional	El usuario debe desplazarse por los diferentes espacios utilizando controles intuitivos de navegación.
RF-003	Integración de modelos 3D	El sistema debe cargar e integrar modelos tridimensionales desarrollados en Blender en formato GLB.

RF-004	Puntos para visualizar imágenes reales 360	El recorrido debe permitir acceder a fotografías de tipo 360° en áreas específicas.
RF-005	Puntos interactivos para visualizar información importante	El recorrido debe tener en sus zonas más importantes puntos de información que alimenten el conocimiento de los usuarios.
RF-006	Mapa del bloque B de la sede para guiarse en el recorrido	El recorrido debe constar con un mapa donde se pueda visualizar toda la sede y los puntos de interés como 360 para poder saber en que parte de la universidad están ubicados realmente.
RF-007	Pantalla de carga	El sistema debe presentar una pantalla de carga con información del proceso mientras se descargan los recursos necesarios para iniciar el recorrido.
RF-008	Compatibilidad con realidad virtual	El recorrido debe permitir su utilización mediante dispositivos compatibles con WebXR y el modo estereoscópico disponible en dispositivos móviles.

Requerimientos no Funcionales

Los requerimientos no funcionales establecen las características de calidad que debe cumplir la aplicación para garantizar una experiencia satisfactoria de navegación, por lo cual en la Tabla 2 se describen los principales criterios de rendimiento, compatibilidad y mantenibilidad considerados durante el desarrollo del recorrido virtual.

Tabla 2*Requerimientos no funcionales del recorrido virtual*

Código	Requerimiento	Descripción
RNF-001	Compatibilidad multiplataforma	El sistema debe ejecutarse correctamente en navegadores compatibles con la tecnología de WebGL.
RNF-002	Tiempo de carga optimizado	La carga inicial debe completarse en menos de un minuto bajo conexiones lentas y entre 15 y 20 segundos en condiciones normales.
RNF-003	Rendimiento visual	El recorrido debe ejecutarse de manera fluida, manteniendo una tasa de fotogramas estable durante la navegación.
RNF-004	Usabilidad	La interfaz debe facilitar el aprendizaje y la interacción mediante controles intuitivos y elementos visuales comprensibles.
RNF-005	Accesibilidad	La aplicación web debe ser compatible con computadoras, dispositivos móviles y gafas de realidad virtual.
RNF-006	Escalabilidad	La arquitectura debe permitir incorporar nuevos bloques o áreas sin modificar la estructura principal del sistema.
RNF-007	Mantenibilidad	El código fuente debe estar organizado en módulos para facilitar futuras actualizaciones y correcciones.
RNF-008	Disponibilidad	El sistema debe permanecer disponible mediante un entorno de despliegue basado en contenedores Docker.

Requerimientos del Sistema

Los requerimientos del sistema corresponden a los recursos tecnológicos necesarios para el desarrollo, almacenamiento y despliegue del recorrido virtual interactivo, por lo cual en la Tabla 3 se presentan los requerimientos tecnológicos definidos para la implementación del proyecto.

Tabla 3*Requerimientos del Sistema*

Código	Requerimiento	Descripción
RS-001	Motor gráfico	Utilización de Babylon.js para el renderizado de modelos tridimensionales mediante WebGL.
RS-002	Modelado 3D	Empleo de Blender para el diseño, optimización y exportación de los modelos en formato GLB.
RS-003	Entorno de desarrollo	Uso de Bun y Vite para la administración de dependencias y compilación de la aplicación web.
RS-004	Almacenamiento de recursos	Los modelos GLB e imágenes panorámicas deben almacenarse en un bucket de Cloudflare R2 para optimizar los tiempos de descarga.
RS-005	Despliegue	La aplicación debe ejecutarse en un servidor mediante contenedores Docker.
RS-006	Control de versiones	El código fuente debe mantenerse en un repositorio GitHub para garantizar el seguimiento de cambios.
RS-007	Integración continua	El despliegue del sistema debe automatizarse mediante GitHub Actions.
RS-008	Requisitos del cliente	El usuario debe disponer de un navegador compatible con WebGL, conexión a Internet y un dispositivo que permita la ejecución del recorrido virtual.

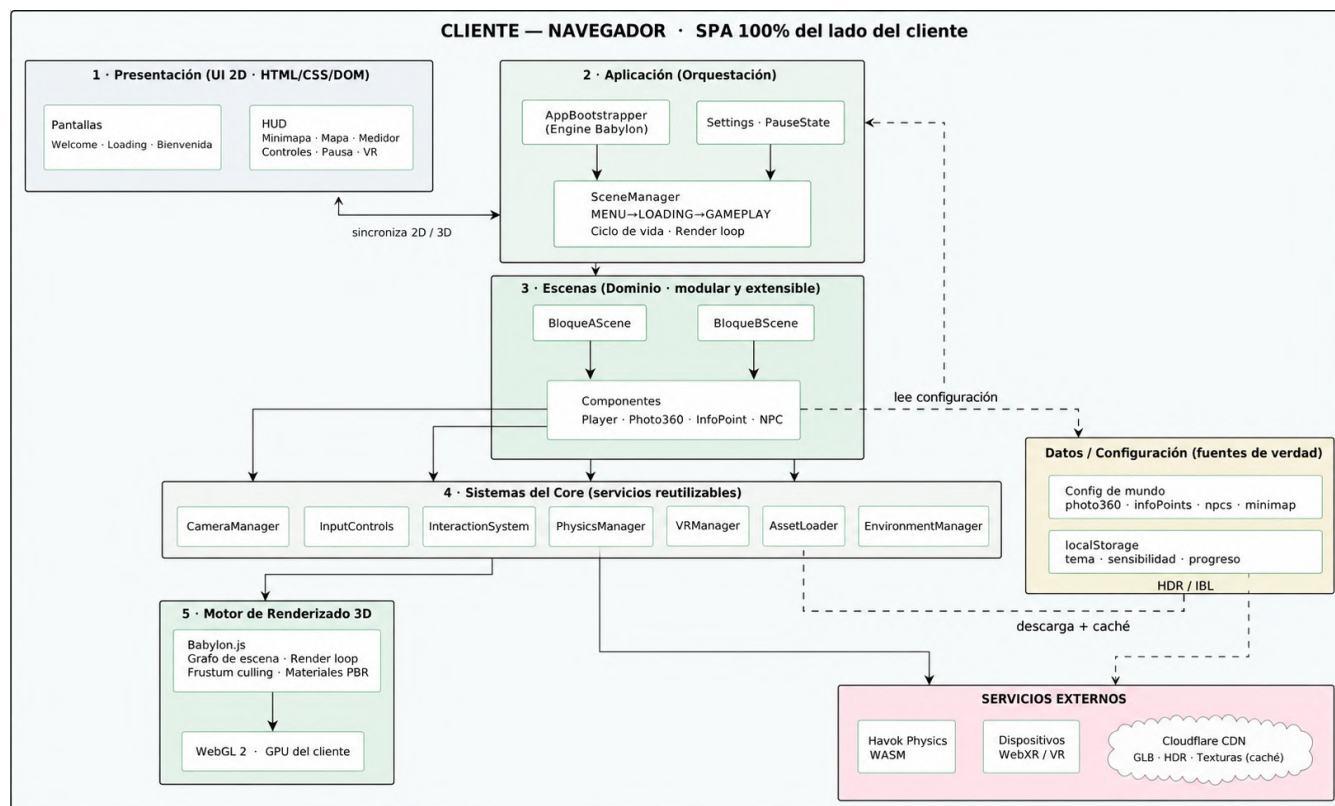
Arquitectura de Software

La arquitectura de software usada en este proyecto ocupa un modelo de Aplicación Web de página única (SPA) la cuál está orientada al cliente y está diseñada para ofrecer una experiencia inmersiva y de alto rendimiento. El núcleo del sistema está creado a partir del framework Babylon.js el cuál actúa como el motor de renderizado de todo el recorrido el cual se va a realizar del lado del cliente con los componentes que tenga el usuario en su computador este framework también se encarga del ciclo de vida de toda la escena 3D y cómo usamos técnicas de renderizado como solo renderizar lo que el usuario está observando para mayor

fluidez y rendimiento solo el Babylon.js se encarga de hacer uso los modelos GLB que estaremos descargando desde el CDN cloudflare el cuál nos va a ayudar mucho para la velocidad de descarga ya que sirve de intermediario entre el servidor y el cliente donde una vez el cliente cargue el modelo GLB de alguno de los bloques este quedará guardado en caché lo cual hace que la descarga del modelo sea mucho más rápida. Para garantizar la escalabilidad (RNF-006) y desacoplamiento de los componentes se ha realizado una estructura modular donde toda la lógica de la interfaz también conocida como UI y la lógica de renderizado 3D operan de manera independiente garantizando una correcta sincronización logrando un perfecto balance con las tecnología 3D y 2D de la web.

Esta arquitectura permite la implementación de nuevas zonas ya sean bloques, un área nueva en un bloque en específico, nuevos puntos de interés, puntos 360, etc, sin afectar al núcleo principal del recorrido y esto se logró gracias a estructura modular empleada desde el principio y que el core de nuestro recorrido está realizado con las mejores prácticas de programación adaptadas a la tecnología 3D, como se observa en la Figura 1. La arquitectura de software indica cómo está conformado todo el sistema y cómo interactúan los diferentes componentes del frontend con los respectivos servicios que se ofrece de lado del servidor.

Figura 1

Arquitectura de Software del recorrido**Arquitectura Física**

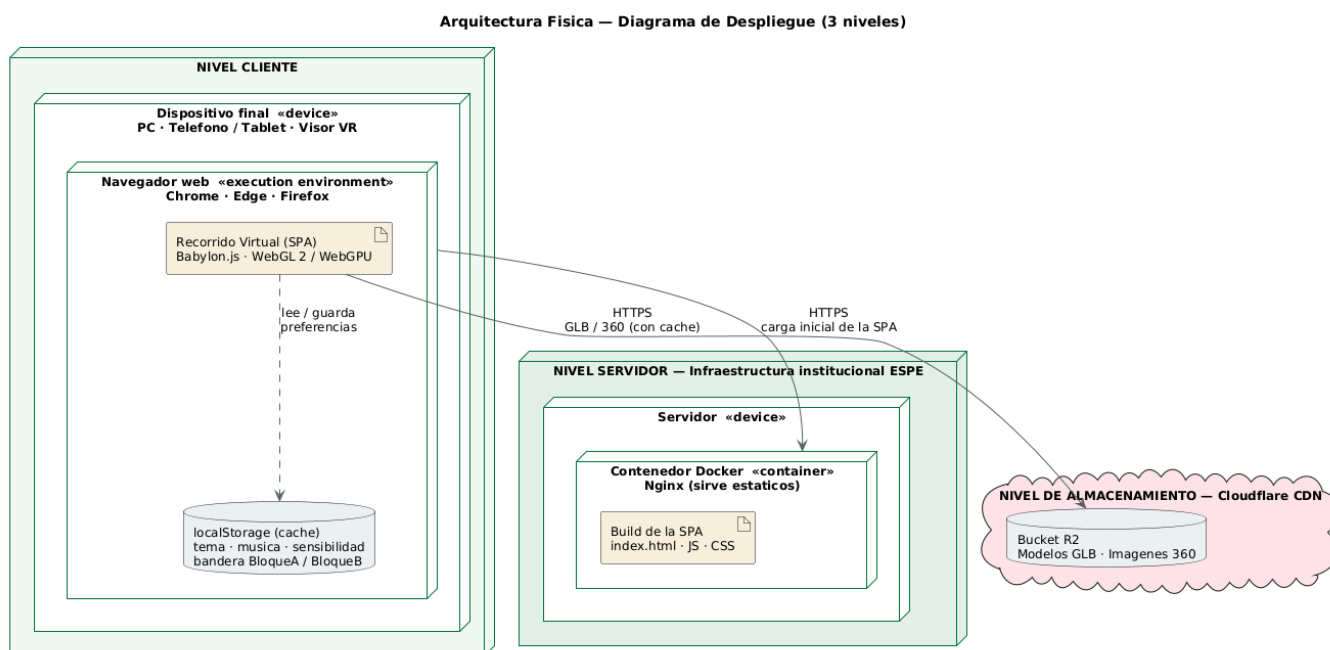
La arquitectura física se basa en el esquema de despliegue distribuido implementado para optimizar la latencia, disponibilidad y escalabilidad del recorrido virtual, lograr subir a la web todo el recorrido incluyendo los dos bloques de la sede y que aun así siga de manera fluida y no se sienta pesado o lento es gracias a las técnicas de despliegue utilizadas ya que en cierta manera el uso de contenedores ayuda mucho al momento de un despliegue continuo, el sistema se descompone en tres niveles principales los cuales son explicados a continuación:

Nivel cliente: El nivel cliente es el navegador web ya sea Chrome, Edge, Firefox, etc, utilizado por los dispositivos finales que podrían ser una PC, teléfonos y visores VR, donde se ejecuta de renderizado WebGL/WebGPU.

Nivel de almacenamiento (CDN): Los archivos pesados como los modelos GLB y las imágenes panorámicas 360°, se alojan en un bucket de cloudflare, garantizando una entrega rápida del contenido para que el usuario sienta fluidez en la navegación. La cache también se usa para cosas pequeñas como puede ser las preferencias del usuario si cuando entro al recorrido escogió estar sin música, tema claro o oscuro, sensibilidad en el recorrido y banderas como podrían ser si el usuario está en el bloque A o B guardar en cache “BloqueA=true” y poder dar una mejor experiencia de usuario.

Nivel Servidor: El recorrido es servidor través de contenedores Docker los cuales están desplegados en la infraestructura institucional lo que asegura un entorno de ejecución portable y seguro, esto permite que si el servidor tiene que descargar algo pesado no afecte al rendimiento del recorrido ya que este se ejecuta del lado del cliente lo cual mejora sustancialmente el rendimiento del sistema.

Como se observa en la Figura 2 la arquitectura física indica como está desplegado el recorrido y como el cliente final logra obtener a través del servidor y los servicios externos el sistema listo para iniciarse correctamente para esto para por diferentes etapas que es representado en un diagrama UML.

Figura 2*Arquitectura Física del recorrido***Arquitectura Lógica**

La arquitectura lógica se estructura en tres capas funcionales que separan las responsabilidades del sistema, favoreciendo la mantenibilidad, la depuración y la capacidad de respuesta ante las entradas del usuario. Cada capa se comunica únicamente con la contigua, lo que reduce el acoplamiento y permite evolucionar una capa sin afectar a las demás.

Capa de Presentación: Gestiona todo lo que el usuario ve y manipula: el lienzo (canvas) donde el motor Babylon.js renderiza la escena 3D mediante WebGL 2/WebGPU, y los elementos de interfaz en HTML/CSS superpuestos (minimapa, mapa de campus, menús, botones y HUD), que se mantienen sincronizados con el estado del recorrido. Incluye además la integración de la API WebXR, que habilita el modo de realidad virtual utilizando la misma escena sin duplicar la lógica.

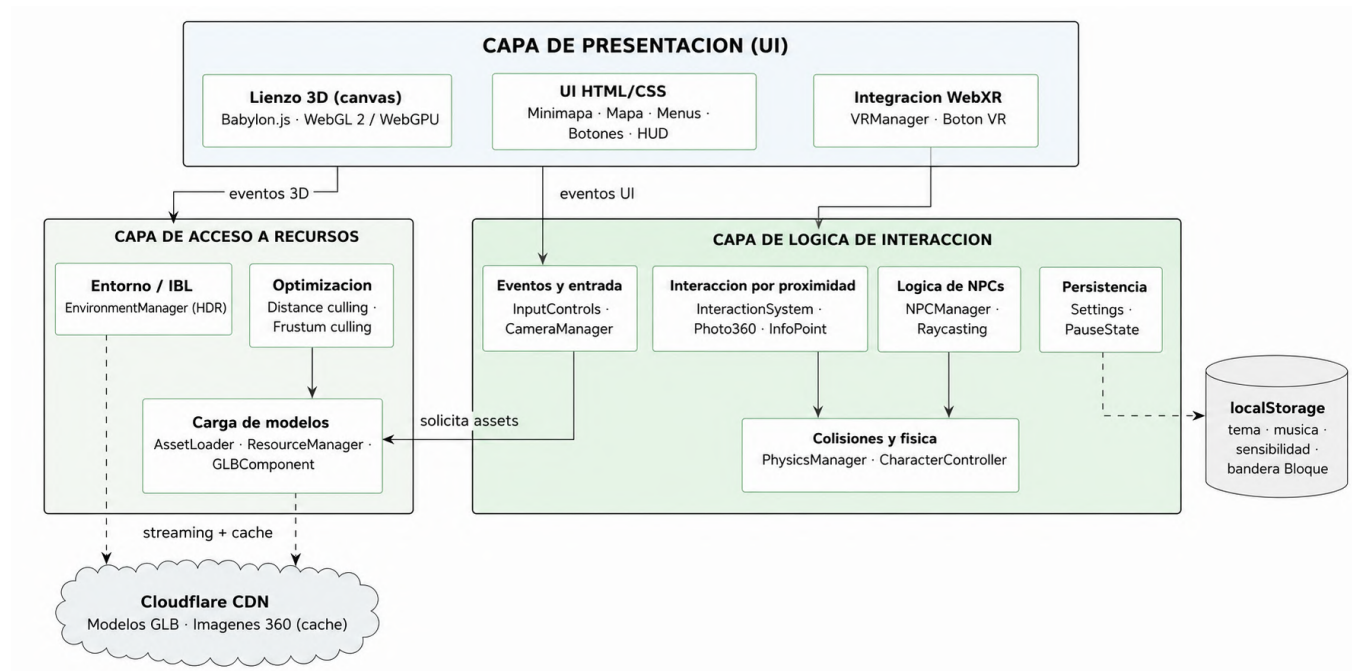
Capa de Lógica de Interacción: Concentra el comportamiento del recorrido. Procesa los eventos de entrada de forma unificada (teclado, gamepad y controles táctiles) y traduce la orientación de la cámara en desplazamiento del personaje; resuelve las colisiones y la física mediante el motor Havok, garantizando que el usuario no atraviese las estructuras y permanezca anclado al suelo; gestiona la interacción por proximidad con los puntos 360° y los puntos de información (activación por cercanía); implementa la lógica de los NPCs mediante Raycasting (para anclarlos al terreno irregular y evitar que atravesen obstáculos); y administra la persistencia de las preferencias del usuario (tema claro/oscuro, música, sensibilidad y la marca del bloque activo) en localStorage, de modo que la experiencia se conserve entre sesiones.

Capa de acceso a recursos: Se encarga de la optimización y adquisición de todos los recursos ayuda a realizar el incremental loading de los modelos GLB de la CDN que se está utilizando en este caso Cloudflare, también se hace uso del caché del navegador para acelerar las recargas y vista de información en el sistema, aplica técnicas de culling que quiere decir que desactiva el renderizado de objetos o zonas que no estén a la vista del usuario y no son necesarias con esto se logra una mayor fluidez en la experiencia del usuario logrando mejor rendimiento.

Esta separación en capas garantiza que la aplicación sea robusta, fácil de depurar y altamente receptiva a las entradas del usuario, como se observa en la Figura 3 la arquitectura lógica indica cómo estarán separadas las responsabilidades del sistema donde al final salieron 3 que están representadas en el siguiente diagrama.

Figura 3

Arquitectura lógica del recorrido



Metodología de desarrollo

Para el desarrollo del recorrido virtual interactivo se adoptó la metodología ágil Scrum, debido a que proporciona un marco de trabajo basado en el desarrollo iterativo e incremental, permitiendo organizar las actividades en ciclos de trabajo de corta duración denominados *Sprints*. Esta metodología favorece a la planificación continua, además a la validación periódica de los avances y la incorporación de mejoras durante el proceso de desarrollo, aspectos que resultaron adecuados para un proyecto que involucró modelado tridimensional, desarrollo web, integración de recursos multimedia y pruebas constantes de funcionamiento.

La aplicación de Scrum permitió organizar el proyecto mediante una planificación estructurada de las actividades a desarrollar, definiendo responsabilidades para cada integrante del equipo, priorizando los requerimientos del sistema y estableciendo entregables parciales, además de que facilitó la detección temprana de inconvenientes, la incorporación de observaciones realizadas durante el desarrollo y la optimización progresiva del recorrido virtual hasta obtener una versión funcional acorde con los objetivos planteados.

Determinación de roles

Para la organización y desarrollo del proyecto, se definieron los roles de trabajo de acuerdo con la metodología Scrum. Cabe mencionar que la asignación de responsabilidades permitió la distribución de actividades entre los integrantes que conforman el proyecto, permitiendo de esa manera la coordinación de tareas desarrolladas con los avances obtenidos durante cada Sprint.

La definición de los roles permitió establecer un responsable para la supervisión del proyecto y validación de los entregables generado en cada iteración, permitiendo garantizar que las actividades desarrolladas mantuvieran coherencia con los objetivos planteados previamente; por lo tanto, en la Tabla 4 se presentan los roles asumidos por cada integrante que conforman el proyecto.

Tabla 4

Determinación de roles del proyecto

Rol Scrum	Integrante	Responsabilidades
Product Owner	Ing. Andrea Lopez	Definir los requerimientos del sistema, establecer las prioridades del proyecto, validar los entregables de cada Sprint y supervisar el cumplimiento de los objetivos planteados.
Scrum Master	Ing. Andrea Lopez	Coordinar las actividades del equipo, realizar el seguimiento del cronograma y resolver impedimentos durante el desarrollo.
Developer 1	Andrés Pantoja	Desarrollar la lógica de la aplicación utilizando Babylon.js, implementar la navegación, puntos interactivos, optimización del rendimiento y despliegue mediante Docker.

Developer 2	John Galarza	Elaborar y optimizar los modelos tridimensionales en Blender, capturar y procesar fotografías panorámicas de 360°, preparar los recursos gráficos e integrarlos en el recorrido virtual.
-------------	--------------	--

Planificación del Product Backlog

Para la organización y desarrollo del proyecto, se definieron los roles de trabajo de acuerdo con la metodología Scrum. Cabe mencionar que la asignación de responsabilidades permitió la distribución de actividades entre los integrantes que conforman el proyecto, permitiendo

Tabla 5

Product Backlog del recorrido virtual

ID	Código	Actividad del Product Backlog	Tiempo estimado (horas)	Prioridad
1	RS-001	Configurar el repositorio GitHub y el control de versiones del proyecto.	8	Alta
2	RNF-008	Configurar el despliegue del recorrido virtual mediante contenedores Docker.	12	Alta
3	RF-003	Actualizar y optimizar el modelo 3D existente del Bloque B en Blender (reducción de polígonos y actualización arquitectónica al 2026).	48	Alta
4	RF-003	Exportar los modelos optimizados y validar la geometría en formato GLB.	16	Alta
5	RF-001	Diseñar la estructura general y configurar la escena base en Babylon.js (WebGL).	24	Alta
6	RF-003	Integrar los modelos GLB dentro del entorno renderizado en Babylon.js.	24	Alta
7	RF-002	Desarrollar los controles de navegación básicos para el desplazamiento.	24	Alta

8	RF-002	Configurar colisiones, físicas y límites de navegación del recorrido.	24	Alta
9	RF-003	Optimizar la iluminación, materiales y renderizado del motor para fluidez base.	20	Alta
10	RF-002	Configurar GitHub Actions para automatizar las pruebas y el despliegue (CI/CD).	12	Media
11	RF-005	Diseñar e implementar los puntos de información interactivos en la escena.	20	Media
12	RF-005	Crear la funcionalidad de incorporar imágenes, videos y documentos en los puntos interactivos.	20	Media
13	RF-007	Diseñar e implementar la pantalla de carga con información y progreso.	16	Media
14	RF-006	Diseñar e implementar el mini mapa para la orientación del usuario.	20	Media
15	RF-004	Capturar fotografías panorámicas de 360° mediante dron.	24	Media
16	RF-004	Procesar e integrar las fotografías 360° en las áreas correspondientes.	24	Media
17	RNF-002	Optimizar la carga progresiva de recursos (GLB/Imágenes) mediante Cloudflare R2.	24	Media
18	RNF-004	Evaluar la usabilidad de la interfaz y afinar los controles de navegación.	16	Media
19	RF-008	Implementar el soporte experimental para dispositivos WebXR y modo estereoscópico.	24	Baja
20	RNF-006	Organizar la arquitectura del proyecto para facilitar la futura incorporación de otros bloques del campus.	16	Baja
21	RNF-007	Modularizar el código fuente y documentar los componentes clave.	16	Media
22	RNF-001	Verificar la compatibilidad en Chrome, Edge y navegadores con WebGL.	12	Alta
23	RNF-005	Realizar pruebas de funcionamiento cruzado (PC, móviles, gafas VR).	20	Media

24	Testing	Ejecutar pruebas funcionales, corregir errores y validar requerimientos.	32	Alta
25	Documentación	Elaborar la documentación técnica de la tesis y observaciones finales.	32	Alta

Distribución propuesta de Sprints

Con base en la planificación del Producto Backlog, se realizó la distribución de las actividades en los diferentes Sprint, en la cual se consideraron la prioridad de los requerimientos, además de las dependencias entre las tareas y los tiempos estimados para cada ejecución. Esta organización permitió desarrollar el recorrido virtual de manera incremental entregando en cada iteración un conjunto de funcionalidades que posteriormente fueron integradas y validadas mediante pruebas de funcionamiento. La planificación se estructuró de acuerdo con el cronograma establecido para la investigación, el cual está comprendido entre el 6 de abril y el 30 de julio de 2026, contemplando jornadas de ocho horas diarias durante los días hábiles, tal como se indica en la Tabla 6.

Tabla 6

Distribución propuesta de los Sprint

Sprint	Fecha Inicio	Fecha Fin	Días Hábiles	Horas por día	Responsabilidades
1	06/04/2026	24/04/2026	15	8	Configuración del repositorio GitHub, creación de contenedores Docker y montaje de la escena base en Babylon.js (Desarrollador 1); Actualización del modelo 3D del Bloque

					B y reducción de vértices/polígonos (Desarrollador 2).
2	27/04/2026	15/05/2026	15	8	Integración de modelos GLB a Babylon.js y programación de controles de navegación (Desarrollador 1); Exportación/validación de modelos GLB y mapeo de colisiones, físicas y límites del recorrido (Desarrollador 2).
3	18/05/2026	05/06/2026	15	8	Diseño de pantalla de carga y programación de la lógica de los puntos interactivos (Desarrollador 1); Incorporación de videos/imágenes en los puntos interactivos y diseño del minimapa (Desarrollador 2).
4	08/06/2026	26/06/2026	15	8	Integración de fotografías 360° a la escena y configuración de carga progresiva con

					Cloudflare R2 (Desarrollador 1); Captura de fotografías panorámicas 360° con dron y optimización de iluminación/materiales (Desarrollador 2).
5	29/06/2026	17/07/2026	15	8	Configuración de GitHub Actions (CI/CD), soporte experimental WebXR y modularización del código (Desarrollador 1); Evaluación de usabilidad de navegación y estructuración de arquitectura para futuros bloques (Desarrollador 2).
6	20/07/2026	30/07/2026	9	8	Verificación de compatibilidad en navegadores web, pruebas funcionales y elaboración de documentación técnica (Desarrollador 1); Pruebas cruzadas (PC/Móvil/VR), pruebas funcionales y elaboración de

documentación
técnica (Desarrollador
2).

Planificación de los Sprints y Criterios de Aceptación

La planificación de los sprints permite organizar las actividades predeterminadas en el Product Backlog de manera incremental, configurando un paquete de tareas concretas para cada iteración. A diferencia de los enfoques tradicionales, en esta adaptación de Scrum se ha unificado la descripción de las tareas con sus respectivos criterios de aceptación (Definition of Done). Esta integración garantiza que las funcionalidades de cada iteración se ejecuten desde su origen cumpliendo con los estándares técnicos requeridos, promoviendo una validación continua. A continuación, se detalla la planificación de los seis Sprints del proyecto.

Sprint Backlog 1. El Sprint 1 está orientado a la preparación del entorno de desarrollo y la optimización de los modelos tridimensionales del Bloque B. Durante esta iteración se configurará la infraestructura base del proyecto, estableciendo el control de versiones y el entorno mediante contenedores. En la Tabla 7 se presenta la planificación detallada y los criterios de aceptación correspondientes al Sprint 1.

Tabla 7

Planificación y criterios de aceptación del Sprint 1

Código	Actividad a desarrollar	Entregable	Criterios de Aceptación
RS-001	Configurar el repositorio en GitHub (ramas principales) y	Entorno de desarrollo base	El contenedor inicializa sin errores,
RNF-008	preparar el entorno de despliegue local mediante contenedores Docker.	configurado.	y el control de versiones permite el

			flujo de trabajo colaborativo.
RF-003	Actualizar el modelo arquitectónico del Bloque B y optimizar la geometría en Blender (reducción de vértices/polígonos).	Modelo 3D optimizado.	El modelo conserva la fidelidad estructural del edificio reduciendo el peso geométrico global.
RF-001	Diseñar la estructura general y configurar la escena base, cámaras e iluminación utilizando el motor Babylon.js.	Escena base (WebGL).	El lienzo (<canvas>) se inicializa correctamente en el navegador sin errores en la consola.

Sprint Backlog 2. El Sprint 2 se enfoca en la construcción de la escena principal y la incorporación de los modelos 3D optimizados en el entorno renderizado de Babylon.js. En esta etapa se definen las bases de la navegación espacial, las colisiones y las físicas del recorrido virtual. La Tabla 8 detalla las actividades planificadas para este Sprint.

Tabla 8

Planificación y criterios de aceptación del Sprint 2

Código	Actividad a desarrollar	Entregable	Criterios de Aceptación
RF-003	Exportar, validar e integrar los modelos en formato .glb dentro del entorno renderizado en Babylon.js.	Entorno 3D poblado con mallas.	Los modelos se visualizan correctamente, manteniendo las texturas y materiales asignados.

RF-002	Desarrollar los controles de navegación espacial en primera persona.	Sistema de desplazamiento.	El usuario puede desplazarse y rotar la cámara utilizando teclado y ratón de forma fluida.
RF-002	Configurar físicas de gravedad, mapeo de colisiones y límites perimetrales del recorrido.	Sistema de navegación seguro.	La cámara no puede atravesar paredes, pisos u otros obstáculos arquitectónicos.

Sprint Backlog 3. El Sprint 3 está destinado a desarrollar los elementos de interfaz de usuario y las funcionalidades de interacción. Durante esta iteración se implementará la pantalla de carga progresiva, el mini mapa espacial y los puntos de información multimedia interactivos. La planificación y los criterios de evaluación de este Sprint se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9

Planificación y criterios de aceptación del Sprint 3

Código	Actividad a desarrollar	Entregable	Criterios de Aceptación
RF-007	Diseñar e implementar la pantalla de carga (<i>Loader</i>) con información gráfica de progreso.	Interfaz de inicialización.	La pantalla bloquea la vista hasta que los recursos base alcanzan el 100% de carga.
RF-005	Programar la lógica de los puntos de información interactivos (<i>hotspots</i>) y su	Puntos interactivos funcionales.	Los iconos flotantes son clicables y responden a la interacción del usuario.

renderizado en la
escena.

RF-005	Incorporar la lógica para desplegar modales con imágenes, videos y documentos al activar un <i>hotspot</i> .	Paneles multimedia.	Los recursos se abren en un panel 2D superpuesto sin detener el renderizado del entorno.
RF-006	Diseñar e implementar el mini mapa lateral para la orientación espacial.	Interfaz de orientación.	La posición e ícono del usuario se actualizan en el mapa bidimensional en tiempo real.

Sprint Backlog 4. El Sprint 4 tiene como objetivo incrementar el nivel de inmersión del recorrido virtual mediante la integración de fotografías panorámicas de 360° en áreas estratégicas. Asimismo, se configurará una arquitectura de red optimizada para manejar estos recursos pesados. En la Tabla 10 se exponen las actividades programadas para esta iteración.

Tabla 10

Planificación y criterios de aceptación del Sprint 4

Código	Actividad a desarrollar	Entregable	Criterios de Aceptación
RF-004	Capturar fotografías panorámicas de 360° mediante vuelo de dron en exteriores e interiores clave.	Archivos fotográficos.	Las imágenes no presentan distorsión de cosido (<i>stitching</i>) y tienen la resolución requerida.
RF-004	Integrar las fotografías envolventes a la escena de Babylon.js (mediante <i>PhotoDome</i>).	Escenarios 360° inmersivos.	La transición de la malla 3D al entorno fotográfico 360° ocurre sin saltos abruptos.

RNF-002	Configurar el <i>pipeline</i> de carga asíncrona de recursos pesados apoyándose en la CDN de Cloudflare R2.	Arquitectura de red optimizada.	El inspector de red valida que los recursos se sirven desde la caché de la CDN.
RF-003	Realizar la optimización final de la iluminación y materiales PBR del entorno.	Escena de alto rendimiento.	Las texturas reaccionan a la luz dinámica sin sobrecargar la memoria de video (VRAM).

Sprint Backlog 5. El Sprint 5 se orienta a consolidar la arquitectura del sistema y expandir su accesibilidad. Esto incluye la automatización de despliegues, la modularización del código fuente y la implementación de soporte experimental para tecnologías inmersivas. La Tabla 11 presenta los detalles de planificación para este Sprint.

Tabla 11

Planificación y criterios de aceptación del Sprint 5

Código	Actividad a desarrollar	Entregable	Criterios de Aceptación
RF-002	Configurar los flujos de integración y despliegue continuo (CI/CD) mediante GitHub Actions.	<i>Pipeline</i> automatizado.	Cada actualización de código en la rama principal ejecuta exitosamente el proceso de construcción (<i>build</i>).
RF-008	Implementar el soporte experimental de la API WebXR para dispositivos inmersivos.	Modo estereoscópico.	La aplicación permite conmutar al modo VR en visores y móviles compatibles

			manteniendo la estabilidad.
RNF-004	Evaluar la usabilidad general de la interfaz de usuario (UI) y afinar variables físicas de movimiento.	UI validada.	Los controles son intuitivos y la navegación previene sensaciones de mareo (<i>motion sickness</i>).
RNF-006	Modularizar el código fuente, documentar los componentes y	Arquitectura escalable.	El código permite añadir futuros bloques del campus sin
RNF-007	estructurar la arquitectura del sistema.		modificar la lógica principal de renderizado.

Sprint Backlog 6. El Sprint 6 corresponde a la fase final de validación y estabilización del proyecto, durante esta iteración se ejecutarán las pruebas cruzadas de rendimiento en diversas plataformas y se consolidará la documentación del sistema. La Tabla 12 detalla las actividades de cierre del desarrollo.

Tabla 12
Planificación y criterios de aceptación del Sprint 6

Código	Actividad a desarrollar	Entregable	Criterios de Aceptación
RNF-001	Ejecutar pruebas cruzadas de rendimiento y compatibilidad en	Reporte de QA técnico.	El sistema mantiene métricas estables de CPU, RAM y FPS de
RNF-005	distintos navegadores, móviles, PC y VR.		acuerdo con el hardware objetivo.

Testing	Ejecutar pruebas funcionales finales, validar el cumplimiento general de requerimientos y aplicar correcciones.	Versión de producción estable.	Todos los criterios de aceptación y requerimientos definidos (RF, RNF y RS) se cumplen satisfactoriamente.
Doc.	Elaborar la redacción final de la documentación técnica de la tesis y los manuales en el repositorio.	Documentación finalizada.	El archivo <code>README.md</code> del repositorio y los capítulos de la tesis reflejan con precisión el producto final.

Tipo y diseño de investigación

De acuerdo con el alcance del estudio, la presente investigación es de tipo descriptiva, ya que busca identificar, caracterizar y analizar las condiciones relacionadas con la difusión institucional mediante tecnologías digitales, así como describir el comportamiento y desempeño de un recorrido virtual interactivo desarrollado para el Bloque B de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Santo Domingo. Este tipo de investigación permite detallar las características funcionales, técnicas y de usabilidad de la solución propuesta, sin establecer relaciones de causalidad entre variables.

En cuanto al diseño de investigación, corresponde a un diseño no experimental, debido a que las variables de estudio no son manipuladas deliberadamente por el investigador. La investigación se centra en el desarrollo, implementación y evaluación del recorrido virtual interactivo, observando y analizando su comportamiento en condiciones reales de funcionamiento mediante pruebas técnicas y evaluaciones de los usuarios.

El estudio presenta un corte transversal, puesto que la recolección de datos para la evaluación del sistema se realizará en un único momento temporal, una vez concluida la

implementación del recorrido virtual. Para lograr una evaluación integral del sistema, la investigación emplea un enfoque mixto que integra herramientas cuantitativas y cualitativas. Las herramientas cuantitativas permiten medir, de forma objetiva y precisa, indicadores técnicos de rendimiento, accesibilidad y usabilidad como la tasa de fotogramas por segundo (FPS) y los resultados de la escala SUS, ofreciendo métricas concretas sobre el desempeño de la aplicación. Complementariamente, las herramientas cualitativas se utilizan para analizar la percepción de los usuarios, la experiencia de navegación y la idoneidad de los elementos interactivos, proporcionando una comprensión más profunda sobre la satisfacción y el impacto de la herramienta en el contexto específico de la investigación.

Respecto a la fuente de información, la investigación es de carácter documental, bibliográfica y de campo. ya que se fundamenta en la revisión de artículos científicos, trabajos académicos, normas técnicas y documentación especializada relacionada con recorridos virtuales, modelado tridimensional, tecnologías Web3D, usabilidad y accesibilidad web. De igual manera, es una investigación de campo porque requiere la obtención directa de información mediante pruebas funcionales, mediciones de rendimiento y la aplicación de instrumentos de evaluación a los usuarios que interactúen con el recorrido virtual desarrollado.

Población y muestra

La población que fue escogida son los estudiantes de tercero de bachillerato del cantón Santo Domingo, dado que estos representan la principal fuente de uso para el recorrido virtual ya que son los próximos aspirantes a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Santo Domingo de los tsáchilas con esto queda claro que son la población más adecuada para medir si el recorrido sirve como herramienta de difusión institucional y es de agrado con personas que no tienen mucho conocimiento de la sede de Santo Domingo de los tsáchilas.

De acuerdo a la información que ha sido publicada por el Diario la Hora se ha obtenido los datos que durante el periodo académico ciclo 2025/2026 han egresado un aproximado de

9000 estudiantes de tercer bachillerato en el cantón Santo Domingo, la cifra fue utilizada como referencia para construir la población del estudio [44].

Ya que el tamaño de la población es muy elevado y las limitaciones como los recursos y tiempo para desarrollar la investigación no son los suficientes para hacer una recolecta de datos masiva se optó mejor realizar un muestreo no probabilístico. Según Scharager & Reyes, este tipo de muestreo es adecuado mayormente en prototipos tecnológicos donde se busca principalmente que el usuario valore el funcionamiento y experiencia del sistema [45].

La muestra finalmente escogida fue de 105 estudiantes de tercer bachillerato del cantón Santo Domingo, estos interactuaron con el recorrido virtual en diferentes dispositivos ya sea celulares, laptops y las gafas de realidad virtual, una vez realizada la interacción de los estudiantes con el sistema se les realizó una encuesta para evaluar el uso de la aplicación en ámbitos de facilidad, experiencia, controles, información, etc. Toda la información recolectada permitió analizar la efectividad que tiene el recorrido con personas que no tienen mucho acercamiento a lo que es la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Santo domingo de los tsáchilas y cuál es la impresión de los estudiantes al uso de un sistema colgado en la web tipo videojuego para recorrer una universidad.

Técnica e instrumento

Para la recolección de datos se optó por emplear técnicas de observación sistemática y una encuesta las cuales permitieron evaluar correctamente el rendimiento y usabilidad del recorrido virtual además de la facilidad de uso del sistema por usuarios que están aspirando a estudiar en una universidad.

Se ha utilizado la observación sistemática para realizar la evaluación de lo funcional y técnico de todo el recorrido mediante pruebas de caja negra que quiere decir que se evalúan las entradas y salidas del sistema sin analizar nada de código interno. El instrumento utilizado fue una ficha de observación donde se registraron todos los resultados obtenidos durante pruebas en diferentes ambientes para lograr cumplir los resultados más óptimos para los

requisitos funcionales algunas de las características que se analizaron son la tasa de fotogramas por segundo (FPS), el consumo de memoria RAM, CPU, GPU, etc, también se hicieron las pruebas en diferentes navegadores web y dispositivos donde se tomaron datos durante varios lapsos de la ejecución del recorrido virtual.

Para evaluar la accesibilidad del recorrido virtual se hizo uso de las Pautas de Accesibilidad para el Contenido Web (WCAG) las cuales están propuestas por el World Wide Web Consortium (W3C). Una vez realizada la evaluación permitió verificar que se estén cumpliendo criterios como la percepción de la información, operabilidad, robustez del sistema y la comprensión que tiene el contenido.

Para llegar a conocer la percepción de los usuarios sobre la usabilidad del sistema se optó por emplear una encuesta, utilizando como referencia el formato de preguntas del cuestionario System Usability Scale (SUS) el cuál fue desarrollado por Brooke en 1986, este formato de preguntas es ampliamente utilizado cuando se quiere evaluar la usabilidad de sistemas que son interactivos con los usuarios. La encuesta con formato SUS estuvo conformada por 10 preguntas que serían de respuestas cerradas opción múltiple estructuradas mediante la escala de Likert la cual está conformada por 5 niveles que permiten identificar la facilidad, simplicidad, confianza e integración de funcionalidades del sistema en la satisfacción general del usuario [42].

La encuesta fue realizada de forma digital gracias a la herramienta de formularios proporcionada por Google (Google Forms), toda la información obtenida de la encuesta fue utilizada íntegramente para fines académicos no se pedía nada de datos personales para mantener el anonimato ya que lo importante era tener resultados del uso que se tuvo con el recorrido virtual y la satisfacción obtenida.

Validación y confiabilidad del instrumento

Los instrumentos empleados en la investigación se le aplicaron procedimientos de validación según la naturaleza que tienen esto se hace para que quede todo claro de como se le dio uso a dichos instrumentos,

EL instrumento utilizado para evaluar la accesibilidad se hizo uso de las Pautas de Accesibilidad para el contenido Web para ser más específicos exactamente fue la WCAG2, ya que se trata de un estándar que existe hace mucho y se lo maneja internacionalmente no hizo falta realizar procesos adicionales para validar que el uso de esta herramienta es correcto ya que cuenta con sus propios criterios y reputación que lo respaldan.

Para evaluar la usabilidad se hizo uso de un estándar de preguntas para medir la efectividad de esta, el estándar utilizado se lo conoce como System Usability Scale (SUS) el cuál ya es un instrumento que se encuentra estandarizado y es ampliamente utilizado cuando se quiere medir únicamente la usabilidad que tiene un sistema interactivo, dado que el cuestionario SUS ha sido validado por muchas investigaciones y autores como anteriormente se lo mencionaba en este documento no fue necesario realizar procesos adicionales para probar que la herramienta empleada cumpla su objetivo. El cuestionario de SUS para dar un resultado de que tan efectiva es la usabilidad de un sistema usa valores numéricos distribuidos en 5 niveles donde al final se obtiene un promedio que da un porcentaje de qué tan efectiva es la usabilidad del sistema.

Consideraciones éticas

La presente investigación se desarrolló respetando los principios éticos que rigen para una investigación científica, garantizando la integridad, respeto, dignidad y privacidad de todos los usuarios que han tenido que ser involucrados en el sistema por recolección de datos netamente para saber la percepción en general del recorrido virtual.

Tipo de participantes: La población objeto fueron los estudiantes de tercer bachillerato y la muestra fue obtenida por un evento exclusivamente para estos estudiantes que están por culminar su etapa colegial y ahora andan en busca de una universidad donde postular, los

estudiantes que hicieron uso del recorrido virtual en el evento se les ofrecía amablemente y sin pedir información personal o sensible si podían ayudar a llenar una encuesta para saber la opinión que tenían referente al recorrido y esto no presento ningún tipo de riesgo.

Consentimiento informado: Antes de cualquier tipo de instrumento utilizado se informa a los participantes objetivos sobre cuáles son los motivos de creación de este recorrido virtual, una pequeña introducción sobre qué representa la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE y que es lo que verán dentro del recorrido que sería una maqueta 3D de todo lo que es la sede pero en el caso de esta investigación se optó por mostrar exclusivamente el bloque B.

Confidencialidad: Los datos obtenidos con ayuda del cuestionario SUS fueron compartidos solo con participantes de esta investigación, todo el cuestionario fue tratado de forma anónimamente ya sea en el formulario digital o en lo verbal presencial ya que no se pidió ningún tipo de información personal ni sensible todos los datos fueron utilizados exclusivamente para tener un análisis sobre el recorrido virtual con usuarios que no tengan muchos conocimientos sobre la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Respeto a la normativa institucional: Se mantuvo siempre un realismo lo más parecido con lo que se veía 3D y la vida real de la universidad toda la información que se muestra en el sistema es de carácter público e importante compartir para los futuros estudiantes que quieran conocer más sobre la institucion, se mantuvo total confidencialidad en el uso de servidores e infraestructura institucional.

Capítulo IV

Análisis y discusión de los resultados

En esta sección se analizará todos los resultados obtenidos según los sprints que se han planificado cada sprint tendrá uno o varios resultados para representar correctamente estos se hará uso de gráficos claros que muestren el objetivo final del sprint completo. Para empezar con el análisis

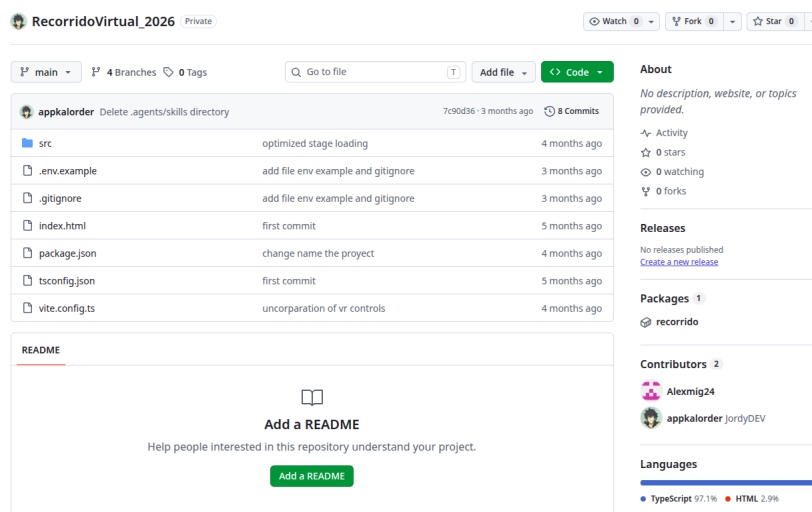
Resultados del Sprint 1

Configuración del repositorio GitHub y control de versiones (RS-001):

Como resultado del primer paso para el desarrollo del proyecto consistió en establecer un entorno de trabajo colaborativo seguro y organizado. Se procedió a crear la organización y el repositorio central del proyecto en la plataforma GitHub. Durante este proceso, se definieron las políticas de ramas principales, estableciendo "main" para código de producción y "develop" para la integración de nuevas características, asegurando así un flujo de trabajo ordenado para el equipo. En la Figura 4 se evidencia la estructura del repositorio inicial y las ramas configuradas.

Figura 4

Repositorio del proyecto y configuración de ramas en GitHub.



Configuración del despliegue mediante contenedores Docker (RNF-008):

Para garantizar que el entorno de desarrollo sea idéntico para ambos desarrolladores y evitar problemas de compatibilidad de software, se implementó el despliegue del sistema mediante contenedores. Se elaboró el archivo Dockerfile con las dependencias necesarias para el entorno web y se configuró Docker Compose para levantar los servicios locales de manera automatizada. En la Figura 5 se muestra la consola del sistema ejecutando exitosamente la construcción y el levantamiento de los contenedores del proyecto.

Figura 5

Ejecución del entorno de desarrollo local mediante Docker.

```
chicoapi@ubuntu-4gb-nbg1-1:~$ docker ps
```

CONTAINER ID	IMAGE	COMMAND	CREATED	STATUS	PORTS
6cf34a7cdb97	odoo-compile-builder-v19	"/worker.sh"	3 hours ago	Up 3 hours	
d997837397a9	odoo-compile-webhook	"python3 webhook_ser..."	3 hours ago	Up 3 hours (healthy)	127.0.0.1:8088->8088/tcp
66db741b209e	ghcr.io/appkallorder/recorrido:latest	"/docker-entrypoint..."	2 days ago	Up 2 days	0.0.0.0:3000->80/tcp, [::]:3000->80/tcp
70905c82a71a	metricas-recorrido-analytics-dashboard	"/docker-entrypoint..."	6 days ago	Up 6 days	0.0.0.0:8081->80/tcp, [::]:8081->80/tcp
e4e71bc27e79	metricas-recorrido-analytics-api	"/usr/local/bin/dock..."	6 days ago	Up 6 days	0.0.0.0:4000->4000/tcp, [::]:4000->4000/tcp
	metricas-recorrido-analytics-api-1				

Actualización y optimización del modelo 3D existente del Bloque B (RF-003):

La base visual del recorrido virtual requirió un trabajo exhaustivo de optimización arquitectónica. Se importó el modelo base tridimensional del Bloque B en el software Blender, donde se ejecutaron procesos de retopología y reducción significativa de polígonos y vértices para garantizar un rendimiento óptimo en la web. Simultáneamente, se actualizó la estructura para que refleje de manera fiel la realidad arquitectónica del bloque en el año 2026. La Figura 6 ilustra el entorno de Blender con la malla optimizada y el conteo de vértices reducido.

Figura 6

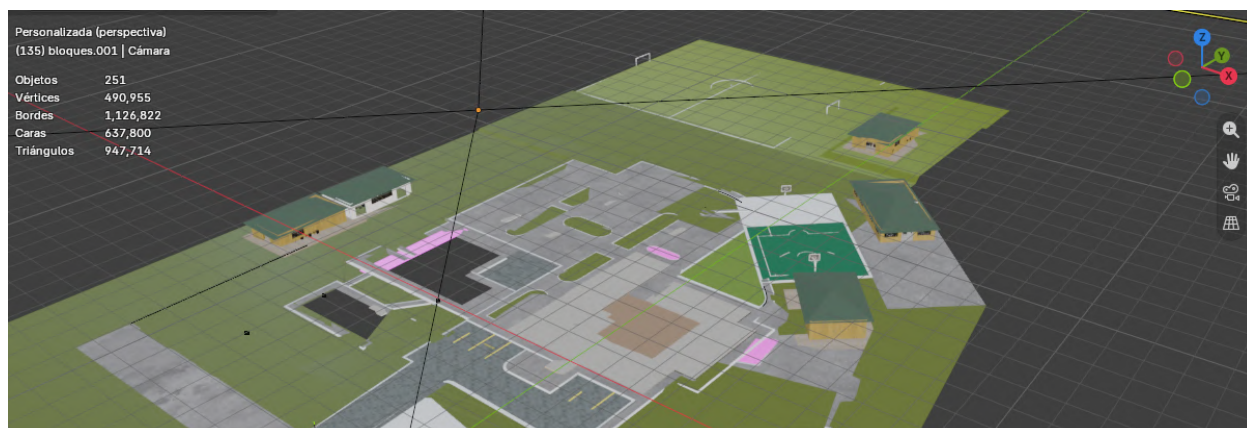
Optimización de la malla y reducción de polígonos del Bloque B en Blender.



Se crearon nuevas aulas y zonas que antes no estaban en el glb antiguo del bloque B realizado en una tesis anterior, se mejoró texturas y infraestructura de aulas y laboratorios ya existentes y también se incorporó la cancha de futbol para esto se hizo un modelado aparte de cada una de estas secciones donde luego se incorporaron al modelo principal esto se hace para poder modelar una cosa a la vez y luego unir las como un rompecabezas dando el resultado final deseado y optimizado, en la Figura 7 se puede visualizar las áreas que fueron creadas desde 0 para ser incorporadas al blender principal.

Figura 7

Nuevas y mejoras de zonas en el modelo GLB del Bloque B



Para el desarrollo del entorno virtual, se actualizó el modelo tridimensional base del Bloque B, incorporando nuevos detalles estructurales y elementos del entorno para lograr un mayor fotorrealismo acorde al año 2026. Esta adición de detalles incrementó la densidad geométrica a 3,314,553 triángulos. Para mitigar el impacto en el rendimiento de la aplicación web y asegurar tiempos de carga eficientes a través de la red, se implementó el algoritmo de compresión geométrica Draco (desarrollado por Google) durante la exportación al formato GLB. Como se detalla en la Tabla 13, aunque la topología del modelo aumentó en detalle (ver Figura 7), la compresión permitió reducir drásticamente el peso final del archivo en disco, optimizando la transmisión de datos hacia el motor WebGL de Babylon.js, en la Figura 8 se muestra como en Google Drive se tiene guardado la versión antigua del blender del Bloque B y la versión final ya optimizada con Draco.

Figura 8

Reducción en el tamaño del GLB

Nombre	Propietario	Fecha de modificación 	Tamaño del
 BloqueB_Antiguo_SinDraco.glb 	 yo	29 jul yo	183.8 MB
 bloqueB_V2.0_ConDraco.glb 	 yo	12:41 a.m. yo	19.6 MB

En la Tabla 13 se muestra el número de triángulos aumento ya que se agregaron nuevas estructuras al modelo principal pero el tamaño del GLB disminuyó dando una mejor rapidez al momento de exportación o tratamiento del archivo en la web.

Tabla 13

Diferencias en tiempo de carga y tamaño con compresión Draco

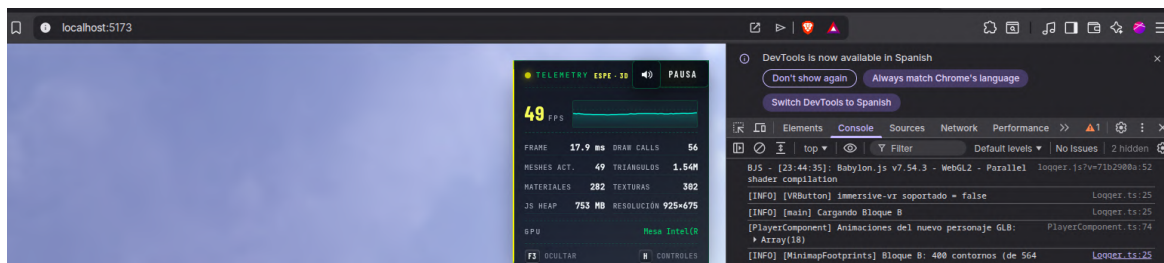
Métrica	Modelo Inicial (Sin comprimir)	Modelo Actualizado (Compresión Draco)
Triángulos Totales	2,460,257	3,314,553
Peso del Archivo BLEND	183.8 MB	19.6 MB
Tiempo de Carga Promedio	1-3 minutos	30-50 segundos

Diseño de la estructura y configuración de la escena en Babylon.js (RF-001):

Con la infraestructura y los recursos visuales en preparación, se inicializó el proyecto web instalando las dependencias del motor gráfico Babylon.js. En esta tarea se configuró la escena base del sistema, estableciendo el motor de renderizado, un plano de suelo inicial y una cámara estática de prueba para verificar que el lienzo de WebGL se proyecta correctamente en el navegador. Como se observa en la Figura 9, el lienzo de renderizado se inicializó sin errores en el entorno local al igual que en producción.

Figura 9

Inicialización de la escena base y motor de renderizado web con Babylon.js.



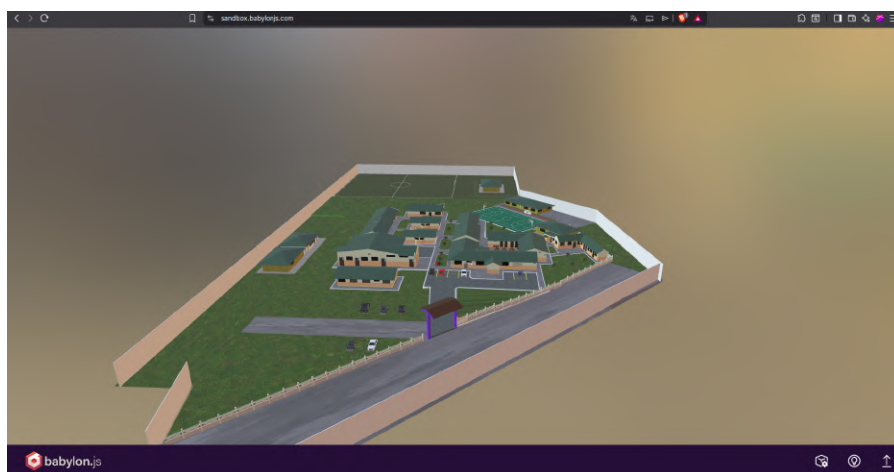
Resultados del Sprint 2

Exportación de modelos y validación de geometría (RF-003):

Una vez finalizada la optimización del modelo tridimensional, fue necesario transformar el archivo nativo de Blender a un formato estándar para aplicaciones web. Se procedió a exportar la estructura del Bloque B al formato GLB (GL Transmission Format), el cual empaqueta de forma eficiente las mallas, materiales y texturas. Se realizó una validación técnica del archivo resultante para asegurar que la geometría no presentará caras invertidas o texturas faltantes. En la Figura 10 se detalla la previsualización del archivo GLB validado antes de su integración al código.

Figura 10

Validación del modelo arquitectónico exportado en formato GLB.



Integración de modelos GLB en Babylon.js (RF-003):

Con el modelo GLB validado, el siguiente objetivo fue cargarlo dentro del motor gráfico del aplicativo web. Mediante el uso de las funciones de importación asíncrona de Babylon.js, se integró el archivo tridimensional a la escena previamente configurada. Durante esta fase se ajustaron las escalas globales y se definieron las posiciones iniciales (coordenadas X, Y, Z) para que el edificio se situará directamente sobre el plano base. La Figura 11 evidencia el modelo del Bloque B completamente renderizado en el navegador.

Figura 11

Renderizado del modelo arquitectónico GLB dentro de la aplicación web.



Desarrollo de controles de navegación básicos (RF-002):

Para que el usuario pudiera explorar el modelo integrado, se programaron los eventos de entrada (inputs) correspondientes al teclado y ratón. Se vinculó la lógica de estos periféricos a una cámara de tipo "UniversalCamera" en Babylon.js, lo que permitió simular un movimiento

en primera persona. De esta manera, el usuario obtuvo la capacidad de avanzar, retroceder y rotar la vista libremente por la escena. En la Figura 12 se Muestra como ya están incorporados los controles para manejar con teclado y ratón y como se activa la cámara manager.

Figura 12

Configuración de la cámara y controles de navegación en el entorno 3D.



Configuración de colisiones, físicas y límites (RF-002):

El movimiento libre implementado en la tarea anterior presentaba el inconveniente de permitir que la cámara atravesara las estructuras sólidas. Para solucionar esto y dotar de realismo al recorrido virtual, se activó el motor de físicas interno del sistema. Se mapean las mallas de colisión (paredes, pisos, columnas) y se configuró un elipsoide alrededor de la cámara del usuario para simular su volumen físico, restringiendo su movimiento a las áreas transitables. En la Figura 13 se aprecia el comportamiento del sistema al interactuar con los límites físicos del modelo.

Figura 13

Implementación de mallas de colisión y límites físicos de navegación.



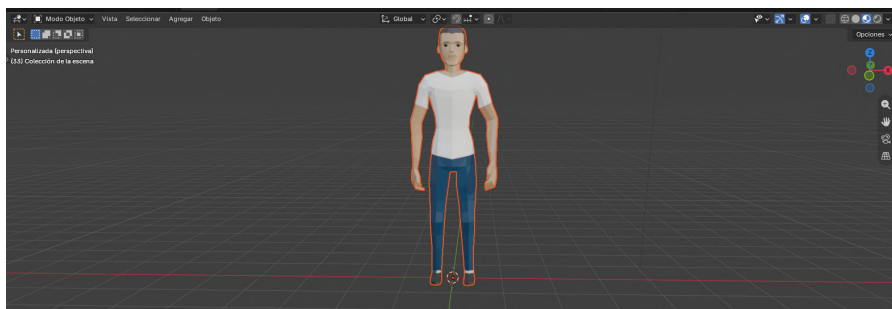
Resultados del Sprint 3

Implementación de personaje para tercera persona:

Se hace uso de un modelo GLB de un personaje masculino para poder utilizar el recorrido virtual en tercera persona el diseño del personaje es genérico para no tener preferencias por ninguna de las tres carreras de la universidad, el personaje no hace un efecto abismal al rendimiento del recorrido ya que está exportado en GLB y tiene un peso aproximado de 1 MB, en la Figura 14 se puede observar como está modelado en blender y cuántos vértices, caras componen a este personaje además de sus materiales.

Figura 14

Modelo tridimensional masculino genérico usado como personaje



Diseño y maquetación de la interfaz gráfica de usuario (GUI):

Para dotar al aplicativo web de usabilidad, se desarrolló la estructura base de la interfaz de usuario superpuesta al lienzo 3D. Se emplearon tecnologías web estándar para maquetar los contenedores, botones y menús laterales, asegurando que el diseño sea responsivo y no interfiera con la visibilidad del modelo arquitectónico. En la Figura 15 se observa la disposición de los elementos de la interfaz sobre el recorrido virtual.

Figura 15

Diseño y maquetación de la interfaz gráfica de usuario principal.



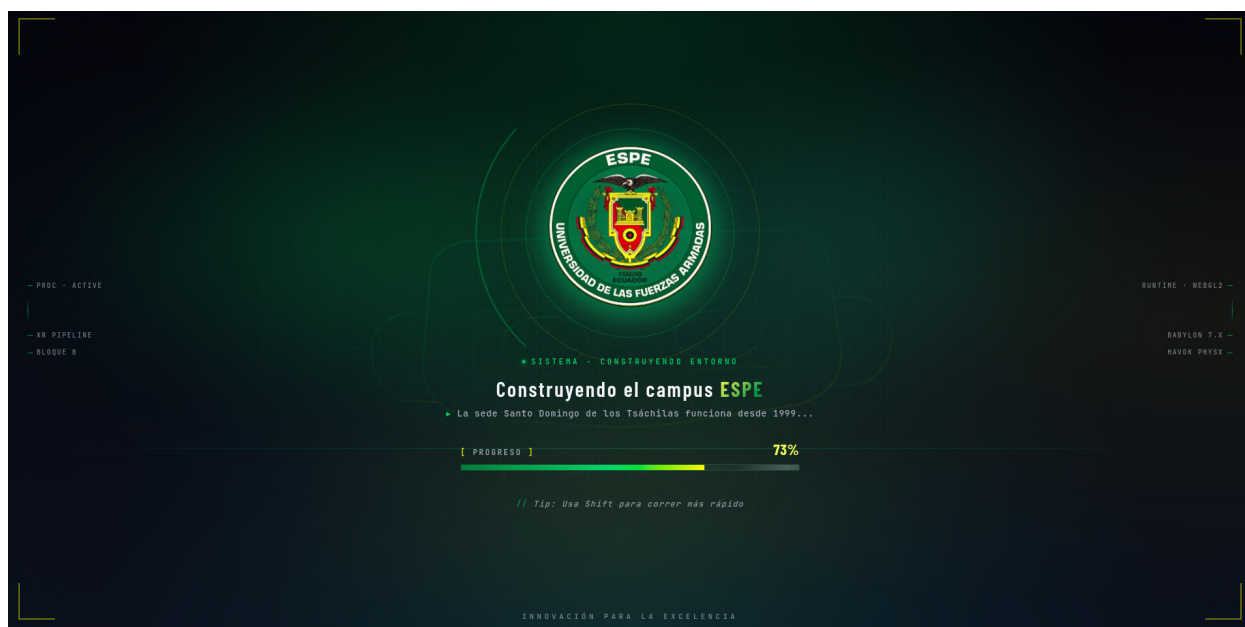
Implementación de la pantalla de carga (Loading Screen):

Dado el volumen de datos geográficos a procesar (modelos y texturas), se programó una pantalla de espera. Esta tarea implicó vincular el administrador de recursos (Assets

Manager) de Babylon.js con un componente visual que renderiza una barra de progreso porcentual, informando al usuario el estado de la descarga. La Figura 16 ilustra la pantalla de carga en ejecución.

Figura 16

Pantalla de carga vinculada al gestor de recursos de la aplicación.



Lógica espacial de los puntos de información (Hotspots):

Se definieron las coordenadas tridimensionales clave dentro del modelo del Bloque B para ubicar los marcadores de interés. La tarea requirió programar eventos de intersección (raycasting) para que el sistema detecte cuándo el puntero del usuario interactúa con estos marcadores esféricos en el espacio 3D. La Figura 17 muestra la distribución espacial de los marcadores en un área del bloque.

Figura 17

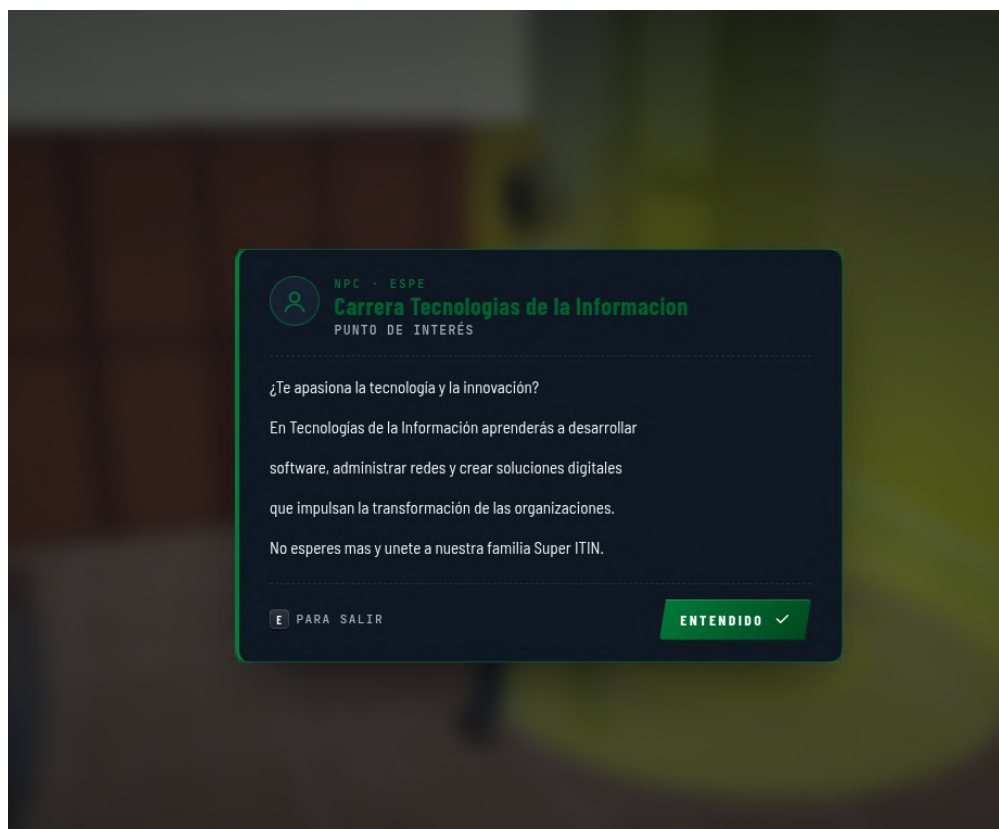
Distribución espacial de marcadores interactivos en el modelo.

**Despliegue de paneles informativos multimedia:**

Como continuación de los puntos interactivos, se desarrolló la lógica para que, al activar un hotspot, se inyecte dinámicamente en el DOM (Document Object Model) un panel informativo. Estos paneles se conectan a una estructura de datos que provee el texto descriptivo y las fotografías correspondientes al aula o laboratorio seleccionado, como se evidencia en la Figura 18.

Figura 18

Panel multimedia emergente activado desde un punto de interés.



Diseño e integración del mapa dinámico:

Se elaboró un plano bidimensional simplificado de la planta arquitectónica del Bloque B para utilizarlo como mapa. Este componente se superpuso en la esquina inferior o superior de la pantalla según el espacio de la pantalla del dispositivo, sirviendo como herramienta de orientación rápida para el estudiante o visitante, según se observa en la Figura 19.

Figura 19

Diseño del plano bidimensional integrado como minimapa.



Sincronización de cámara con el indicador del minimapa:

Para dar dinamismo a la herramienta de orientación, se programó un algoritmo de mapeo de coordenadas que traduce la posición X y Z de la cámara en el entorno 3D a coordenadas 2D sobre la imagen del minimapa. Esto permitió que un indicador visual en este caso una flecha de color azul rastree en tiempo real la posición y rotación del usuario, como se detalla en la Figura 20.

Figura 20

Sincronización en tiempo real del indicador de posición en el minimapa.



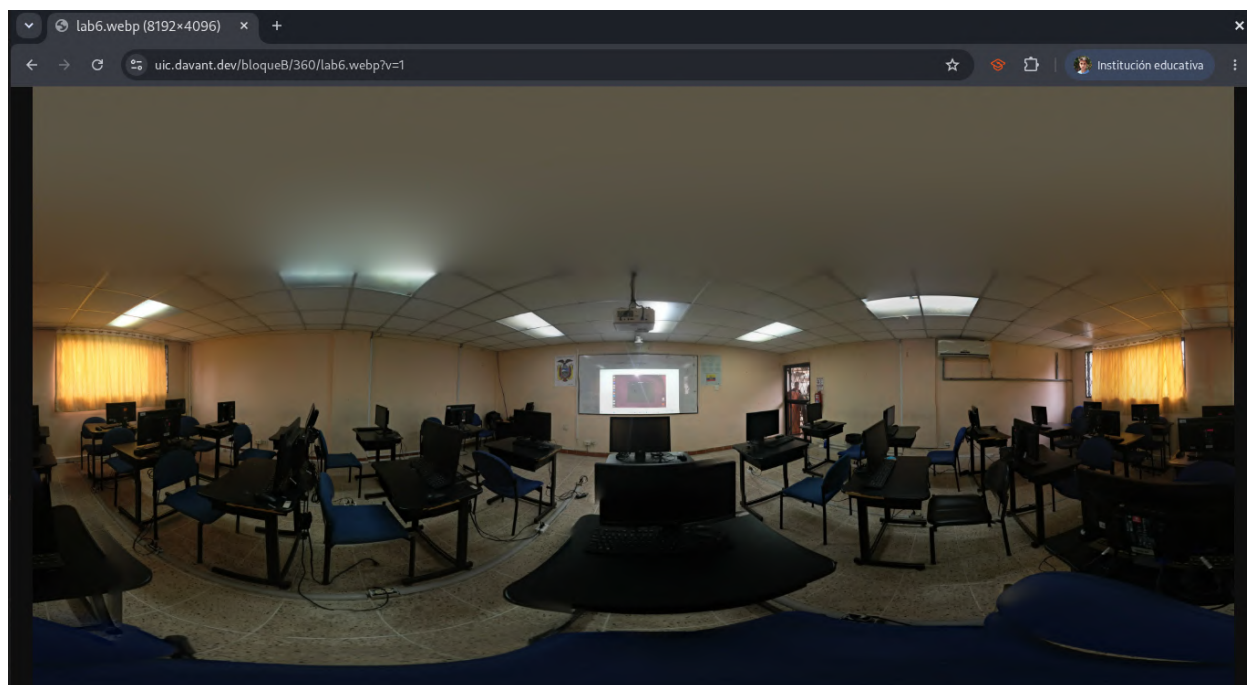
Resultados del Sprint 4

Procesamiento de fotografías 360°:

Se llevó a cabo la postproducción y recorte de las fotografías esféricas obtenidas mediante el dron. La tarea consistió en estandarizar las resoluciones, corregir la exposición, censurar personas y empaquetar las imágenes en formatos optimizados para web (como WebP o JPG progresivo) para reducir el consumo de ancho de banda. La Figura 21 muestra un ejemplo del material fotográfico procesado.

Figura 21

Procesamiento de imágenes esféricas equirectangulares capturadas con dron.

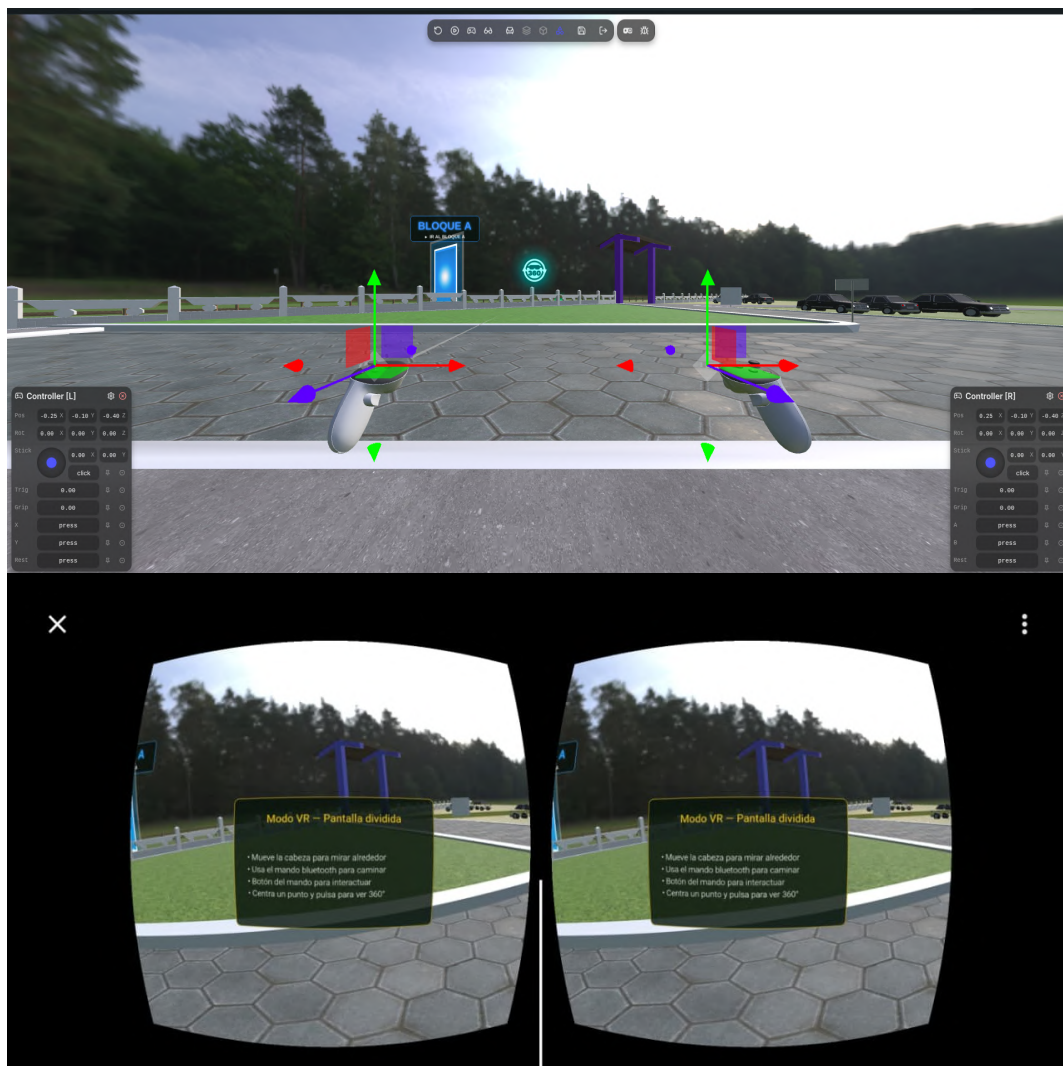


Funcionamiento en gafas VR:

Se hizo compatible el recorrido virtual con la inmersividad que ofrecen las gafas de realidad virtual, la funcionalidad está disponible en teléfonos móviles para que puedan ser usados con un armazón casero como gafas de realidad virtual como también disponible para gafas meta o otro tipo de marca, para poner una captura clara del funcionamiento de las gafas realidad virtual se hizo uso de una extensión de meta (Immersive Web Emulator) tal como se ilustra en la Figura 22.

Figura 22

Funcionamiento de realidad inmersiva en celular y gafas de realidad virtual por medio de la extensión.



Lógica de transición entre modelo 3D y fotografías 360°:

Para conectar el recorrido tridimensional con el contenido fotográfico, se programaron botones de transición. Al activarse, el sistema desactiva temporalmente el renderizado de la malla del edificio GLB y posiciona la cámara dentro del PhotoDome, logrando un intercambio fluido de entornos. En la Figura 23 se observa el elemento de interfaz encargado de esta transición.

Figura 23

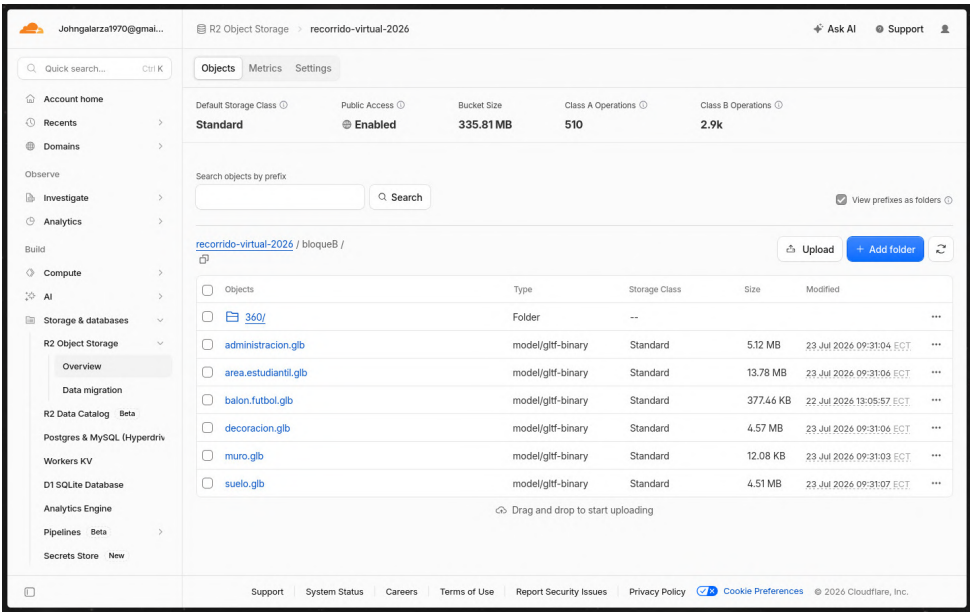
Interfaz y lógica de intercambio entre el entorno tridimensional y fotográfico.



Configuración del almacenamiento en Cloudflare R2:

Se aprovisionó la infraestructura en la nube mediante la creación de un bucket en Cloudflare R2. Se configuraron las políticas de acceso público (CORS) y se estructuraron las carpetas internas para alojar los modelos comprimidos con Draco y el material fotográfico de forma organizada y segura. La Figura 24 evidencia la consola de administración del bucket configurada.

Figura 24
Configuración del bucket de almacenamiento de objetos en Cloudflare R2.

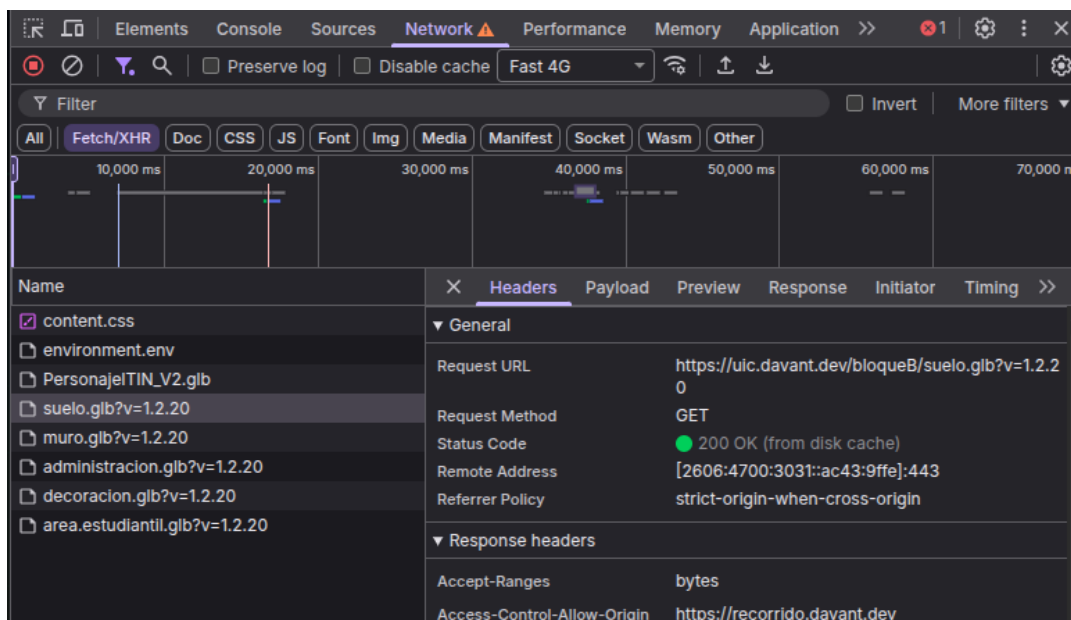


Integración de la red de entrega de contenido (CDN):

Se refactoriza el código fuente de la aplicación para reemplazar las rutas locales de los archivos por los endpoints proporcionados por Cloudflare R2. Esta tarea permitió que los recursos se descarguen de manera asíncrona aprovechando la CDN, lo que redujo significativamente la latencia. En la Figura 25 se muestra el registro de red confirmando la petición externa.

Figura 25

Consumo asíncrono de recursos arquitectónicos a través de la CDN.



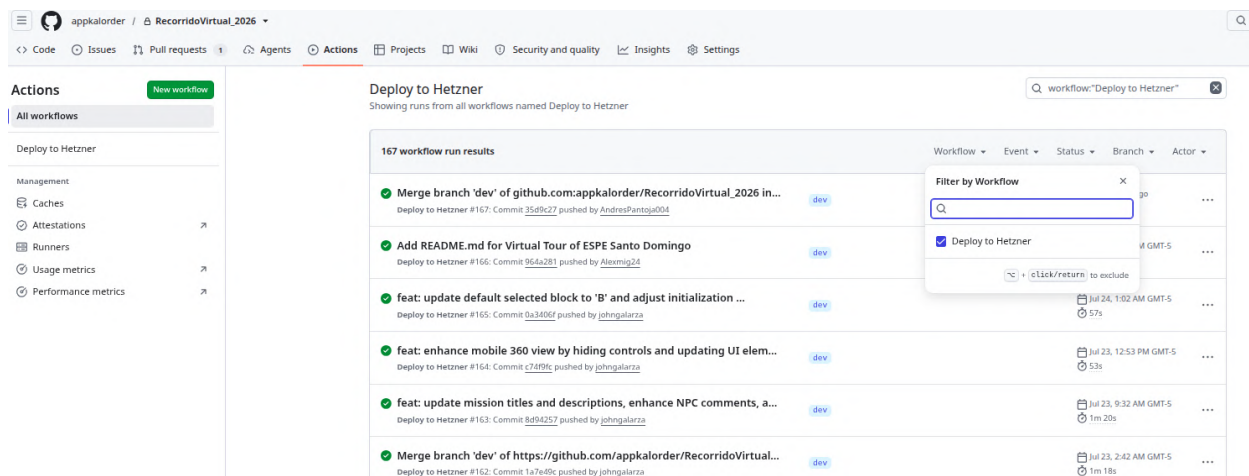
Resultados del Sprint 5

Configuración de flujos de trabajo (Workflows) en GitHub Actions:

Para establecer prácticas de Integración Continua, se redactó un archivo YAML en el repositorio. Este flujo de trabajo se programó para ejecutarse automáticamente ante cada "push" en la rama principal, verificando la integridad del código fuente antes de cualquier paso de despliegue. En la Figura 26 se visualiza el script de configuración del pipeline.

Figura 26

Configuración del pipeline de Integración Continua mediante YAML.

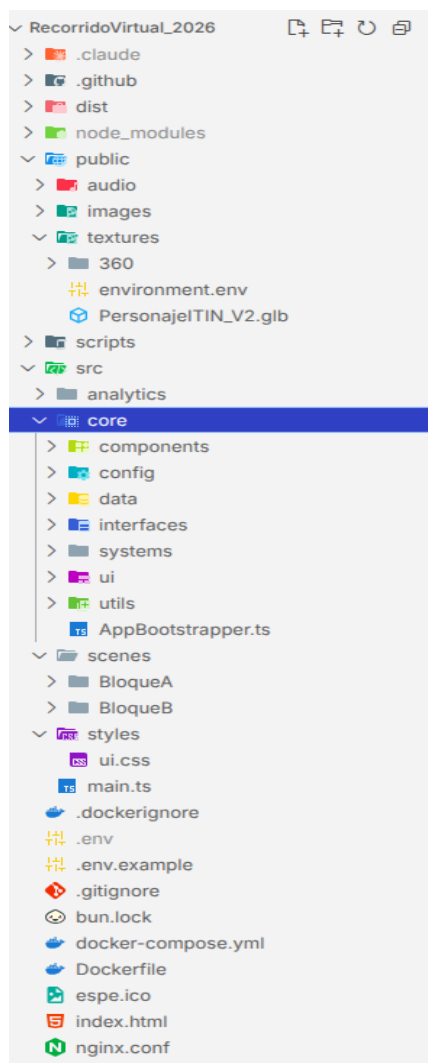


Refactorización y modularización del código fuente:

Se realizó una reestructuración del código del proyecto (Refactoring) para separar las responsabilidades lógicas. Se crearon módulos distintos para la gestión de la interfaz, el motor de renderizado y el control de red, garantizando que el sistema sea escalable en caso de añadir más bloques universitarios en el futuro. La Figura 27 refleja la nueva estructura de directorios del proyecto.

Figura 27

Estructura modular del código fuente del proyecto.



Configuración inicial del soporte WebXR:

Se inicializó el "WebXR Default Experience" nativo de Babylon.js. Esta tarea implicó programar la detección de hardware compatible en el navegador del usuario y generar la interfaz requerida para alternar entre el modo de pantalla plana estándar y el modo de realidad virtual. La Figura 28 muestra el ícono de entrada al entorno XR activado en la interfaz que se encuentra ubicado en la esquina inferior derecha.

Figura 28

Habilitación del componente de acceso a la experiencia WebXR.



Adaptación de controles de navegación dentro del recorrido:

Se configuraron los "teleportation controllers" para permitir el desplazamiento en el recorrido de manera más fácil. Dado que la mayoría que va a entrar a este recorrido no conoce donde quedan ciertos lugares de la universidad se decidió que por medio del mapa aparezcan los puntos más importantes a visitar del recorrido y con solo darle click puedan teletransportarse en la Figura 29 puede observarse como en el mapa me sale que se está seleccionando y como después se teletransporta a ese lugar.

Figura 29

Sistema de teletransportación y navegación por medio del mapa.



Resultados del Sprint 6

Ejecución de pruebas de rendimiento (Desktop):

Se ejecutó un entorno de pruebas controlado en navegadores de escritorio (Chrome/Edge). La tarea consistió en saturar la cámara con movimientos rápidos y medir la respuesta del recolector de basura (Garbage Collector) y el uso de GPU. Se verificó que el uso del algoritmo Draco mantuvo las tasas de cuadros por segundo (FPS) en rangos estables de jugabilidad. En la Figura 30 se presenta el perfilador de rendimiento capturado durante la prueba, las pruebas de rendimiento se explican de manera más detallada al final de la sección de resultados.

Figura 30

Análisis de rendimiento y consumo de recursos en entorno de escritorio.



Pruebas de compatibilidad responsive (Mobile):

Se validó la interfaz de usuario en distintas resoluciones de pantallas móviles. Se implementaron gestos táctiles para rotar la cámara e interactuar con los elementos en pantalla,

comprobando que la aplicación sea accesible mediante smartphones sin pérdida de funcionalidad. La Figura 31 Muestra la vista de la aplicación emulada en un dispositivo móvil.

Figura 31

Validación responsiva y controles táctiles en entorno móvil.



Depuración y resolución de errores:

A partir de los resultados de las pruebas, se corrigieron fallas menores, tales como colisiones defectuosas en ciertas esquinas del modelo y superposición de texto en la interfaz gráfica. Esta fase de estabilización garantiza la calidad del producto final entregable. La Figura 32 evidencia los commits que se llevaban a cabo al finalizar el recorrido.

Figura 32

Commits de depuración para la versión final del recorrido.

Activity

🔍 All branches ▾ 👤 All activity ▾ 👤 All users ▾ 🕒 All time ▾ Showing most recent first	
Merge branch 'dev' of github.com:appkalorder/RecorridoVirtual_2026 in...	...
AndresPantoja004 pushed 2 commits to dev • 964a281...35d9c27 • 13 minutes ago	
Add README.md for Virtual Tour of ESPE Santo Domingo	...
Alexmig24 pushed 1 commit to dev • 0a3406f...964a281 • 3 days ago	
feat: update default selected block to 'B' and adjust initialization ...	...
johngalarza pushed 1 commit to dev • c74f9fc...0a3406f • 6 days ago	
feat: enhance mobile 360 view by hiding controls and updating UI elem...	...
johngalarza pushed 1 commit to dev • 8d94257...c74f9fc • 7 days ago	
feat: update mission titles and descriptions, enhance NPC comments, a...	...
johngalarza pushed 1 commit to dev • 1a7e49c...8d94257 • 7 days ago	
Merge branch 'dev' of https://github.com/appkalorder/RecorridoVirtual...	...
johngalarza pushed 2 commits to dev • a5c408d...1a7e49c • 7 days ago	
Merge branch 'dev' of github.com:appkalorder/RecorridoVirtual_2026 in...	...
AndresPantoja004 pushed 2 commits to dev • f08d756...a5c408d • 7 days ago	
feat: update model reference in BloqueAComponent constructor	...
Alexmig24 pushed 2 commits to dev • 25e5243...f08d756 • 7 days ago	
Merge branch 'dev' of https://github.com/appkalorder/RecorridoVirtual...	...
Alexmig24 pushed 4 commits to dev • 462d761...25e5243 • 7 days ago	
Merge branch 'dev' of github.com:appkalorder/RecorridoVirtual_2026 in...	...
AndresPantoja004 pushed 3 commits to dev • 9dab811...462d761 • 7 days ago	
fix: remove ">>"	...
johngalarza pushed 1 commit to dev • c7e101e...9dab811 • 7 days ago	
Merge branch 'dev' of https://github.com/appkalorder/RecorridoVirtual...	...
johngalarza pushed 2 commits to dev • 5e00775...c7e101e • 7 days ago	
Merge branch 'dev' of https://github.com/appkalorder/RecorridoVirtual...	...

Redacción de la documentación técnica y manuales:

La última tarea abarcó la escritura del archivo README.md en el repositorio. Se documentaron las variables de entorno necesarias, los comandos de Docker para el despliegue local y la arquitectura general del sistema, facilitando la transferencia tecnológica. La Figura 33 muestra el aspecto final de esta documentación.

Figura 33

Documentación técnica y guía de despliegue del proyecto.



Resultados de encuesta para medir usabilidad

Para evaluar la efectividad y satisfacción del recorrido virtual interactivo desarrollado, se aplicó el cuestionario System Usability Scale (SUS) a una muestra de 105 estudiantes de tercer bachillerato del cantón Santo Domingo. Este instrumento, estandarizado y reconocido internacionalmente, permitió obtener una métrica cuantitativa sobre la facilidad de uso, la eficiencia de navegación y la percepción general del sistema. A continuación, se presentan los

resultados obtenidos, desglosados según la interacción y percepción reportada por los usuarios.

Para facilitar la interpretación de los resultados visuales, la Tabla 14 resume las 10 preguntas evaluadas, asignando un identificador corto a cada ítem.

Tabla 14

Descripción resumida de los ítems del cuestionario SUS

Identificador	Descripción del Ítem evaluado	Naturaleza de la pregunta
P1	Frecuencia de uso del sistema	Positiva
P2	Complejidad del sistema	Negativa
P3	Facilidad de uso	Positiva
P4	Necesidad de soporte técnico	Negativa
P5	Integración de funciones	Positiva
P6	Inconsistencias percibidas	Negativa
P7	Curva de aprendizaje	Positiva
P8	Sistema engorroso de usar	Negativa
P9	Confianza al usar el sistema	Positiva
P10	Necesidad de conocimientos previos	Negativa

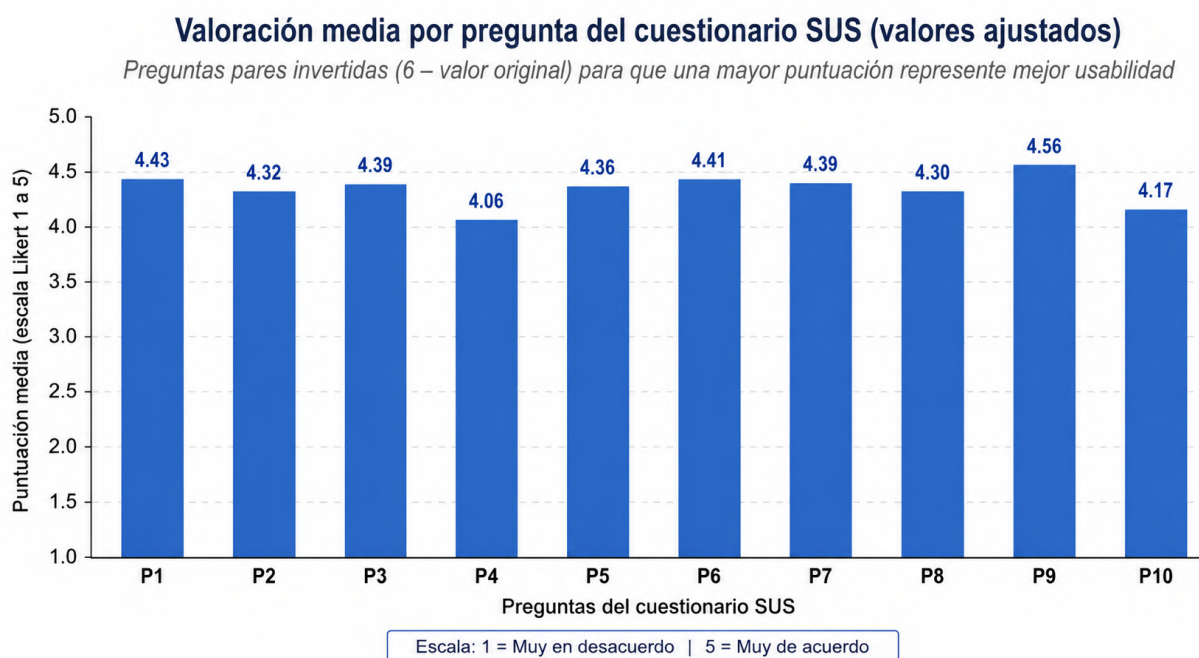
Resultados del cuestionario SUS

El análisis de las respuestas permitió calcular un puntaje promedio de usabilidad global por cada ítem. Cabe destacar que, siguiendo la metodología de estandarización del instrumento SUS, las respuestas correspondientes a las preguntas pares (cuya naturaleza es negativa) fueron invertidas matemáticamente restando el valor original a 6.

Gracias a este ajuste normativo, en la Figura 34 se detalla la distribución de las respuestas donde un valor más alto en la escala de Likert (1 a 5) refleja de manera consistente una mayor facilidad de uso, simplicidad y satisfacción percibida por los usuarios al navegar por el entorno 3D del Bloque B.

Figura 34

Valoración media de preguntas SUS



Puntuación Global de Usabilidad

Una vez procesadas las respuestas de los 105 participantes y aplicadas las reglas de normalización de la escala SUS, se procedió al cálculo de la métrica final. Conforme al estándar de este instrumento, la suma de las puntuaciones ajustadas de cada usuario se multiplicó por 2.5 para convertir la escala original a un porcentaje de 0 a 100.

Tras este cálculo, la aplicación del recorrido virtual obtuvo una puntuación global de 83.48 puntos. Para contextualizar este valor, la Tabla 15 resume los indicadores finales contrastados con los valores de referencia aceptados en la industria para este instrumento.

Tabla 15*Resumen de los resultados obtenidos mediante la evaluación global SUS*

Indicador	Valor obtenido
Participantes evaluados	105
Puntaje Global SUS	83.48
Valor de referencia base	68.00
Categoría de Usabilidad	A (Excelente)
Nivel de aceptación	Superior al promedio

Resultados de Pruebas de Accesibilidad

La evaluación de accesibilidad del entorno tridimensional se fundamentó en las Pautas de Accesibilidad para el Contenido Web (WCAG 2) del W3C. Dada la naturaleza gráfica de la aplicación, cuyo renderizado se ejecuta sobre un elemento <canvas>, los criterios estrictos de alternativas textuales completas para discapacidad visual total no son nativamente aplicables. En consecuencia, el análisis técnico priorizó la optimización de la interfaz superpuesta (DOM), la interacción de los periféricos y la robustez del sistema.

El despliegue de las pautas (Perceptible, Operable, Comprensible y Robusto) se resolvió mediante la integración de controles estándar (WASD y Mouse Look), la compatibilidad de la API de WebXR, el cálculo físico de colisiones para evitar que el usuario escape de los límites geométricos, y el despliegue del aplicativo bajo arquitecturas responsivas. El nivel de cumplimiento normativo se detalla en la Tabla 16.

Tabla 16

Evaluación de accesibilidad del recorrido virtual con base en las pautas WCAG 2

Pauta Principal	Criterio Técnico Considerado	Estado de Cumplimiento
Perceptible	Alternativas textuales para <canvas> / contenido no textual.	No aplica
	Subtítulos y alternativas para contenido multimedia.	No aplica
	Presentación del contenido sin pérdida de información (Responsividad).	Parcial
	Contraste y legibilidad de la interfaz superpuesta (UI).	Cumple
Operable	Accesibilidad de funciones de interfaz mediante teclado.	Cumple
	Tiempos de carga y persistencia de modales informativos.	Cumple
	Prevención de fotogramas que provoquen reacciones fotosensibles.	Cumple
	Soporte multiparadigma (Teclado, Mouse, Gamepad, Touch).	Cumple
Comprensible	Tipografía y arquitectura de la información previsibles.	Cumple
	Restricción de navegación mediante mallas de colisión (Prevención de errores).	Cumple
Robusto	Interoperabilidad cross-browser y compatibilidad con tecnologías de asistencia.	Cumple

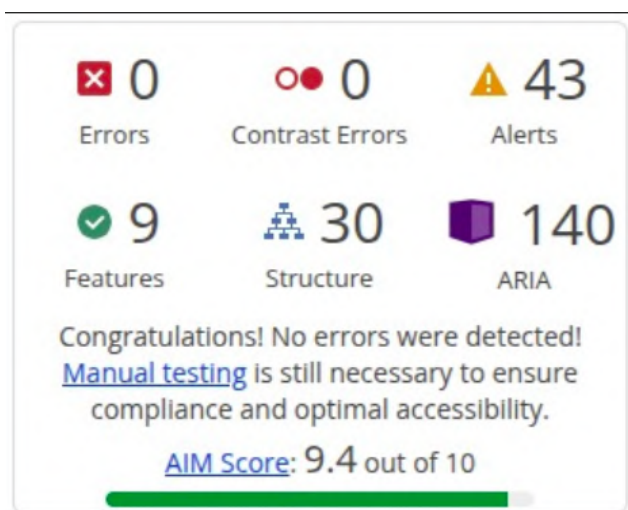
Análisis automatizado del DOM (WAVE)

Para auditar cuantitativamente la estructura de la interfaz que envuelve al recorrido virtual, se ejecutó un escaneo de la estructura HTML empleando la herramienta de evaluación WAVE (Web Accessibility Evaluation Tool).

Como se evidencia en la Figura 35, el análisis estático arrojó cero errores estructurales y cero errores de contraste, demostrando una correcta elección de la paleta de colores institucionales y una codificación semántica limpia en la interfaz de usuario (UI). Se reportaron 43 alertas, las cuales corresponden a advertencias de elementos dinámicos que cambian por interacción mediante JavaScript y no representan fallos críticos de accesibilidad.

Figura 35

Resultados de la evaluación de accesibilidad (WAVE)



Desde el punto de vista de la ingeniería de la interfaz, destacan los 30 elementos estructurales bien definidos y la inyección de 140 atributos ARIA. Esta alta densidad de metadatos ARIA garantiza que los lectores de pantalla puedan interpretar correctamente los botones, modales y menús que controlan el visor 3D. El resultado consolida un AIM Score de 9.4 sobre 10, certificando que el aplicativo cumple rigurosamente con los estándares web

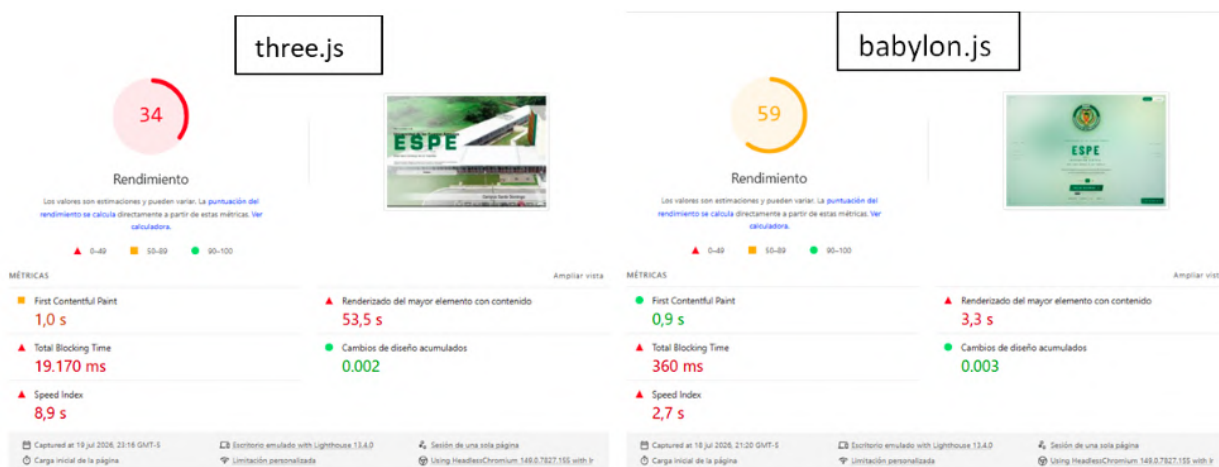
modernos en su capa interactiva 2D, proporcionando el soporte necesario para el despliegue del entorno tridimensional.

Pruebas de Rendimiento

Para evaluar la eficiencia en la carga inicial de la aplicación, se utilizó la herramienta Google PageSpeed Insights. La Figura 36 documenta el contraste entre la versión previa del Bloque B (basada en Three.js) y la nueva propuesta arquitectónica construida sobre Babylon.js. La implementación anterior reflejó deficiencias significativas en el tiempo de renderizado del primer contenido (FCP), debido al manejo secuencial de recursos pesados de forma local. En contraparte, la refactorización actual, apoyada en la descarga asíncrona de los archivos .glb y texturas a través de la CDN de Cloudflare R2, mejoró considerablemente la fluidez de carga. Esta optimización en el pipeline de datos permite que el DOM y la interfaz se construyan y sean interactivos mucho antes de que el motor WebGL termine de compilar los shaders del entorno 3D.

Figura 36

Evaluación del rendimiento de carga inicial mediante Google PageSpeed



Resultados de las pruebas de rendimiento (Bloque B)

La evaluación en tiempo de ejecución (runtime) se ejecutó sobre cuatro configuraciones de hardware distintas, abarcando desde equipos de entrada hasta estaciones de alto rendimiento, con el objetivo de mapear el comportamiento del consumo de memoria y procesamiento:

- Máquina 1 (Gama media): Intel Core i7 de 11.^a generación, gráficos integrados Intel Iris Xe y 8 GB de memoria RAM.
- Máquina 2 (Gama alta): Intel Core i5 de 12.^a generación, NVIDIA GeForce RTX 3060 y 32 GB de memoria RAM.
- Máquina 3 (Entorno de desarrollo): Intel Core i5 de 11.^a generación, NVIDIA GeForce GTX 1650 y 16 GB de memoria RAM.
- Máquina 4 (Gama baja): Intel Celeron N4020, gráficos integrados Intel UHD Graphics 600 y 4 GB de memoria RAM.

En cada equipo se ejecutaron las instancias correspondientes al Bloque B de ambas implementaciones (Three.js vs. Babylon.js). Durante la ejecución se registraron las métricas correspondientes a la tasa de fotogramas por segundo (FPS), porcentaje de uso del procesador (CPU), consumo de memoria RAM y consumo de memoria gráfica (VRAM).

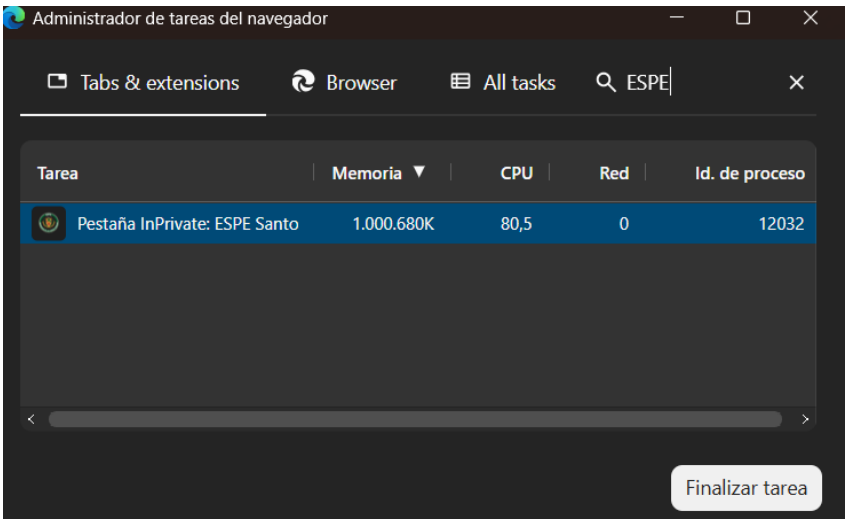
Como evidencia del procedimiento de medición, la Figura 37 muestra el registro obtenido en la Máquina 1, evidenciando la estabilidad del motor gráfico durante la navegación interactiva.

Figura 37
Registro de FPS máquina 1



Respecto al uso de memoria principal, se midió el impacto en los recursos del sistema durante la carga y ejecución de la escena. La Figura 38 ilustra el consumo de memoria RAM registrado en la Máquina 1, reflejando la gestión de los activos cargados dinámicamente.

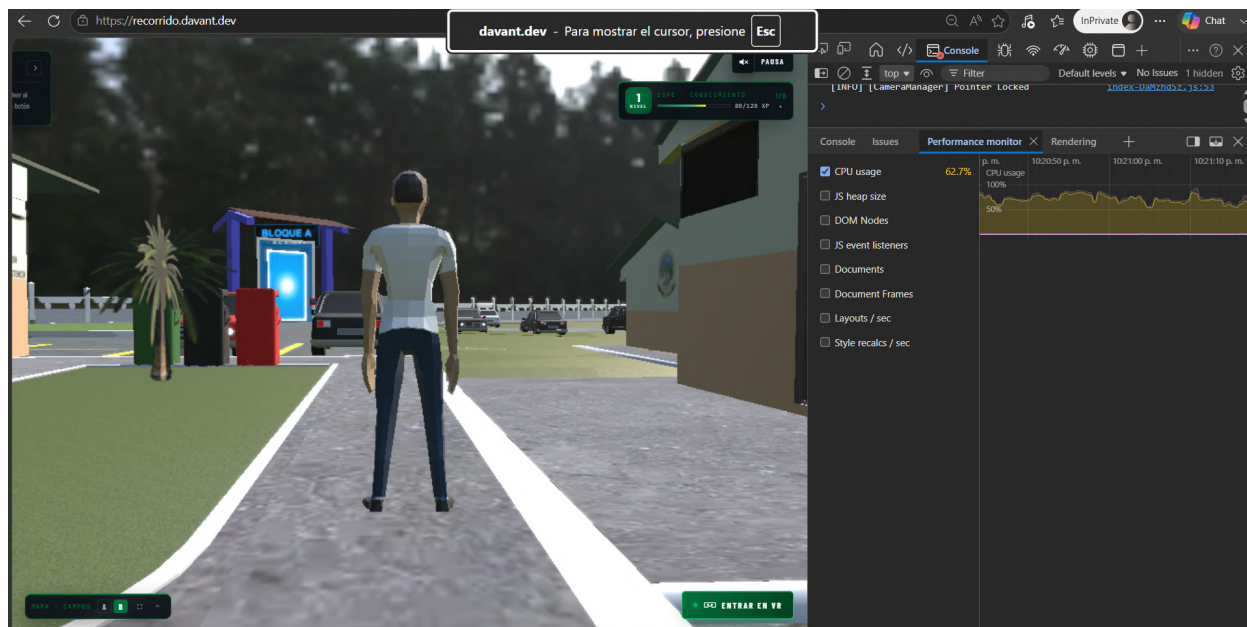
Figura 38
Consumo de memoria RAM en la Máquina 1



Asimismo, se evaluó la carga computacional demandada al procesador central durante el funcionamiento del recorrido. La Figura 39 presenta el registro de utilización del procesador (CPU) en la Máquina 1, demostrando la eficiencia de los procesos de cálculo durante la ejecución de la lógica del entorno.

Figura 39

Registro de la utilización del procesador (CPU) en la Máquina 1



Finalmente, se monitoreó el uso de los recursos gráficos dedicados, los cuales son cruciales para el renderizado de texturas y geometría 3D. La Figura 40 expone el consumo de memoria gráfica (VRAM) registrado en la Máquina 1, validando la optimización de los activos visuales en el entorno.

Figura 40

Registro del consumo de memoria gráfica (VRAM) en la Máquina 1



Posteriormente, los valores obtenidos en las cuatro plataformas de prueba fueron consolidados. La Tabla 17 presenta las métricas registradas en el Bloque B, evidenciando el impacto técnico del cambio de motor gráfico.

Tabla 17

Comparativa de rendimiento del recorrido virtual del Bloque B en diferentes configuraciones de hardware

Equipo	Implementación	FPS	CPU (%)	RAM (MB)	GPU / VRAM
					(MB)
Máquina 1	Three.js (Versión anterior)	49.2	98.0	1498.07	666.5
	Babylon.js (Propuesta actual)	34.0	62.0	1000.68	1107.4
Máquina 2	Three.js (Versión anterior)	180.0	98.0	1738.40	668.7
	Babylon.js (Propuesta actual)	180.0	97.0	1237.40	549.4

Máquina 3	Three.js (Versión anterior)	48.0	98.5	1527.14	3254.2
	Babylon.js (Propuesta actual)	54.0	62.0	1083.60	2662.0
Máquina 4	Three.js (Versión anterior)	20.0	48.0	1765.02	1620.1
	Babylon.js (Propuesta actual)	9.0	45.0	1424.77	2574.1

Análisis Técnico del Rendimiento

Los datos de la Tabla 17 revelan una ventaja arquitectónica fundamental: la implementación actual con Babylon.js logró una reducción drástica y sistemática en el consumo de memoria RAM en el 100% de los escenarios de prueba. Mientras la versión previa del Bloque B saturaba consistentemente por encima de los 1.4 GB de RAM, la nueva arquitectura mantiene el consumo en un rango de 1 GB a 1.2 GB. Esto demuestra un manejo de recursos (Garbage Collection) superior y reafirma la eficiencia de la compresión Draco aplicada a la geometría.

Durante la ejecución en la configuración base de desarrollo con la tarjeta dedicada GTX 1650 (Máquina 3), el motor Babylon.js superó el rendimiento de la versión anterior subiendo de 48 a 54 FPS. Simultáneamente, el estrés del procesador (CPU) se desplomó de un crítico 98.5% a un estable 62%, liberando además casi 600 MB de memoria de video (VRAM).

No obstante, se observa un trade-off (compromiso técnico) en hardware de entrada que carece de gráficas dedicadas (Máquinas 1 y 4). En estos equipos, aunque la nueva versión alivió significativamente el trabajo de la CPU y la RAM principal, la carga de cálculo de colisiones y shaders de Babylon.js incrementó el requerimiento de VRAM compartida. Al depender del chip integrado, esto derivó en una caída en la tasa de fotogramas.

En conclusión, la migración a Babylon.js cumple con creces su objetivo técnico. El sacrificio parcial de fotogramas en hardware de muy bajas prestaciones es el costo esperado por una experiencia más rica, y se compensa ampliamente al eliminar los picos críticos de CPU y RAM que ocasionan inestabilidad y cuelgues en la versión fundamentada en Three.js.

Sistema de métricas de uso

Como funcionalidad adicional, la propuesta añade un bajo acoplamiento módulo de analíticas, en este caso monitorear el comportamiento de uso del recorrido virtual. Esto permitirá, por ejemplo, registrar indicadores de uso, como el número de dispositivos nuevos, el número total de sesiones registradas, tiempo medio de permanencia, frecuencia de acceso a los puntos de interés, frecuencia de acceso a los puntos de interés y frecuencia de acceso a las fotografías panorámicas de 360°. Existiendo así una fuente cuantitativa de información por parte de la institución para elaborar un estudio sobre el uso del recorrido virtual, así como los espacios de mayor interés mostrado por los visitantes.

La información recopilada es presentada en un panel de control con gráficos y métricas para permitir la interpretación visual del comportamiento de uso. Entre los indicadores entregados se encuentran las horas de actividad, número de sesiones por día, semana y mes, así como la distribución de visitas a los diferentes puntos informativos del recorrido. La Figura 41 representa la vista global del panel de métricas leído, donde se visualizan los principales indicadores de uso del sistema.

Figura 41

Panel de métricas generales del recorrido virtual



Por otra parte, la Figura 42 muestra el análisis de interacción con los puntos de interés y las fotografías panorámicas de 360°, permitiendo identificar el comportamiento de los usuarios durante la exploración del recorrido virtual.

Figura 42

Análisis de interacción de los usuarios con el recorrido virtual



Al integrar este módulo se incorpora un nuevo nivel de información que amplía el recorrido virtual en la medida en qué aportará data útil para la toma de decisiones, ya que los datos procesados permiten tener en cuenta cuál es el patrón de navegación, poder determinar cuáles son las franjas horarias de mayor uso, y determinar cuáles serán los espacios que

presentarán un mayor número de consultas realizadas por parte de los usuarios. Este dato puede aportar soporte en la mejora del recorrido virtual, la optimización de los contenidos y la planificación de las estrategias de difusión institucional basadas en la evidencia.

Capítulo V

Conclusiones

El desarrollo el recorrido virtual interactivo 3D del Bloque B de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE de la sede Santo Domingo ha permitido el logro de los objetivos planteados para el proyecto, ya que se han integrado correctamente las tecnologías de modelado 3D y las tecnologías Web3D teniendo el seguimiento de un desarrollo iterativo conforme a la Metodología Ágil Scrum, la implementación de estrategias de optimización gráfica y una evaluación exhaustiva respecto de los indicadores de rendimiento, usabilidad y accesibilidad, de tal manera que se ha brindado soporte a los aspectos técnicos y funcionales del sistema. En base a los resultados obtenidos y a la evaluación técnica realizada se exponen las conclusiones más relevantes que sintetizan la importancia e idoneidad de la actividad de esta manera:

El desarrollo de objetos y espacios tridimensionales en Blender favoreció la representación precisa, fiel y controlada de la infraestructura del bloque B. El desarrollo del algoritmo de compresión geométrica Draco fue de mucha utilidad para conseguir este objetivo, ya que ayudó a reducir el tamaño del archivo un 89.34% comparado al modelo GLB exportado sin el uso de Draco, lo que permitió hacer compatible con el renderizado nativo que maneja babylon.js ofreciendo una carga web optimizada y eficiente para los usuarios finales.

La utilización del motor gráfico Babylon.js validó exitosamente la posibilidad de crear una aplicación web interactiva y modular. Este framework permitió implementar eficazmente los mecanismos de navegación en tiempo real, la gestión de colisiones y la integración de componentes 2D (HUD/Mapas) con la escena 3D, facilitando una exploración inmersiva del Bloque B que responde a las exigencias de una experiencia de usuario moderna y fluida.

Mediante la evaluación realizada utilizando la escala System Usability Scale (SUS) con una muestra de 105 personas de la población seleccionada, se confirmó que el recorrido virtual posee un nivel de usabilidad aceptable y funcional. Las pruebas técnicas de rendimiento demostraron que el recorrido es accesible hasta en dispositivos de gama baja con métricas que son aceptables para el uso normal de los usuarios, con esto se demuestra que el recorrido virtual cumple con su objetivo de servir como plataforma de difusión educativa llegando al máximo de usuarios posibles.

Con la conclusión del recorrido virtual interactivo 3D, se lograron solventar las deficiencias que evidencian los medios digitales estándar y normales de la institución. Este producto final además de favorecer a estudiantes, aspirantes y visitantes para realizar la visita a las instalaciones de la ESPE sede Santo Domingo desde cualquier punto geográfico, sitúa a la universidad como un modelo de adopción de tecnologías inmersivas adecuadas para la divulgación académica, logrando así la meta de modernizar la publicación de su infraestructura.

Recomendaciones

Efectuando la lectura de los resultados disponibles tras la evaluación técnica y funcional del sistema, y con la intención de no solamente asegurar la sostenibilidad de la herramienta, la escalabilidad de la misma y la mejora continua de esta herramienta desarrollada, se relatan las directrices específicas que a continuación se enuncian. Las recomendaciones que se describen a continuación no solo pretenden permitir el aprovechamiento de la operatividad del recorrido virtual, sino que, además, pretenden potenciar el aprovechamiento estratégico del recorrido virtual como recurso clave de difusión institucional dentro de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Dentro de las recomendaciones que se plantean encontramos la recomendación de realizar un cronograma de mantenimiento periódico, en un intervalo de seis meses a partir del inicio de cada ciclo académico de la institución. El mencionado cronograma debe incluir las revisiones y el mantenimiento de los modelos en 3D y de las fotografías en 360° en el caso en

que se efectúe una modificación estructural, una reforma o una transformación importante en la infraestructura física del Bloque B, además de recomendar la realización de un mantenimiento correctivo inmediato en caso se produzca un cambio estructural importante. La sostenibilidad de la herramienta dependerá de que siempre la representación virtual haya de ser un fiel reflejo de la realidad institucional para garantizar la fiabilidad y la funcionalidad del usuario a lo largo del tiempo.

Extraer partido de la arquitectura modular que se ha ido desarrollando a lo largo de la investigación y el hecho de que se puedan integrar nuevos componentes (Bloque C, Bloque D...) sin afectar al núcleo central del sistema, permite dejar abierta la posibilidad de que si la sede sigue en expansión se pueda seguir desarrollando y actualizando el recorrido virtual. Esto permitirá seguir la misma metodología de desarrollo (Scrum) y reusar los servicios del Core (PhysicsManager, AssetLoader) que ya han sido validados en esta investigación.

A fin de potenciar toda la capacidad de la herramienta como elemento de difusión, sería importante incluir el recorrido virtual estratégico en las campañas de Marketing Digital de la propia UFA - ESPE Sede Santo Domingo como también en su web y en la difusión mediante redes sociales o bien mediante códigos QR en material promocional, con el objetivo de que el recorrido cumpla su función de "agente" de difusión las 24 horas ampliando, así, la posibilidad de captar nuevos aspirante.

Se recomienda utilizar el módulo de métricas integrado en el sistema web de administración, diseñado para el seguimiento del comportamiento de navegación de los estudiantes. Esto va a permitir detectar posibles cuellos de botella técnicos o zonas del campus que presenten mayor interés para los aspirantes, facilitando la toma de decisiones que sean informadas sobre futuras mejoras relacionadas ya sea con el rendimiento, ya sea con la experiencia de usuario.

Referencias

- [1] J. Rubio-Tamayo, M. Gértrudix-Barrio, y F. García, «Immersive Environments and Virtual Reality: Systematic Review and Advances in Communication, Interaction and Simulation», *Multimodal Technol Interact*, vol. 1, p. 21, sep. 2017, doi: 10.3390/mti1040021.
- [2] P. Kumar y R. Modi, «DIGITAL MARKETING AND HIGHER EDUCATION», *J. Mod. Manag. Entrep.*, jun. 2025, doi: 10.62823/jmme/15.02.7537.
- [3] D. Mirzoiev, «Approaches to the formation of marketing communications in the context of the digitalization of the educational process in educational institutions», *Ukr. J. Appl. Econ. Technol.*, may 2025, doi: 10.36887/2415-8453-2025-2-58.
- [4] A. D. Samala, M. Ricci, C. Rueda, L. Bojić, F. Ranuharja, y W. Agustiarimi, «Exploring Campus through Web-Based Immersive Adventures Using Virtual Reality Photography: A Low-Cost Virtual Tour Experience», *Int J Online Biomed Eng*, vol. 20, pp. 104-127, ene. 2024, doi: 10.3991/ijoe.v20i01.44339.
- [5] R. Rangari, A. Moharil, A. Yerpude, K. Prajapati, y N. Bhagat, «Development of an Immersive Virtual Campus Tour Using Virtual Reality Technology», *Indian J. Comput. Sci. Technol.*, may 2025, doi: 10.59256/indjcst.20250402017.
- [6] M. Anwar, J. Yang, J. Frnda, A. Choi, N. Baghaei, y M. Ali, «Metaverse and XR for cultural heritage education: applications, standards, architecture, and technological insights for enhanced immersive experience», *Virtual Real.*, vol. 29, mar. 2025, doi: 10.1007/s10055-025-01126-z.
- [7] Suprihartini, Purwoko, W. G. Mulawarman, Nurlaili, y M. Yahya, «Digital Promotion Strategies Utilizing Social Media to Improve the Image of Educational Institutions», *J. Educ. Manag. Res.*, jul. 2025, doi: 10.61987/jemr.v4i3.1055.
- [8] L. F. Aguas, R. Coral, F. Morales, y R. Toasa, «3D Modeling for virtual tour of a Higher Education Institution», en *2022 17th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)*, 2022, pp. 1-5. doi: 10.23919/cisti54924.2022.9820366.
- [9] A. M. Francisco, D. L. M. Fernández, y J. H. Chua, «Diseño, Desarrollo e Implementación de Recorrido Virtual en 3D como Fortalecimiento Académico y Tecnológico en Campus Universitario», *Tecnol. Educ. Rev. CONAIC*, 2021, doi: 10.32671/terc.v6i1.41.
- [10] L. Fuentes, A. F. M. Zabaleta, L. del C. C. Chinchilla, y N. D. Plata, «RECORRIDO VIRTUAL TRIDIMENSIONAL PARA LA UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR», vol. 4, pp. 7-7, 2018.
- [11] K. Lal, «WebGL Rendering: Using Physical-Based Materials and Lighting to Create a Virtual Environment on the Web», *Asian J. Appl. Sci. Eng.*, 2022, doi: 10.18034/ajase.v11i1.60.
- [12] G. Yu *et al.*, «A survey of real-time rendering on Web3D application», *Virtual Real Intell Hardw*, vol. 5, pp. 379-394, 2023, doi: 10.1016/j.vrih.2022.04.002.

- [13] Z. Zhang, J. Xu, X. Shen, H. Zhao, y Y. Niu, «WebGL-based virtual reality technology construction and optimization», vol. 13395, pp. 133951L-133951L-8, 2024, doi: 10.1117/12.3048388.
- [14] C. C. Florez, W. X. Quevedo, F. J. Galora, y R. Toasa, «Performance of WebGL standard for displaying 3D applications on mobile devices», *2021 16th Iber. Conf. Inf. Syst. Technol. CISTI*, pp. 1-6, 2021, doi: 10.23919/cisti52073.2021.9476391.
- [15] H. D. Shah, V. Tupe, A. C. Rathod, S. K. Shaikh, y N. J. Uke, «A Progressive Web App for Virtual Campus Tour», *2021 Int. Conf. Comput. Commun. Green Eng. CCGE*, pp. 1-5, 2021, doi: 10.1109/ccge50943.2021.9776419.
- [16] L. Li, X. Qiao, Q. Lu, P. Ren, y R. Lin, «Rendering Optimization for Mobile Web 3D Based on Animation Data Separation and On-Demand Loading», *IEEE Access*, vol. 8, pp. 88474-88486, 2020, doi: 10.1109/access.2020.2993613.
- [17] Y.-V. Latyshev y H. Vlasiuk, «Research on methods for optimising the performance of VR applications in low-bandwidth browsers», *Technol. Eng.*, 2026, doi: 10.30857/2786-5371.2025.4.3.
- [18] Y. Bobryshev, «Methods of 3D model optimization for real-time applications», *Tech. Sci. Technol.*, 2026, doi: 10.25140/2411-5363-2026-1(43)-105-113.
- [19] I. Hvalina, V. Belyakov, A. Filinskikh, y V. P. Khranilov, «ANALYSIS OF 3D SCENE OPTIMIZATION METHODS IN WEBGL», *Graph. 2024*, 2024, doi: 10.25206/978-5-8149-3873-2-2024-929-933.
- [20] J. Li, J.-W. Nie, y J. Ye, «Evaluation of virtual tour in an online museum: Exhibition of Architecture of the Forbidden City», *PLoS ONE*, vol. 17, 2022, doi: 10.1371/journal.pone.0261607.
- [21] E. Nopawong y R. Praditsangthong, «Quantitative evaluation of a virtual tour navigation system using satisfaction modeling: a case study in Thai cultural tourism», *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, 2026, doi: 10.11591/ijeecs.v41.i2.pp690-699.
- [22] M. K. Othman, A. Nogoibaeva, L. S. Leong, y M. Barawi, «Usability evaluation of a virtual reality smartphone app for a living museum», *Univers. Access Inf. Soc.*, vol. 21, pp. 995-1012, 2021, doi: 10.1007/s10209-021-00820-4.
- [23] J. Ahtik, Ž. Reberšek-Gavrič, y H. G. Tomc, «Evaluating the Impact of 3D Visualizations on Website Usability and User Experience», *Acta Graph.*, 2025, doi: 10.25027/ag.33.3.2.
- [24] D. Carrasco-Beltrán, A. Serrano-Sierra, R. Cuervo, C. Valbuena-Bermúdez, J. A. Pavlich-Mariscal, y C. Granados-León, «Digital Transformation in University Architecture: Optimizing Construction Processes and User Experience through CAMPUS 2.0 at Pontificia Universidad Javeriana», *Buildings*, 2024, doi: 10.3390/buildings14103095.
- [25] G. Rodríguez-Abitia, S. Martínez-Pérez, M. Ramírez-Montoya, y E. López-Caudana, «Digital Gap in Universities and Challenges for Quality Education: A Diagnostic Study in Mexico and Spain», *Sustainability*, 2020, doi: 10.3390/su12219069.

- [26] K. L. Carvajal Araujo y M. S. Castellano Beltrán, «Desarrollo de un recorrido virtual interactivo para la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Santo Domingo, fase 2 y tomas aéreas», Trabajo de Titulación, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Carrera de Ingeniería en Tecnologías de la Información, Santo Domingo, Ecuador, 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/53592>
- [27] S. Azarby y A. Rice, «Understanding the Effects of Virtual Reality System Usage on Spatial Perception: The Potential Impacts of Immersive Virtual Reality on Spatial Design Decisions», *Sustainability*, 2022, doi: 10.3390/su141610326.
- [28] S. Triberti, C. Sapone, y G. Riva, «Being there but where? Sense of presence theory for virtual reality applications», *Humanit. Soc. Sci. Commun.*, vol. 12, 2025, doi: 10.1057/s41599-025-04380-3.
- [29] D. Paes, E. Arantes, y J. Irizarry, «Immersive environment for improving the understanding of architectural 3D models: Comparing user spatial perception between immersive and traditional virtual reality systems», *Autom. Constr.*, vol. 84, pp. 292-303, 2017, doi: 10.1016/j.autcon.2017.09.016.
- [30] Y. Zhang, B. Zhang, W. Jang, y Y. Pan, «Enhancing Spatial Cognition in Online Virtual Museum Environments: Integrating Game-Based Navigation Strategies for Improved User Experience», *Appl. Sci.*, 2024, doi: 10.3390/app14104163.
- [31] P. L. Breves y J.-P. Stein, «Cognitive load in immersive media settings: the role of spatial presence and cybersickness», *Virtual Real.*, vol. 27, pp. 1077-1089, 2022, doi: 10.1007/s10055-022-00697-5.
- [32] X. Liu, T. Wu, W. Xu, y Q. Liu, «Design and Implementation of WebGL Model Rendering Engine», *Sci. J. Intell. Syst. Res.*, 2024, doi: 10.54691/778tvh90.
- [33] M. Alaei y F. Yazdanpanah, «A Survey on Heterogeneous CPU–GPU Architectures and Simulators», *Concurr. Comput. Pract. Exp.*, vol. 37, 2024, doi: 10.1002/cpe.8318.
- [34] Unity, «¿Qué es el recorte de frustum: Definición de recorte de frustum | Unity», *Unity*. 2026. [En línea]. Disponible en: <https://unity.com/es/glossary/frustum-culling>
- [35] Y. Han, C. Xu, X. Ye, W. Bi, Z. Dong, y Y. Ma, «WebSplatter: Enabling Cross-Device Efficient Gaussian Splatting in Web Browsers via WebGPU», *ArXiv*, vol. abs/2602.03207, 2026, doi: 10.48550/arxiv.2602.03207.
- [36] K. Kasian y M. Korpan, «COMPUTER SYSTEM FOR GRAPHICAL VISUALIZATION OF LARGE GEOSPATIAL DATASETS IN BROWSER ENVIRONMENTS USING TILES-ARCHITECTURE AND WEBGPU», *Sci. Pap. Donetsk Natl. Tech. Univ. Ser. Inform. Cybern. Comput. Sci.*, 2026, doi: 10.31474/1996-1588-2026-1-42-127-136.
- [37] A. Rodríguez, P. L. García, J. S. Marquerie, R. Marques, y J. Blat, «A Cross-Platform, WebGPU-Based 3D Engine for Real-Time Rendering and XR Applications», *Proc. 30th Int. Conf. 3D Web Technol.*, 2025, doi: 10.1145/3746237.3746305.
- [38] Y. Han, W. Bi, R. An, D. Tian, Q. Yang, y Y. Ma, «GL2GPU: Accelerating WebGL Applications via Dynamic API Translation to WebGPU», *Proc. ACM Web Conf. 2025*, 2025, doi: 10.1145/3696410.3714785.

- [39] T. Kosch, J. Karolus, J. Zagermann, H. Reiterer, A. Schmidt, y P. W. Woźniak, «A Survey on Measuring Cognitive Workload in Human-Computer Interaction», *ACM Comput. Surv.*, vol. 55, pp. 1-39, 2023, doi: 10.1145/3582272.
- [40] J. Bernikas, R. Holder, T. Kokkiniotis, y M. Gilardi, «Enhancing Web3D Accessibility in Cultural Heritage: An Eye-Controlled 3D Model Viewer», en *2025 International Conference on Software, Knowledge, Information Management & Applications (SKIMA)*, 2025, pp. 1-6. doi: 10.1109/skima66621.2025.11155855.
- [41] J. Brooke, «SUS: a retrospective», *J. Usability Stud. Arch.*, vol. 8, pp. 29-40, 2013.
- [42] Y. Kryvyich, Y. Ziabina, y M. Trejtak, «Digital Communication Channels of Higher Education Institutions: Bibliometric Analysis», *Econ. Sustain. Bus. Pract.*, 2025, doi: 10.21272/esbp.2025.4-02.
- [43] M. B. Garcia, D. M. Mansul, E. B. Pempina, M. R. L. Perez, y R. T. Adao, «A Playable 3D Virtual Tour for an Interactive Campus Visit Experience: Showcasing School Facilities to Attract Potential Enrollees», en *2023 9th International Conference on Virtual Reality (ICVR)*, 2023, pp. 461-466. doi: 10.1109/icvr57957.2023.10169768.
- [44] World Wide Web Consortium (W3C), «Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.2». 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.w3.org/TR/WCAG22/>
- [45] R. Hartson, «Cognitive, physical, sensory, and functional affordances in interaction design», *Behav. Inf. Technol.*, vol. 22, pp. 315-338, 2003, doi: 10.1080/01449290310001592587.
- [46] Babylon.js Team, «Babylon.js Documentation». 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doc.babylonjs.com/>
- [47] Blender Foundation, «Blender Manual». 2025. [En línea]. Disponible en: <https://docs.blender.org/manual/en/latest/>
- [48] Google, «Draco 3D Data Compression». 2024. [En línea]. Disponible en: <https://google.github.io/draco/>
- [49] D. Eberly, *3D game engine design: a practical approach to real-time computer graphics*. CRC Press, 2006.
- [50] K. M. Kapp, *The Gamification of Learning and Instruction*. Pfeiffer, 2012.
- [51] ISO, «ISO 9241-11:2018 Ergonomics of Human-System Interaction — Usability». International Organization for Standardization, 2018.
- [52] B. Fanini, D. Ferdani, y E. Demetrescu, «Temporal Lensing: An Interactive and Scalable Technique for Web3D/WebXR Applications in Cultural Heritage», *Heritage*, vol. 4, pp. 710-724, 2021, doi: 10.3390/heritage4020040.
- [54] Diario La Hora, «Más de 9.000 estudiantes se graduarán en Santo Domingo», La Hora. Accedido: 27 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.lahora.com.ec/santodomingo/Mas-de-9.000-estudiantes-se-graduaran-en-Santo-Domingo-20250131-0018.html>

- [55] J. Scharager y P. Reyes, «Muestreo no-probabilístico», 2001, [En línea]. Disponible en:
https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/31715755/muestreo-libre.pdf?1392395541=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DMetodologia_de_la_Investigacion_Escuela.pdf&Expires=1785215127&Signature=OTI6MJBvmw4bq-v6hU18DVCxAcB23hNAfl-mP0RuoTKuwGXeZ4eL~xxm1Ly5xIN5D-PT80urHUxgKphcfPJNG1AetUalG75jssi~iEa0IBLL1SSgcvFmw69cCDdNx4QaOX9Od4Wt85e~7UcHn7Q7snEycRrBQ4QDImBjpNuD8MsiQqJUVJ8bDsSKOU8XSi8adc~rRCWt3LR9LgBzofe0VhejP~DVa-BHAb2NFMSPxBPn7xeYcfWeAruOY8ViGUTqaJunfIFvln4FxZW9hAmiv11~RSs7q5ct65dvFKWnLgv8hpmANC1OEKiAWq1OXnAF9C4AvdIKuoiO44tqQPJRQ__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA