UNIVERSIDAD DE TALCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN DESARROLLO DE VIDEOJUEGOS Y REALIDAD VIRTUAL

SIG en 3D interactivo para la visualización y simulación de acuíferos

ÁLVARO MONSALVE

Profesor Guía: BENJAMIN INGRAM

Memoria para optar al título de
Ingeniero en Desarrollo de Videojuegos y Realidad Virtual

Talca – Chile
Agosto, 2026

UNIVERSIDAD DE TALCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN DESARROLLO DE VIDEOJUEGOS Y REALIDAD VIRTUAL

SIG en 3D interactivo para la visualización y simulación de acuíferos

ÁLVARO MONSALVE

Profesor Guía: BENJAMIN INGRAM

Profesor Informante: NICOLÁS BARRIGA

Memoria para optar al título de
Ingeniero en Desarrollo de Videojuegos y Realidad Virtual

El presente documento fue calificado con nota: _____

Talca – Chile

Agosto, 2026

Dedicado a mis padres que se esfuerzan todos los días por mis hermanos y por mí.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos al profesor Benjamin, por la paciencia y la motivación en cada reunión.

TABLA DE CONTENIDOS

página

Dedicatoria i

Agradecimientos ii

Tabla de Contenidos iii

Índice de Figuras vii

Índice de Tablas viii

Resumen x

1. Introducción 1

1.1. Motivación para el desarrollo 3
1.2. Objetivos: 3
1.3. Hipótesis 4
1.4. Pregunta de investigación 4

2. Estado del arte 6

2.1. Herramientas 6
2.1.1. SIG Especializados 6
2.1.2. Modeladores hidrogeológicos 7
2.2. Visualización interactiva y motores de videojuegos aplicados a la ciencia 8
2.2.1. Visualización Interactiva Geotécnica 9
2.2.2. Groundwater Visualisation System 9
2.3. Educación y divulgación ambiental 10
2.3.1. Experimentos de ciencia virtuales 10
2.4. En resumen 10

3. Marco Teórico 12

3.1. Bases de datos espaciales y procesamiento de información geoespacial 12
3.2. De PostGIS a Unity 13
3.2.1. Simplificación de geometrías espaciales 14

3.3. Visualización interacción de datos 3D 14
3.4. Modelos discretos para simulación espacial 15

4. Métodos **17**
4.1. Metodología usada 17
4.2. Herramientas y entorno de desarrollo 18
4.3. Diseño del sistema 19
4.3.1. Alcance 19
4.3.2. Requerimientos 20
4.3.3. Casos de uso 20
4.4. Arquitectura 21
4.4.1. Componentes 22
4.4.2. Flujo de interacción 23
4.4.3. Contratos 24
4.5. Decisiones de diseño e implementación 24
4.6. Implementación del sistema 26

5. Resultados y validación **28**
5.1. Estrategia de validación 28
5.1.1. Objetivos de la validación 28
5.1.2. Alcance de las pruebas 29
5.1.3. Criterios de aceptación 29
5.2. Diseño de los casos de prueba 29
5.3. Ejecución de los casos de prueba 30
5.3.1. Prueba 1: Carga de un acuífero 30
5.3.2. Resultados 31
5.3.3. Discusión 32
5.4. Evaluación por usuarios 33
5.4.1. Objetivo 33
5.4.2. Dirección 33
5.4.3. Alcance 34
5.4.4. Participantes 34
5.4.5. Instrumento de evaluación 34
5.4.6. Resultados 35

5.4.7. Discusión . . . 38
5.5. Conclusión . . . 38
5.5.1. Aportes . . . 39
5.5.2. Trabajos futuros . . . 39

Glosario **41**

Bibliografía **44**

A: Links **47**

B: Marco Teórico **48**

C: Diseño de software **50**
C.1. Especificación de requerimientos . . . 50
C.2. Casos de uso: . . . 52
C.2.1. Actores: . . . 52
C.2.2. Casos de uso: . . . 52
C.3. Diagramas de interacción . . . 58
C.4. Contratos . . . 61
C.5. Componentes críticos . . . 64
C.5.1. Lectura de datos(Api): . . . 64
C.5.2. Recepción de datos(ApiRequest): . . . 65
C.5.3. Procesado de datos(GeometryProcessor) . . . 66
C.5.4. Generación de elementos(SceneRenderer) . . . 68
C.5.5. Simulación hidrológica . . . 69
C.5.6. Interactividad(CameraController) . . . 71

D: Validación técnica del sistema **73**
D.1. Casos de prueba . . . 73
D.2. Evidencias de los casos de prueba . . . 77
D.2.1. CP-01 Carga de acuífero . . . 77
D.2.2. CP-02 Generación de malla tridimensional del acuífero . . . 78
D.2.3. CP-03 Renderizado del modelo tridimensional en Unity . . . 79
D.2.4. CP-04. Simulación hidrológica del acuífero . . . 79
D.2.5. CP-05 Desplazamiento del usuario en el entorno tridimensional 80

E: Cuestionario de usabilidad usuarios **81**

E.1. Cuestionario de usabilidad 81

E.1.1. Perfil 81

E.1.2. Comprensión inicial de la información 83

E.1.3. Uso de GeoVein 85

E.2. Evaluación de usabilidad y comprensión espacial 91

E.3. Resultados de Cuestionario de usabilidad Perfil 97

E.4. Resultados de Cuestionario de usabilidad Comprensión inicial 99

E.5. Resultados de Cuestionario de usabilidad uso de GeoVein 101

E.6. Resultados de Cuestionario de usabilidad Evaluación de usabilidad y comprensión espacial 105

E.7. Resultados de Cuestionario de usabilidad preguntas abiertas 110

E.8. Carta de consentimiento 115

ÍNDICE DE FIGURAS

página

4.1. Arquitectura 21
4.2. Diagrama de componentes 23
4.3. Entrada y salida del componente de APIRequest 26
4.4. Entrada y salida de datos 27

B.1. Tipos de datos espaciales soportados por PostGIS. 49

C.1. Carga de acuíferos. 58
C.2. Carga del modelo 3D. 59
C.3. Control de cámara. 59
C.4. Limpieza de escena 60
C.5. Ejecutar simulación hidrológica. 60

D.1. Evidencia del caso de prueba 1. 77
D.2. Evidencia del caso de prueba 2. 78
D.3. Registro del modelo tridimensional de los objetos. 79
D.4. Registro del modelo tridimensional de los objetos. 79
D.5. Evidencia del caso de prueba 3. 80

E.1. Imagen referencial de GIS en 2D. 84
E.2. Instructivo del ejecutable. 86
E.3. Resultados del perfil de participantes: preguntas 1 a 4. 97
E.4. Resultados del perfil de participantes: preguntas 5 a 8. 98
E.5. Resultados del perfil de participantes. 99
E.6. Resultados de la sección uso de GeoVein: preguntas 1 a 6. 101
E.7. Resultados de la sección uso de GeoVein: preguntas 7 a 13. 102
E.8. Resultados de comprensión espacial: preguntas 1 a 6. 105
E.9. Resultados de comprensión espacial: preguntas 7 a 12. 106
E.10. Resultados de comprensión espacial: preguntas 13 a 18. 107
E.11. Resultados de comprensión espacial: preguntas 19 a 24. 108
E.12. Resultados de comprensión espacial: preguntas 25 a 27. 109

ÍNDICE DE TABLAS

página

4.1. Componentes principales del sistema. 22

5.1. Caso de prueba CP-01. Carga de un acuífero desde la base de datos. . 30
5.2. Resumen de resultados de los casos de prueba. 31

C.1. Requerimientos funcionales 50
C.1. Requerimientos funcionales 51
C.2. Requerimientos no funcionales 51
C.2. Requerimientos no funcionales 52
C.3. Caso de Uso 1: Cargar datos geoespaciales 52
C.4. Caso de Uso 2: Visualizar modelo 3D de acuífero 53
C.5. Caso de Uso 3: Navegar por la escena 3D 54
C.6. Caso de Uso 4: Limpiar escena 55
C.7. Caso de Uso 5: Ejecutar simulación hidrológica 56
C.8. Contrato funcional CON.1 - Consulta de datos de acuífero 61
C.9. Contrato funcional CON.2 - Solicitud de datos desde Unity 62
C.10. Contrato funcional CON.3 - Procesamiento geométrico 62
C.11. Contrato funcional CON.4 - Generación de elementos en escena . . . 63
C.12. Contrato funcional CON.5 - Simulación hidrológica 63
C.13. Contrato funcional CON.6 - Interacción del usuario 64

D.1. Caso de prueba CP-01. Carga de un acuífero desde la base de datos. . 73
D.2. Caso de prueba CP-02. Generación de la malla tridimensional del acuífero. 73
D.3. Caso de prueba CP-03. Renderizado del modelo tridimensional en Unity. 74
D.4. Caso de prueba CP-04. Simulación hidrológica del acuífero. 75
D.5. Caso de prueba CP-05. Desplazamiento del usuario en el entorno tridimensional. 75

E.1. Preguntas del instrumento de validación parte 1: Perfil. 81
E.2. Preguntas del instrumento de validación parte 2: Comprensión inicial de la información. 84

E.3. Tareas del instrumento de validación parte 3: Instrucciones de ejecución. 86
E.4. Preguntas del instrumento de validación parte 2: Comprensión inicial de la información. 88
E.5. Preguntas del instrumento de validación parte 4: Evaluación de usabilidad y comprensión espacial. 91
E.6. Preguntas del instrumento de validación parte 4: Evaluación de usabilidad y comprensión espacial. 92
E.7. Preguntas del instrumento de validación parte 4: Evaluación de usabilidad y comprensión espacial. 93
E.8. Preguntas del instrumento de validación parte 4: Evaluación de usabilidad y comprensión espacial. 94
E.9. Preguntas del instrumento de validación parte 4: Evaluación de usabilidad y comprensión espacial. 95
E.10. Preguntas del instrumento de validación parte 4: Evaluación de usabilidad y comprensión espacial. 96
E.11. Con sus palabras, describa qué entiende de la relación entre los elementos. 100
E.12. 8. Puede mencionar qué elementos aparecen, cómo se relacionan o qué información le resultó más clara. 103
E.13. 14. Describa brevemente qué entendió de la simulación y qué aspecto le pareció más claro o más confuso. 104
E.14. 1. Que fue lo más claro o útil de GeoVein. 110
E.15. 2. ¿Qué fue lo más difícil o confuso al utilizar GeoVein? 111
E.16. 3. ¿Qué elementos logró comprender mejor usando GeoVein en comparación con la imagen 2D inicial? 112
E.17. 4. ¿Qué cambios o mejoras propondría para facilitar el uso de la herramienta? 113
E.18. 5. Con sus palabras, describa qué entendió sobre la relación espacial entre el acuífero, el terreno y los elementos asociados. 114

RESUMEN

El agua subterránea es un recurso fundamental para el consumo humano, la agricultura y la industria. En Chile, en el contexto de la megasequía que afecta a la zona central y norte, la gestión de acuíferos resulta crítica para la sostenibilidad económica y ambiental. Sin embargo, al ser estructuras hidrogeológicas subterráneas e «invisibles», existe una alta barrera de comprensión técnica que dificulta la comunicación entre profesionales del área, tomadores de decisiones y la comunidad.

Para resolver esta limitación, en este trabajo se presenta *GeoVein*, un Sistema de Información Geográfica en tres dimensiones (SIG 3D) interactivo diseñado sobre el motor de videojuegos Unity y respaldado por una base de datos espacial PostgreSQL/PostGIS. El sistema integra datos geoespaciales reales (modelos digitales de elevación y geometrías tridimensionales) y un módulo de simulación de flujo superficial y subsuperficial basado en reglas.

El proyecto beneficia directamente a profesionales en gestión hídrica, educadores y tomadores de decisiones no expertos, ofreciéndoles una herramienta interactiva capaz de reducir la complejidad de la interpretación espacial y mejorar la comprensión de la dinámica de recarga y extracción en acuíferos. Evaluaciones de usabilidad mediante pruebas de usuario demostraron que el prototipo mejora significativamente la percepción y comprensión de la distribución espacial hídrica en comparación con mapas 2D tradicionales, validando el uso de motores de videojuegos como plataformas de simulación e integración de datos geoespaciales.

1. Introducción

El 25 de septiembre de 2015, los líderes mundiales adoptaron 17 objetivos globales como parte de una nueva agenda de desarrollo sostenible. Dentro de estos objetivos se encuentra el Objetivo de Desarrollo Sostenible número 6 (ODS 6), el cual busca garantizar la disponibilidad del agua, su gestión sostenible y el saneamiento para todos. Dentro de sus metas, se destaca la importancia de proteger y restablecer los ecosistemas relacionados con el agua, incluyendo bosques, montañas, humedales, ríos, lagos y acuíferos. Estos últimos tienen un rol fundamental debido a que permiten almacenar agua y abastecer actividades como el consumo humano, la agricultura, la industria y la generación de energía.

A pesar de que gran parte del planeta está cubierta por agua, solo una pequeña parte corresponde a agua dulce disponible para el uso humano. Según el USGS, aproximadamente el 3,46 % del agua del planeta corresponde a agua dulce, la cual se encuentra distribuida principalmente entre capas de hielo, glaciares, nieves permanentes y aguas subterráneas [1]. Dentro de esta distribución, las napas subterráneas toman especial importancia debido a que representan una de las principales reservas de agua dulce, permitiendo el abastecimiento humano, el riego agrícola y el mantenimiento de distintos ecosistemas [2].

Esta importancia se vuelve aún más relevante en zonas afectadas por la escasez hídrica. En Chile, desde el año 2010, los territorios comprendidos entre la región de Coquimbo y La Araucanía han experimentado un déficit de precipitaciones cercano al 30 %, fenómeno denominado como "megasequía" [3]. Esta situación ha afectado la disponibilidad del recurso hídrico, generando impactos en actividades económicas que dependen directamente del agua, como la agricultura y la minería.

Las napas subterráneas son una fuente de agua fundamental para la economía chilena, especialmente en zonas donde las precipitaciones son escasas o irregulares.

En la agricultura, permiten mantener el riego de cultivos y representan una de las principales fuentes de extracción de agua del país [4]. Mientras que en la minería, principalmente en la zona norte, son utilizadas en distintos procesos asociados a la extracción y procesamiento de minerales [5]. Debido a esto, una correcta gestión de las aguas subterráneas resulta fundamental para asegurar la continuidad de estas actividades.

Sin embargo, a pesar de su importancia, los acuíferos suelen permanecer invisibles para gran parte de la población debido a que se encuentran bajo la superficie y presentan una alta complejidad en su comportamiento [6]. Esta característica dificulta su representación y comprensión, especialmente para personas que no poseen conocimientos especializados sobre el funcionamiento de estos sistemas.

Frente a esta problemática, el uso de tecnologías interactivas como los motores de videojuegos y las herramientas de visualización tridimensional (3D) surge como una alternativa para representar información espacial de una manera más accesible. Motores como Unity y Unreal, utilizados principalmente en la industria del entretenimiento, también han comenzado a utilizarse en áreas como simulación, educación y visualización científica, debido a su capacidad para crear ambientes interactivos.

En este contexto, desarrollar un Sistema de Información Geográfica tridimensional (SIG 3D) enfocado en la visualización de acuíferos permite generar nuevas formas de representar información relacionada con los recursos hídricos. Este trabajo propone el desarrollo de *GeoVein*, un sistema interactivo que integra datos geoespaciales y modelos tridimensionales para representar características asociadas a las napas subterráneas en un entorno basado en un motor de videojuegos.

A través del desarrollo de *GeoVein*, este trabajo aporta en tres ámbitos clave:

1. **Integración tecnológica e interoperabilidad:** Se propone e implementa una arquitectura desacoplada que conecta una base de datos espacial (PostgreSQL/PostGIS) con el motor de videojuegos Unity, permitiendo el procesamiento y renderizado dinámico de modelos de elevación y estructuras hidrogeológicas subterráneas.

2. **Simulación e interacción en tiempo real:** Se desarrolla un módulo de simulación basado en reglas que permite a los usuarios interactuar de forma intuitiva con la dinámica de los acuíferos, facilitando la visualización de procesos como la recarga y flujo de aguas subterráneas.

3. **Reducción de la barrera de aprendizaje:** Se evalúa empíricamente la efectividad del sistema mediante pruebas de usuario, demostrando que la representación 3D interactiva mejora la comprensión espacial de fenómenos subterráneos en comparación con los métodos de representación bidimensional tradicionales.

1.1. Motivación para el desarrollo

Las principales motivaciones que dan como resultado este proyecto son: la divulgación científica, el cuidado del medioambiente, la pasión por los videojuegos y entornos 3D). La motivación surge a partir de la observación de los cambios ambientales experimentados en la región del Maule; la sequía es ya una realidad, los incendios son más comunes, producto del cambio climático, y la forestación de árboles no nativos provoca transformaciones en la región. Sobre los acuíferos, una vez trabajando con mi padre, mientras construíamos una cabaña en zona pre cordillerana, observamos cómo en el terreno aledaño una máquina realizaba pozos de agua; el interés surge al notar que esta práctica es más común de lo habitual. Al averiguar que estos ecosistemas son sobreexplotados, llegando al punto de que el volumen de uso es mayor que la recarga natural, surge la necesidad de desarrollar herramientas que permitan comprender, visualizar y divulgar de manera clara e interactiva el estado de los acuíferos, contribuyendo así a su manejo sostenible y a la concienciación ambiental usando tecnologías como Unity y C# para dar el paso a visualización interactiva.

1.2. Objetivos:

El objetivo general: Desarrollar un sistema de información geográfica tridimensional interactivo para la visualización y simulación simplificada de fenómenos relacionados con recursos hídricos, integrando datos geoespaciales.

Para ello se definieron los siguientes objetivos específicos:

1. Desarrollar un prototipo interactivo en un motor de videojuegos de alto nivel, integrando datos geoespaciales en un entorno tridimensional navegable.

2. Implementar un SIG en 3D que permita la visualización y simulación de acuíferos.

3. Implementar una simulación interactiva simplificada para apoyar la visualización y comprensión de fenómenos relacionados con los recursos hídricos

1.3. Hipótesis

Es posible desarrollar SIG 3D interactivo para la visualización y simulación de acuíferos, integrando datos geoespaciales, para mejorar la comprensión espacial de su comportamiento.

1.4. Pregunta de investigación

La hipótesis presentada anteriormente nos da la siguiente idea:

«*Es posible desarrollar un SIG 3D interactivo para la visualización y simulación de acuíferos, integrando datos geoespaciales, para mejorar la comprensión espacial de su comportamiento.*»

A partir de ella se pueden rescatar tres ideas centrales que nos ayuda generar hitos importante dentro del desarrollo estos son:

1. Integrar datos geoespaciales.

2. Implementar un SIG en 3D que permita la visualización y simulación de acuíferos.

3. Mejorar la comprensión espacial de acuíferos.

Estos tres hitos dan origen a las preguntas de investigación que guían el desarrollo del proyecto. La respuesta a cada una de ellas constituye evidencia para validar la hipótesis.

1. ¿Es posible integrar datos geoespaciales en Unity?

2. ¿Es posible implementar un SIG 3D para la visualización y simulación de acuíferos utilizando Unity?

3. ¿La solución desarrollada contribuye a mejorar la comprensión espacial de los acuíferos?

2. Estado del arte

La visualización de los acuíferos cobra relevancia en el estudio de estos ecosistemas, ya que permite evaluar, analizar y comprender su comportamiento. Esto proporciona a autoridades y líderes la información necesaria para gestionar los recursos hídricos de manera sostenible, evitando su sobreexplotación y contaminación. Los acuíferos son fundamentales tanto para el consumo humano como para sectores estratégicos de la economía, como la agricultura y la minería, lo que resalta la importancia de contar con herramientas que faciliten su observación y comprensión.

2.1. Herramientas

Para que lo anterior sea posible, es necesario contar con herramientas capaces de modelar y visualizar sistemas hidrogeológicos. En la actualidad, existen diversas alternativas que lo hacen posible, las cuales varían según el enfoque del usuario. Estas soluciones se adaptan a distintas necesidades, ya sea para estudios técnicos, planificación de recursos o divulgación científica. En el siguiente apartado se presenta una revisión de las principales herramientas disponibles para la visualización y modelado de acuíferos.

2.1.1. SIG Especializados

Existen diversos programas que permiten la integración de bases de datos geoespaciales, comúnmente conocidos como Sistemas de Información Geográfica (SIG). En el mercado existen varias alternativas que permiten la integración y modelado tanto en 2D como en 3D. Para este contexto, los SIG especializados son herramientas que no se enfocan directamente en la modelación de acuíferos, aunque estos si

incluyen extensiones y técnicas que nos permitirán crear un modelo del ecosistema, su función principal está dirigida a ser una multi herramienta.

ArcGIS Pro

ArcGIS Pro es un Sistema de información geográfica, desarrollado por la empresa Esri, es un software que permite la visualización, análisis y gestión de datos geoespaciales tanto en 2D, 3D y también 4D. Este programa permite diversas herramientas para la creación de mapas, modelado espacial y análisis de información geográfica. ArcGIS Pro permite generar modelos 3D mediante el uso de escenas 3D y herramientas como *Scene Layer* o *Voxel Layer*, que dan la posibilidad de representar volúmenes subterráneos a partir de raster o perforaciones. Este software permite modelar y representar acuíferos a través de capas de información subterránea, simula flujos y recarga del agua. Facilita el análisis espacial y temporal del recurso hídrico. Sin embargo, para su uso es necesario un conocimiento especializado, es de paga y su enfoque no es directamente la modelación de acuíferos, para ello es necesario utilizar y comprender como configurar las extensiones[7].

QGIS(Quantum GIS)

Software libre y de código abierto de Sistemas de Información Geográfica (SIG) que permite crear, visualizar, editar y analizar información geo espacial en 2D y 3D. Soporta múltiples formatos de datos y cuenta con una amplia variedad de complementos para ampliar sus funcionalidades. QGIS permite representar capas subterráneas, mapas de recarga y descarga de acuíferos a través de complementos, es una herramienta versátil para el análisis de sistemas de aguas y de uso gratuito, sin embargo, al igual que ArcGIS para su uso es necesario conocimiento previo, presenta limitaciones en las visualizaciones en 3D, además que algunos complementos requieren configuraciones avanzadas, y para realizar simulaciones sobre los ecosistemas hidrogeológicos dependen de extensiones de terceros[8].

2.1.2. Modeladores hidrogeológicos

En segundo lugar, existen herramientas que se enfocan directamente al modelado y visualización 3D de acuíferos, estos se basan específicamente en realizar cálculos

para estimar el tamaño, las dimensiones, el flujo y la recarga natural del agua y dar una perspectiva mucho más precisa de un acuífero.

MODFLOW

MODFLOW es un modelador de flujo que basa su cálculo de modelación en diferencias finitas. Consiste en un código fuente que resuelve ecuaciones para estimar los flujos de agua subterráneas. Hoy en día es un estándar para el cálculo y modelación de acuíferos, en la actualidad existen algunas interfaces gráficas para MODFLOW e investigadores aportan a mejorar a esta herramienta, sin embargo, MODFLOW no es un sistema de información geográfica, y a pesar de que permite modelar el flujo de agua subterránea de forma precisa, su visualización resulta limitada, requiere interfaces técnicas y de conocimientos previos para su uso [9].

FEFLOW

FEFLOW es un software especializado en la simulación de flujo subterráneo, transporte de calor. Utiliza el método de los elementos finitos para representar de forma precisa la geometría y las propiedades de los acuíferos, permitiendo modelar sistemas complejos en 2D o 3D. Es ampliamente empleado en estudios hidrogeológicos avanzados, gestión de recursos hídricos y evaluación de contaminación del subsuelo[10].

No es un Sistema de Información Geográfica (SIG), sin embargo, puede importar y exportar información geográfica desde programas SIG (como ArcGIS o QGIS) mediante formatos estándar. Su uso requiere conocimientos técnicos avanzados y es un software comercial de licencia de pago. FEFLOW es una herramienta robusta para la simulación físico-numérica del flujo subterráneo, aunque su enfoque técnico y su falta de integración directa con SIG o entornos de visualización interactiva.

2.2. Visualización interactiva y motores de videojuegos aplicados a la ciencia

A pesar de los avances en modeladores de acuíferos y en SIG, la visualización científica de los acuíferos aún presenta limitaciones en términos de interactividad, rendimiento y accesibilidad. Es por ello que comienzan a explorarse tecnologías y

avances realizados con motores de videojuegos como Unity o Unreal, capaces de brindar entornos inmersivos y de alto rendimiento gráfico aplicados a ciencias.

2.2.1. Visualización Interactiva Geotécnica

Geotechnical Interactive Visualization (GIV) es una herramienta interactiva de simulaciones geotécnicas a gran escala desarrollada en Unity, en donde los autores, con este producto, permiten una visualización interactiva y eficiente de simulaciones numéricas complejas. Su objetivo fue resolver cuatro desafíos principales: la redundancia de datos en simulaciones paralelas, el tamaño masivo de los datos, la necesidad de una interacción fluida y la portabilidad del sistema. El sistema se estructura en dos partes: el procesamiento de datos, el cual se encarga de fusionar los dominios de simulaciones paralelas, eliminar datos fantasmas (redundancia), comprimir la información y normalizar las mallas; y un módulo de visualización interactiva, optimizado mediante *shaders* personalizados, reutilización de objetos gráficos y acceso eficiente a archivos binarios. Sus resultados muestran mejoras significativas en rendimiento y eficiencia respecto a herramientas tradicionales como ParaView, Tecplot y VisIt, permitiendo una visualización fluida incluso en dispositivos portátiles[11].

Este trabajo demuestra el potencial de los motores de videojuegos como Unity, para **software** de visualización científica interactiva, puesto que logran un resultado que permite unir el alto rendimiento gráfico con grandes datos para realizar simulaciones interactivas.

2.2.2. Groundwater Visualisation System

Los autores de este documento desarrollaron el Groundwater Visualisation System (GVS), una plataforma que integra y visualiza información hidrogeológica tridimensional mediante animaciones temporales. GVS constituye un referente en la visualización de acuíferos, su enfoque es la representación de datos preprocesados o resultados de simulaciones externas (como MODFLOW o FEFLOW), sin realizar cálculos dinámicos propios del flujo subterráneo [12].

Es un buen referente porque marca la pauta de diferencia entre este proyecto y GVS porque la intención de este proyecto es incorporar un componente de simulación interactiva, permitiendo observar el comportamiento del acuífero bajo distintas condiciones ambientales (variaciones de recarga o extracción, contaminantes, etc). Esto

cambia el enfoque porque combina la integración de datos SIG con la visualización 3D en tiempo real, ampliando las capacidades de análisis y exploración más allá de la representación estática de GVS.

2.3. Educación y divulgación ambiental

2.3.1. Experimentos de ciencia virtuales

Sistema de visualización interactiva en 3D del campo magnético con fines educativos, integrando técnicas de simulación y visualización científica mediante el motor Unity. El sistema permite manipular imanes y observar en tiempo real la distribución del campo magnético, lo que ofrece una experiencia inmersiva. Puesto que los resultados son positivos al evaluar la herramienta con un curso de primaria, esto da peso al potencial que tienen las visualizaciones interactivas [13].

2.4. En resumen

Los SIG (ArcGIS, QGIS) son herramientas potentes para integrar datos espaciales y crear visualizaciones 2D/3D, pero no están diseñados para simular acuíferos, dependen de extensiones y requieren experiencia técnica considerable. Los modeladores hidrogeológicos (MODFLOW, FEFLOW) permiten cálculos precisos del flujo subterráneo, pero carecen de entornos de visualización interactiva avanzados y sus interfaces pueden ser complejas o limitadas. Los motores de videojuegos como Unity demuestran, a través de trabajos como GIV, que es posible integrar grandes volúmenes de datos científicos en entornos interactivos de alto rendimiento, superando limitaciones de herramientas tradicionales. En el ámbito educativo y de divulgación, el uso de estos motores mejora la comprensión de fenómenos complejos, lo que evidencia su potencial para la visualización ambiental e hidrogeológica. Proyectos como GVS muestran avances en visualización de acuíferos, pero se enfocan en datos estáticos, sin simulación dinámica en tiempo real.

Existe una brecha entre herramientas de modelación precisa y herramientas para la visualización 3D interactiva.

Por lo tanto, existe una oportunidad real para desarrollar una herramienta que:

- Integrar y gestionar datos geoespaciales almacenados en PostGIS para construir

un modelo espacial 3D del acuífero.

- Presente visualización 3D.
- Permita la simulación interactiva 3D con cambio de parámetros en tiempo real.

3. Marco Teórico

En el siguiente capítulo se aborda los elementos y teorías necesarias para el desarrollo de un sistema de información geográfica(SIG). Para llevar a cabo esta misión es necesario considerar los siguientes conceptos como parte del desarrollo para la creación del sistema. Debido a que el estudio combina datos geoespaciales, modelos matemáticos de flujo subterráneo y visualización 3D interactiva, es necesario revisar primero las bases teóricas que sustentan cada uno de estos componentes.

Estos conceptos sientan la base y el fundamento conceptual que sustenta las decisiones metodológicas y tecnológicas desarrolladas en los capítulos posteriores.

3.1. Bases de datos espaciales y procesamiento de información geoespacial

Para poder llegar a simular acuíferos primero es necesario contar con datos e información como antecedentes topográficos, geológicos, hidrogeológicos y parámetros de calidad y dinámica del agua subterránea. PostGIS permite centralizar esta información en una base de datos espacial, soportando tanto datos vectoriales, como datos raster (modelos digitales de elevación). PostGIS es una extensión de PostgreSQL, el cual es es un sistema gestor de bases de datos relacional de código abierto, reconocido por su estabilidad, robustez y capacidad de manejar grandes volúmenes de datos [14]. PostGIS, que agrega soporte para almacenar y manipular datos geoespaciales, convierte a PostgreSQL en una base de datos geoespacial capaz de manejar geometrías como puntos, líneas y polígonos [15]. PostGIS facilita la integración de datos geoespaciales; sin ella, el almacenamiento y la manipulación de este tipo de datos se vuelve más compleja.

PostGIS integra varios tipos de datos geoespaciales. Estos tipos de datos existen debido a que los fenómenos geográfico del mundo real poseen distintas representaciones geométricas, es así que estos elementos pueden ser representados de distintas formas. Los datos de tipo discretos se integran en geometrías vectoriales como por ejemplo: puntos, lineas, poligonos. Geometrías tridimensionales como: Pozos de profundidad, superficies de terrenos. Datos que representan valores distribuidos continuamente sobre un espacio; datos ráster, modelos de elevación. B.1

El sistema requiere integrar información topográfica, geológica, pozos de monitoreo y parámetros de calidad de agua. Estos datos de estudio no los genera el software, si no, que se trabaja a partir de información geoespacial que proviene de fuentes oficiales, instituciones públicas o privadas y consultoras que se especializan en hidrogeología. Los datos se entregan en un formato estándar, lo que permite que sean importados y normalizados en PostGIS[15]. PostGIS es una extensión de PostgreSQL que permite almacenar, consultar y analizar datos geoespaciales. Para que los datos externos puedan ser usados en PostGIS, deben ser cargados en tablas que tengan tipos espaciales (punto, líneas, polígono, raster) y un SRID definido[15]. Para que esto sea posible, es importante trabajar con el lenguaje de programación Python, ya que cuenta con varias librerías como: psycopg2[16], SQLAlchemy + GeoAlchemy2[17], pandas + GeoPandas[18] y Shapely[19]. Utilidades que permiten importar archivos estandarizados a las estructuras de datos espaciales en PostGIS.

PostGIS provee funciones de procesamiento espacial que permiten realizar análisis necesarios para los estudios hidrogeológicos, entre estas operaciones se encuentran las consultas espaciales, la intersección entre capas vectoriales, el análisis de relaciones topológicas y la extracción de información desde datos raster [15]. Estas capacidades permiten integrar información de distintas fuentes y escalas, generando recursos que son utilizados en procesos de análisis y visualización.

3.2. De PostGIS a Unity

El puente entre PostGIS y Unity corresponde a una capa de procesamiento implementada en C#, en primer lugar viene integrado con Unity, cuenta con características como:

- Tipado fuerte.

- Buen rendimiento.
- Librerías maduras para PostgreSQL
- Compatibilidad con Unity

La conexión entre C# y PostgreSQL/PostGIS se realiza mediante Npgsql[20], que es el controlador oficial de PostgreSQL para .NET. Además, para interpretar geometrías espaciales en C#, se utiliza NetTopologySuite, una librería que implementa la especificación OGC para manejar objetos geoespaciales (puntos, polígonos, líneas, etc.). Esto permite que C# convierta las geometrías provenientes de PostGIS (como WKT o GeoJSON) en estructuras internas para manipularlas, analizarlas o enviarlas a Unity. La simulación requiere datos espaciales provenientes de PostGIS, y C# actúa como el puente que transforma estos datos en un formato apto para ser utilizado en los modelos numéricos.

3.2.1. Simplificación de geometrías espaciales

La visualización de datos geoespaciales debido al alto nivel de detalle puede generar problemas de rendimiento, esto porque algunos tipos de datos como polígonos pueden contener una gran cantidad de vértices que los componen, con la simplificación se busca reducir la cantidad de vértices, manteniendo una representación visual similar a la original y disminuyendo su complejidad computacional [21]. Los algoritmos de simplificación permiten eliminar vértices que bajo ciertos criterios son considerados poco relevantes. Entre los algoritmos utilizados para este propósito se encuentra el algoritmo de simplificación de Visvalingam-Whyatt (VW), el cual determina la importancia de cada vértice mediante el área del triángulo formado por puntos consecutivos de la geometría. Los puntos con menor contribución geométrica son eliminados progresivamente hasta alcanzar el nivel de simplificación requerido [22].

3.3. Visualización interacción de datos 3D

Un motor de videojuegos puede definirse como un marco de desarrollo que proporciona herramientas para la creación de videojuegos, incluye un motor gráfico para renderizar gráficos 2D y 3D, un motor de físicas para simular leyes y detección de

colisiones, además de herramientas para crear animaciones y sistemas de videojuegos [23]. Unity es adecuado para la visualización interactiva, ya que permite representar información compleja en entornos tridimensionales. Una de las principales ventajas de Unity es que utiliza C# como lenguaje de programación. Con C#, es posible manipular directamente los modelos 3D, implementar interacciones, conectar con bases de datos externas y crear algoritmos para la visualización y de datos geoespaciales. El uso de un motor de videojuegos en aplicaciones científicas se justifica por su capacidad gráfica, la integración de *shaders*, texturas e iluminación, y la posibilidad de construir escenas tridimensionales.

Un modelo de visualización 3D consiste en representar digitalmente entornos u objetos en tres dimensiones mediante coordenadas espaciales. Los elementos representados pueden ser superficies, estructuras o volúmenes. Una malla 3D es una estructura formada por vértices, aristas y caras; es el formato más común para visualizar formas complejas en 3D[24]. Mientras que un volumen 3D, es representado a través de *voxels*, divide el espacio en pequeños cubos donde cada uno almacena valores o propiedades del elemento a graficar[25].

Para llevar esta información desde la base de datos hacia el entorno 3D, es necesario convertir las coordenadas almacenadas a coordenadas de Unity. Para ese proceso los datos deben organizarse en estructuras de datos, tal como matrices, arreglos de datos de coordenadas y valores. Esta forma de trabajo es muy usado en visualización interactiva, donde las grillas permiten definir superficie y volumen[26].

La interacción entre el usuario y el modelo se fundamenta en los principios de *visual analytics*, disciplina que combina visualización interactiva y análisis para facilitar la comprensión de datos complejos. En el ámbito de los modelos científicos, las técnicas de interacción como rotación, zoom, movimiento en el espacio y activación de capas permiten explorar fenómenos desde distintos ángulos, escalas y niveles de detalle, potenciando la percepción espacial y el descubrimiento de patrones [23]. En este trabajo, estas técnicas se aplican para permitir al usuario inspeccionar el modelo del acuífero de manera intuitiva.

3.4. Modelos discretos para simulación espacial

Para la generación de una simulación hidrológica no siempre es necesario utilizar modelos físicos complejos como la Ley de Darcy, la cual describe el movimiento del

agua en medios porosos y permite estimar la velocidad y dirección del flujo dentro de un acuífero [27]. Estos modelos requieren parámetros específicos del sistema, como propiedades hidráulicas del suelo y condiciones de frontera, lo que aumenta la complejidad de su implementación.

Como objetivo de proyecto se busca representar visualmente el comportamiento del agua sobre una superficie tridimensional, por lo que se utiliza una aproximación simplificada basada en reglas espaciales. En este enfoque, fenómenos como la acumulación y desplazamiento del agua pueden representarse mediante una discretización del terreno, donde las condiciones de cada zona determinan la evolución del flujo.

La representación computacional de fenómenos espaciales requiere transformar espacios continuos en estructuras discretas que sean procesables. Una aproximación común consiste en dividir el espacio en una malla de celdas, donde cada elemento posee información asociada y evoluciona mediante reglas definidas según la interacción con sus vecinos [28]. Los autómatas celulares permiten modelar estos sistemas mediante estados y reglas de transición locales, generando comportamientos complejos a partir de interacciones simples.

En el contexto de la representación del terreno, los modelos digitales de elevación (DEM) permiten representar la superficie terrestre mediante estructuras raster, donde cada celda almacena un valor correspondiente a la elevación del terreno. Esta estructura matricial facilita el procesamiento y análisis espacial, además de permitir la generación de superficies tridimensionales a partir de los valores almacenados [29].

Una forma de establecer la relación espacial entre las celdas corresponde al uso de vecindades. En particular, la vecindad de ocho direcciones, también conocida como vecindad de Moore, considera las celdas ubicadas en las direcciones horizontal, vertical y diagonal respecto a una celda central. Este modelo permite determinar relaciones de proximidad y desplazamiento dentro de una estructura matricial, siendo utilizado en áreas como procesamiento de imágenes, análisis espacial y simulaciones basadas en celdas [30].

4. Métodos

Este capítulo describe la metodología utilizada para el desarrollo del sistema de GeoVein, el proceso de implementación incremental, la arquitectura de la solución, las principales herramientas desarrolladas y se presentan las decisiones de diseño.

GeoVein es un Sistema de Información Geográfica 3D desarrollado en Unity cuya finalidad es facilitar la visualización y comprensión espacial de información relacionada con acuíferos. El sistema integra datos geoespaciales que vienen de PostGIS para generar modelos tridimensionales interactivos e incorpora una simulación simplificada basada en reglas que permite representar fenómenos asociados al comportamiento del agua. En las siguientes secciones se describe el diseño, implementación y validación del sistema. Se puede acceder al software desde el proyecto en GitHub hasta el archivo descargable en Google Drive A.

4.1. Metodología usada

Programación extrema(XP): Es una metodología de desarrollo ágil que busca adaptarse rápidamente a los cambios de requerimientos [31]. Esta metodología tiene prácticas o valores muy concretos, sin embargo, para este caso solo algunas prácticas serán consideradas y otras no. Las cuales son:

1. **Pequeñas entregas**: iteraciones cortas con avances visibles.
2. **Integración continua** subir cambios frecuentemente al repositorio.
3. **Re-factorización continua**: Proceso que consiste de reorganizar, simplificar o mejorar el código.

4. **Diseño simple**: Construir el diseño más sencillo posible que permita que el sistema funcione.

5. **Estándares de codificación**: Reglas, convenciones y buenas prácticas que definen cómo debe escribirse el código dentro de un proyecto

Para la planificación y estructuración del proyecto se consideró inicialmente el marco conceptual de Extreme Programming (XP), dado su enfoque en el desarrollo iterativo y la flexibilidad ante cambios técnicos. Sin embargo, dada la naturaleza del proyecto, el marco no fue implementado en sus prácticas operativas formales. En su lugar, el proceso se estructuró en un **flujo de desarrollo iterativo lineal por hitos**, centrado en resolver los desafíos de integración técnica de manera incremental:

1. **Fase de Integración de Datos:** Configuración de PostGIS y desarrollo del servicio API para la extracción de capas vectoriales y ráster.

2. **Fase de Procesamiento y Gráficos:** Implementación de la lógica de triangulación, simplificación de mallas y renderizado 3D en Unity.

3. **Fase de Experimentación y Pruebas:** Evaluación técnica de componentes y pruebas de interacción con usuarios voluntarios.

4.2. Herramientas y entorno de desarrollo

El desarrollo del sistema se realizó utilizando herramientas orientadas al desarrollo de aplicaciones tridimensionales y al procesamiento de información geoespacial.

- **Motor de desarrollo:** Unity fue utilizado para implementar el entorno tridimensional, administrar escenas y visualizar la información geoespacial de forma interactiva.

- **Lenguaje de programación:** El sistema fue desarrollado en C#, utilizado para implementar la lógica de la aplicación y la interacción con el usuario.

- **Base de datos:** PostgreSQL junto con la extensión PostGIS fueron utilizados para almacenar y gestionar la información geoespacial.

- **Comunicación:** La conexión entre el sistema y la base de datos se realizó mediante una API, utilizando la biblioteca Npgsql para el acceso a PostgreSQL.

- **Librerías:** Se utilizó LibTessDotNet para la triangulación de polígonos y la generación de mallas tridimensionales.
- **Diagramas:** Los diagramas fueron elaborados con Draw.io.
- **Control de versiones:** Se utilizó Git junto con GitHub para el control y respaldo del código fuente.

4.3. Diseño del sistema

Esta sección describe el proceso de desarrollo del sistema, incluyendo el alcance definido a partir de la hipótesis, los requerimientos funcionales y no funcionales, las iteraciones de implementación y los principales ajustes realizados durante la construcción del prototipo.

4.3.1. Alcance

Qué abarca el sistema

- Visualización 3D de datos hidrogeológicos.
- Carga de DEM, acuíferos, cuencas y lagos.
- Interacción con elementos del mapa.
- Consulta visual de información.
- Simulación hidrológica básica.

Qué no abarca el sistema

- Simulación hidrológica físicamente completa.
- Predicción científica validada.
- Sistema productivo para uso institucional.
- Edición avanzada de datos geoespaciales.

4.3.2. Requerimientos

El sistema nace desde la necesidad de un software que permita integrar datos geoespaciales almacenados en PostGIS para construir modelos 3D de acuíferos y que permita la simulación interactiva. A partir del problema identificado, se realizó una descomposición de la necesidad general del sistema en requerimientos funcionales y no funcionales que se encuentran en AnexoC.1 C.2. Los requerimientos a grandes rasgos son:

Requerimientos funcionales

- El sistema debe permitir la conexión y lectura de datos geoespaciales desde una base de datos PostGIS.
- El sistema debe generar representaciones tridimensionales de acuíferos a partir de los datos obtenidos.
- El sistema debe permitir la visualización interactiva del modelo 3D.

Requerimientos no funcionales

- El sistema debe mantener un rendimiento adecuado para la visualización en tiempo real.
- El sistema debe ser extensible para incorporar nuevos tipos de datos geoespaciales.
- El sistema debe ser modular para facilitar su mantenimiento y reutilización de componentes.

4.3.3. Casos de uso

A partir de requerimientos se elaboraron un conjunto de casos de uso que puede revisar en el Anexo C.3 que permitió identificar las principales interacciones entre el usuario y el sistema, definiendo el comportamiento esperado de cada situación de uso definiendo responsabilidades.

4.4. Arquitectura

La arquitectura del sistema se organiza en tres bloques principales: el cliente Unity, el servicio de datos y la base de datos geoespacial. Unity concentra la interfaz de usuario y la lógica de visualización, mientras que la API actúa como capa intermedia para acceder a la información almacenada en PostgreSQL/PostGIS. El procesamiento geométrico, la simulación hidrológica y el renderizado se implementan mediante componentes especializados que colaboran para generar y representar el modelo tridimensional del acuífero.

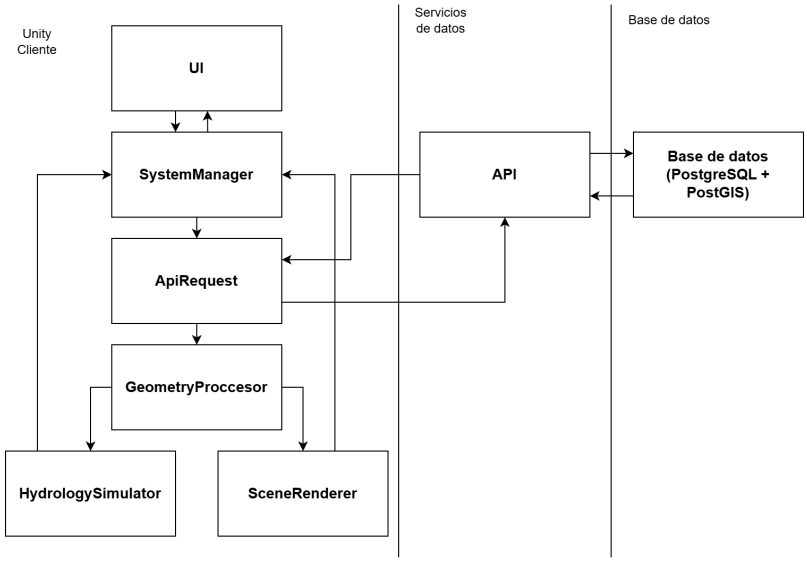


Figura 4.1: Arquitectura

4.4.1. Componentes

Componente	Responsabilidad
`API`	Realiza las consultas a la base de datos PostGIS y entrega la información a Unity.
`ApiRequest`	Solicita la información a la API, la deserializa y la transforma en objetos utilizados por el sistema.
`GeometryProcessor`	Procesa las geometrías mediante simplificación, normalización, triangulación y generación de mallas.
`SceneRenderer`	Instancia y renderiza los objetos procesados dentro de la escena de Unity.
`HydrologySimulator`	Ejecuta la simulación hidrológica sobre los modelos tridimensionales generados.
`CameraController`	Controla el movimiento de la cámara maneja entradas y reacciona al uso del usuario.
`SystemManager`	Componente principal que se encarga de la interacción UI con el resto de componentes.

Tabla 4.1: Componentes principales del sistema.

La Figura 4.2 presenta el diagrama de componentes del sistema GeoVein, el cual resume la organización de los principales módulos y las dependencias existentes entre ellos. La arquitectura sigue un flujo de procesamiento, en dónde se trata de demostrar la dependencia de cada componente sobre otro.

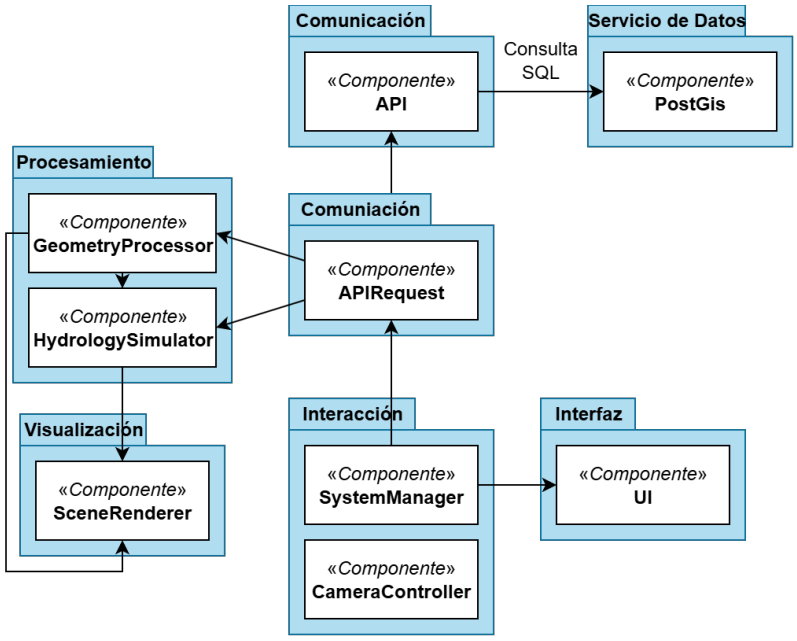


Figura 4.2: Diagrama de componentes

4.4.2. Flujo de interacción

Los diagramas de secuencia permiten representar la interacción entre los distintos componentes del sistema durante la ejecución de las principales funcionalidades. A diferencia de los casos de uso, estos diagramas muestran el orden en que se intercambian los mensajes entre los objetos y cómo colaboran para cumplir una determinada tarea.

Los principales flujos representados son::

- **Carga de acuíferos:** representa el proceso mediante el cual el usuario selecciona un acuífero, se realiza la consulta a la API, se obtienen los datos desde la base de datos y se procesan las geometrías para su posterior representación en el entorno tridimensional C.1.

- **Carga del modelo 3D:** describe el flujo de generación de la escena, donde las geometrías procesadas son convertidas en objetos tridimensionales y renderizadas dentro del entorno desarrollado en Unity C.2.

- **Control de cámara:** muestra la interacción entre el usuario y el sistema para

realizar operaciones de navegación, como desplazamiento, rotación y acercamiento de la vista sobre el modelo tridimensional C.3.

- **Limpieza de escena:** representa el proceso de eliminación de los objetos cargados previamente, permitiendo liberar recursos y preparar el entorno para la visualización de un nuevo acuífero C.4.
- **Ejecutar simulación hidrológica**: Describe el flujo de interacción sobre la ejecución de la simulación, C.5.

4.4.3. Contratos

Con el fin de mantener una comunicación consistente entre los componentes del sistema, se definieron contratos que especifican las operaciones ofrecidas por cada módulo, los parámetros de entrada, los datos retornados y las responsabilidades asociadas a cada interfaz. Estos contratos permiten desacoplar la implementación interna de los componentes, facilitando su reutilización, mantenimiento y futura extensión. Los contratos se encuentran en Anexo C.8.

4.5. Decisiones de diseño e implementación

Durante el desarrollo del sistema se adoptaron distintas decisiones de diseño con el objetivo de satisfacer los requerimientos no funcionales definidos para el proyecto, particularmente aquellos relacionados con la interoperabilidad, la mantenibilidad, la modularidad y el procesamiento eficiente de información geoespacial. Las siguientes subsecciones describen las decisiones más relevantes, su justificación y el impacto que tuvieron en la arquitectura final del sistema.

Uso de una `API` como capa de integración

Con el propósito de desacoplar el entorno de visualización del almacenamiento de datos, se incorporó una `API` como capa intermedia entre Unity y PostgreSQL/PostGIS. En lugar de acceder directamente a la base de datos, Unity realiza solicitudes HTTP a la API, la cual procesa las consultas y devuelve la información en formato JSON. Esta decisión reduce la dependencia entre ambos componentes y permite centralizar

la lógica de acceso a datos, facilitando el mantenimiento del sistema y la incorporación de nuevas funcionalidades sin afectar directamente al cliente desarrollado en Unity.

Intercambio de información mediante JSON

La comunicación entre la `API` y Unity se realizó utilizando JSON como formato de intercambio de datos. Este formato permite representar estructuras complejas de manera independiente del lenguaje de programación utilizado, facilitando el procesamiento de la información geoespacial dentro del cliente.

El uso de JSON simplifica la serialización y deserialización de objetos y contribuye a mantener una comunicación uniforme entre los componentes del sistema.

Separación entre procesamiento geométrico y renderizado

El procesamiento de las geometrías fue separado del proceso de renderizado mediante la modularización de componentes. Mientras `GeometryProcessor` se encarga de normalizar y triangular las geometrías, `SceneRenderer` únicamente genera los objetos tridimensionales dentro de Unity.

Esta separación reduce el acoplamiento entre ambos procesos y facilita el mantenimiento del sistema al asignar responsabilidades específicas a cada componente.

Procesamiento previo de las geometrías

Las geometrías obtenidas desde PostGIS son procesadas antes de ser representadas en Unity. Este procesamiento incluye operaciones de simplificación, normalización y triangulación mediante LibTessDotNet, permitiendo generar mallas compatibles con el motor gráfico.

Realizar este procesamiento antes del renderizado mejora el rendimiento y facilita la representación de entidades geoespaciales complejas.

Simplificación de la simulación hidrologica

En este trabajo no se buscó reemplazar modelos hidrogeológicos especializados como MODFLOW o FEFLOW. La simplificación de la simulación fue una decisión cuyo objetivo fue lograr una visualización simple y posible dentro los plazos.

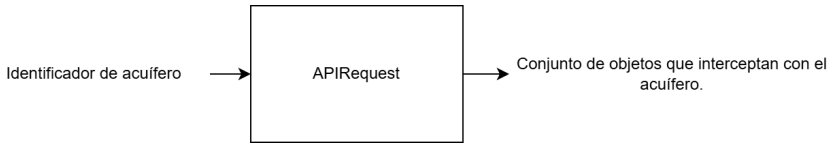


Figura 4.3: Entrada y salida del componente de APIRequest

4.6. Implementación del sistema

En esta sección se describe la implementación de los principales componentes del sistema desarrollado, se explora el funcionamiento de los componentes más críticos y cómo interactúan los módulos dentro del componente y como se comunican. Como la finalidad del sistema es la interoperabilidad los módulos a revisar son la consulta de `API`, `GeometryProcessor`, dos componentes que independientes del sistema a su propósito es generar la comunicación e interpretación de datos geoespaciales en Unity. Para más entendimiento visitar la sección de componentes críticos en el anexo C.5.

`APIRequest:`

El componente `ApiRequest` tiene como función generar la comunicación entre el entorno de visualización 3D y los servicios que proporcionan la información geoespacial. Este componente permite realizar solicitudes a la API del sistema, obteniendo los datos requeridos para la construcción y actualización de los elementos representados dentro del entorno interactivo.

En la figura 4.3 el flujo de trabajo inicia cuando desde otro componente se genera la consulta, para en este caso la entrada del componente es el identificador o id del acuífero, como salida devuelve los objetos que se encuentren en la base de datos y bajo consultas PostGIS realizadas en la API devuelven los objetos interceptados.

Además, este componente permite abstraer la comunicación HTTP del resto de la aplicación, evitando que otros módulos tengan que gestionar directamente las solicitudes externas. Esto facilita la modularidad del sistema y permite modificar la fuente de datos sin afectar la lógica de visualización.

`GeometryProcessor:`

El componente `Geometry Processor` tiene como objetivo procesar y transformar los datos geoespaciales obtenidos desde la fuente de datos, convirtiéndolos en estruc-

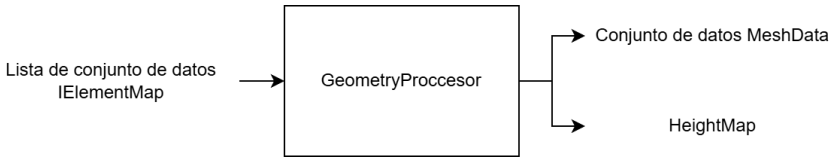


Figura 4.4: Entrada y salida de datos

turas geométricas compatibles con el entorno tridimensional. Este componente actúa como intermediario entre la capa de datos geoespaciales y el sistema de visualización, permitiendo la generación de representaciones 3D del terreno y elementos asociados al acuífero.

El flujo de procesamiento en la figura 4.4 comienza con la recepción de geometrías geoespaciales obtenidas mediante la API, las cuales pueden contener información vectorial como polígonos, puesto que es el tipo de datos junto con raster que se alcanzó a implementar. Posteriormente, el componente realiza operaciones de conversión, normalización y adaptación de coordenadas para adecuar la información al sistema de coordenadas utilizado por Unity.

Algunos de los módulos más importantes de este proceso son la implementación del algoritmo de VW, gracias a este componente los datos quedan simplificados, normalizados y dentro de una estructura de datos como lo es `MeshData` C.5.3, en simples palabras un conjunto de datos que guarda información crucial para generar los elementos visuales después, dentro de estos elementos están vértices, contorno, punto central, etc.

5. Resultados y validación

En este capítulo se explora las validaciones del sistema, desde las pruebas técnicas que garantizan el funcionamiento del programa hasta las evaluaciones correspondientes a los usuarios.

5.1. Estrategia de validación

La validación del sistema GeoVein se realizó siguiendo una estrategia de pruebas funcionales de caja negra, basada en los principios descritos en *Foundations of Software Testing* [32]. Este enfoque permite verificar el comportamiento observable del software desde la perspectiva del usuario, sin considerar la implementación interna de los algoritmos.

5.1.1. Objetivos de la validación

Este primer estudio se realiza con la intención de validar dos de los primeros hitos resultantes de descomponer la hipótesis. Por lo tanto, el objetivo principal de la validación fue comprobar que el sistema integra correctamente los datos geoespaciales almacenados en PostGIS, genera modelos tridimensionales de acuíferos y ejecuta simulaciones hidrológicas de manera consistente, dando una respuesta las dos primeras preguntas de investigación.

1. ¿Es posible integrar datos geoespaciales en Unity?
2. ¿Es posible implementar un SIG 3D para la visualización y simulación de acuíferos utilizando Unity?

3. Mejorar la comprensión espacial de acuíferos.

Es así que los objetivos para esta etapa son:

- Verificar la correcta obtención de datos desde la `API`.
- Comprobar la generación de geometrías tridimensionales.
- Validar el funcionamiento de la simulación hidrológica.
- Confirmar el cumplimiento de los requerimientos funcionales definidos para el sistema.

5.1.2. Alcance de las pruebas

- Lectura de datos desde la `API`.
- Procesamiento de geometrías.
- Generación de mallas 3D.
- Renderizado en Unity
- Simulación hidrológica.

5.1.3. Criterios de aceptación

- La salida obtenida coincidió con el resultado esperado.
- No se produjeron errores durante la ejecución.
- La información geoespacial mantuvo su integridad.
- El requerimiento funcional asociado fue satisfecho.

5.2. Diseño de los casos de prueba

Las pruebas de validación técnica, siguen el siguiente formato que se puede observar en la tabla a continuación D.1, esta es la primera prueba y a continuación se muestra el proceso de pruebas con evidencias, el resto de pruebas con evidencias

incluidas para cada caso de uso se encuentra en el Anexo C.8. La planilla de un caso de prueba contiene código de identificación, requerimiento asociado, objetivo, entrada, procedimiento y el resultado esperado.

Tabla 5.1: Caso de prueba CP-01. Carga de un acuífero desde la base de datos.

Campo	**Descripción**
Caso de prueba	CP-01
Requerimiento asociado	RF-01
Objetivo	Verificar la carga de un acuífero desde la base de datos.
Entrada	ID del acuífero = 1.
Procedimiento	1. Iniciar la aplicación. 2. Solicitar la carga del acuífero. 3. Esperar la respuesta de la API.
Resultado esperado	El sistema obtiene correctamente la geometría y el raster asociados al acuífero seleccionado.
Comprobación	Salidas log por sistema, imprimir un log de un objeto con todo sus datos.

5.3. Ejecución de los casos de prueba

Para esta sección se ejecutara una prueba para observar el procedimiento. Las pruebas se ejecutaron manualmente en el entorno de desarrollo de Unity. En este caso, el procedimiento a realizar es el de D.1, para ello se realizará el procedimiento y teniendo en cuenta el resultado de este se considera como aprobado o no aprobado. El experimento CP-01 cuenta con tres pasos en su procedimiento:

5.3.1. Prueba 1: Carga de un acuífero

La ejecución del caso de prueba se realizó siguiendo el procedimiento definido en la Tabla D.1. A continuación, se presentan las evidencias obtenidas durante su ejecución.

1. Inicio de la aplicación.

2. Solicitud de carga del acuífero.

3. Recepción de la información enviada por la API.

Las figuras (a) y (b) en D.1 muestran el inicio correcto de la aplicación y los mensajes registrados en la consola.

La figura figuras (c) en D.1 muestran la selección del acuífero a cargar.

Las figuras (d) y (e) D.1 muestran la respuesta de la API, donde se verifica la recepción de la geometría y los datos asociados sin errores.

Como resultado, el caso de prueba fue aprobado, ya que la carga del acuífero se realizó correctamente.

5.3.2. Resultados

En la siguiente tabla 5.2 se puede observar los resultados de los experimentos para mayor evidencia visitar el Anexo para ver el resto de pruebas y sus respectivos procedimientos

Tabla 5.2: Resumen de resultados de los casos de prueba.

Caso	**Funcionalidad**	**Estado**
CP-01	Carga de acuífero	Aprobado
CP-02	Generación de malla 3D	Aprobado
CP-03	Renderizado en Unity	Aprobado
CP-04	Simulación hidrológica	Rechazado
CP-05	Desplazamiento del usuario en el entorno 3D	Aprobado

El caso de prueba **CP-04** fue clasificado como rechazado exclusivamente en su dimensión de representación visual, a pesar de que **la lógica de datos subyacente y los cálculos hidrológicos entregaron resultados coherentes y correctos a nivel numérico**.

La limitación principal radicó en las restricciones de tiempo durante la etapa de desarrollo, lo que impidió implementar un mapeo visual continuo y fluido sobre la malla 3D. Como consecuencia, los datos procesados por la simulación se desplegaron en el motor gráfico mediante bloques rígidos y acumulaciones discontinuas sobre el terreno.

Este resultado no invalida la aproximación por autómatas celulares para el procesamiento de datos, pero evidencia la necesidad de dedicar trabajo futuro al desarrollo de un pipeline gráfico dedicado.

5.3.3. Discusión

Los resultados obtenidos en los casos de prueba indican que las funcionalidades definidas como críticas fueron casi todas implementadas correctamente y cumplen con los requerimientos establecidos durante el diseño del sistema a excepción de simulación hidrológica, prueba que presenta fallos en la representación de la malla. Las pruebas permitieron verificar la correcta integración de casi todos los componentes del sistema, especialmente la comunicación entre la base de datos espacial, el procesamiento de la información geográfica y su representación en el entorno tridimensional.

En cuanto a las preguntas:

1. ¿Es posible integrar datos geoespaciales en Unity?
2. ¿Es posible implementar un SIG 3D para la visualización y simulación de acuíferos utilizando Unity?
3. ¿La solución desarrollada contribuye a mejorar la comprensión espacial de los acuíferos?

Las pruebas logran demostrar que ambas preguntas son posibles, en primer lugar los datos geoespaciales pueden ser integrados en Unity, como lo demuestra el caso de prueba 1, 2 y 3, ya que, los datos son cargados en el sistema, son procesados en la generación de la malla y visualizados en renderizado en Unity y el resultado es el esperado modelos en 3D de los polígonos tomados desde la base de datos, así mismo, responde parcialmente la segunda pregunta, porque es posible integrar un SIG 3D en Unity. En segundo lugar y la segunda parte de la pregunta 2, aquí a pesar de que el caso de prueba 4 sea rechazado, cabe destacar que es un problema que se dirige hacia la malla, no directamente el simulador, sin embargo, al estar limitado a ser una simulación por partes, no es un representación fidedigna de una simulación. Por otro lado, el resultado del caso de prueba número 5 nos da pie para comprobar la pregunta número 3, ya que, la válida implementación de esta, nos da pie a realizar la validación de la tercera pregunta.

Así mismo esto demuestra que la arquitectura modular implementada facilita el flujo de datos entre los distintos módulos sin afectar el funcionamiento de las funcionalidades principales. No obstante, las pruebas realizadas se enfocaron en validar el comportamiento funcional del sistema bajo escenarios controlados. Aspectos como el rendimiento con grandes volúmenes de datos geoespaciales, la escalabilidad y la incorporación de nuevas fuentes de información requieren una evaluación más extensa y constituyen oportunidades de mejora para futuros desarrollos. Asimismo, el sistema puede ampliarse mediante la incorporación de nuevas herramientas de análisis hidrológico y mecanismos de optimización orientados a mejorar el desempeño en escenarios de mayor complejidad.

5.4. Evaluación por usuarios

Con el propósito de evaluar la usabilidad, la efectividad de la interfaz y el grado de comprensión espacial que ofrece la herramienta, se llevó a cabo una prueba con una muestra exploratoria de N = 11 usuarios voluntarios de diversos perfiles (estudiantes e ingenieros). La evaluación combinó la resolución de tareas guiadas dentro del prototipo y un cuestionario posterior estructurado en tres ejes principales:

5.4.1. Objetivo

El objetivo principal de la encuesta es dar respuesta a la pregunta de investigación planteada, así también busca validar el funcionamiento de GeoVein desde la perspectiva de los usuarios finales, enfocándose principalmente en la parte de comprensión espacial de acuíferos, ya que, es el último elemento de la problemática planteada. Para ello primero de describe la dirección del cuestionario, en segundo los participantes, para luego pasar a analizar las respuesta todo con enfoque a la comprensión espacial de acuíferos, destacando las preguntas principalmente relacionadas con este elemento.

5.4.2. Dirección

El cuestionario puede encontrarlo en E y cuenta con secciones enfocadas para las tres preguntas de investigación, sin embargo, vamos a enfocar la evaluación en el último aspecto de la separación de objetivos de la pregunta de investigación ¿La

solución desarrollada contribuye a mejorar la comprensión espacial de los acuíferos?

5.4.3. Alcance

El presente estudio se desarrolló con una muestra de 11 participantes que se presentaron voluntariamente. Si bien este tamaño de muestra limita la capacidad de generalizar los resultados, permite obtener evidencia preliminar sobre el comportamiento observado. Así los resultados deben interpretarse como indicios que permiten identificar tendencias, más que como conclusiones definitivas.

Debido al carácter exploratorio de la investigación, el análisis se centra en describir el desempeño de los participantes y comparar las condiciones evaluadas dentro de la muestra estudiada.

5.4.4. Participantes

La evaluación fue aplicada a un total de 11 participantes que se presentaron de forma voluntaria. La muestra estuvo compuesta por usuarios con distintos perfiles académicos.

Al menos 5 de 11 (45,5 %) pertenecía a otras áreas de interés, 4 de 11 (36,4 %) al área de informática, computación o desarrollo de software y el 2 de 11 (18,2 %) a ingeniería o ciencias aplicadas E.3b.

Respecto al uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), 8 de 11 (72,7 %)indicó no haber utilizado previamente este tipo de herramientas, mientras que el resto manifestó poseer algún nivel de experiencia. En relación con entornos tridimensionales interactivos, la mayoría de los participantes declaró poseer experiencia previa, permitiendo evaluar la herramienta considerando usuarios con diferentes niveles de familiaridad tecnológica E.3d.

5.4.5. Instrumento de evaluación

La evaluación fue realizada mediante un cuestionario desarrollado en Google Forms. Los participantes descargaron GeoVein desde el enlace proporcionado y realizaron una serie de tareas dentro del sistema antes de responder el cuestionario E.

El instrumento estuvo dividido en cuatro etapas principales:

1. Caracterización del perfil del participante.
2. Evaluación de la comprensión inicial utilizando una representación bidimensional.
3. Ejecución de tareas dentro de GeoVein.
4. Evaluación final de usabilidad, claridad visual, comprensión espacial, utilidad percibida y simulación hidrológica.

Las respuestas fueron recopiladas mediante preguntas de selección única, selección múltiple, escalas tipo Likert de cinco niveles y preguntas abiertas.

5.4.6. Resultados

A continuación se encuentran los resultados de las pruebas de evaluación indicando que es lo que sucede y cual es el aporte en relación a las preguntas de investigación y de la hipótesis planteada. La siguiente sección se divide en sub-subsecciones donde se analizaran las respuestas del cuestionario en función de las preguntas de la hipótesis.

Pregunta 1: ¿Es posible integrar datos geoespaciales en Unity?

En las tareas E.6b, E.6c se busca evaluar la funcionalidad de carga en donde la mayoría de los participantes, es decir 10 de 11 (90,9 %) participantes fue capaz de generar representaciones de acuíferos, los cuales 4 (36,4 %)de ellos lo hicieron con dificultad, por otro lado 1 de 11 (9,1 %)participantes no logró generar la visualización debido a que no encontró donde se podía cargar el acuífero, dado el tamaño de la muestra, este resultado no permite establecer conclusiones generalizables. Sin embargo, el hecho de que 5 de los 11 (45,5 %) participantes presentaran algún grado de dificultad durante la tarea permite identificar una posible dificultad de usabilidad asociada a la claridad de la funcionalidad. A pesar de ello, el hecho de que 10 de los 11 participantes lograran completar la tarea representa una tendencia favorable respecto a la funcionalidad de la carga.

En la tarea número 5 E.6e se le invita al usuario a identificar elementos dentro de la escena generada, de los 11 participantes 9 (81,8 %) lograron identificar acuíferos 10(90,9 %) terreno, 8(72,7 %) cuencas, 4(36,6 %) lagos, 5(45,5 %) etiquetas de

nombre, 1(9,1 %) no logró reconocer elementos, en relación a la funcionalidad este resultado refleja que esta responde bien a las pruebas realizadas por lo usuarios, ya que, su gran mayoría logró reconocer y diferenciar el tipo de elemento es decir que se puede integrar y graficar los elementos geoespaciales.

Pregunta 2: ¿Es posible implementar un SIG 3D para la visualización y simulación de acuíferos utilizando Unity?

La viabilidad técnica para implementar un SIG 3D en Unity quedó demostrada mediante las pruebas de funcionamiento del sistema, las cuales confirmaron que la arquitectura es capaz de procesar, desplegar y simular datos geoespaciales. Sin embargo, para evaluar si esta implementación técnica cumple con los pilares funcionales de un SIG en la práctica, los resultados técnicos se contrastaron con la experiencia de los usuarios en tres dimensiones clave: visualización, interacción y simulación.

En cuanto a la visualización, mientras que la evaluación técnica aprobó la generación de mallas e instanciación de objetos, los resultados del cuestionario corroboraron de manera estos datos. En primer lugar, ante la afirmación sobre la claridad general de los elementos en la escena E.8f , las respuestas el 54,4 % 6 de 11 alcanzaron una mediana y moda de 4 en la escala de Likert, reflejando un alto grado de acuerdo. En segundo lugar, al evaluar la capacidad para identificar el acuífero seleccionado dentro del entorno 3D E.9a, los datos mostraron una mediana de 4 y un comportamiento bimodal concentrado en las puntuaciones 4 y 5 (5 de 11 personas puntuaron 4 el 45,5 %, así mismo con la puntuación de 5). Finalmente, al consultar sobre la identificación del terreno o relieve asociado E.9b, el 72,7 % de los participantes 8 de 11 asignó una calificación positiva (7 en Muy de acuerdo y 1 con puntuación 4), obteniendo una mediana y moda de 5. En conjunto, estas métricas confirman que el sistema permite a los usuarios distinguir con claridad las distintas entidades y capas geográficas (terreno, cuencas y acuíferos) en el entorno tridimensional.

Respecto a la interacción, las pruebas con usuarios respaldaron la estabilidad del motor gráfico para la navegación espacial. El 90,9 % de los participantes 10 de 11 consideró que la herramienta fue fácil de utilizar E.8a mediana = 4, 45,5 % en puntuaciones 4 y 5 y los controles de cámara permitieron observar adecuadamente el modelo E.8d mediana y moda = 5; 54,5 % con puntuación 5 y 36,4 % con puntuación 4. Igualmente, el 100 % de los encuestados 11 de 11, mediana y moda = 5)evaluó

de forma positiva la comprensión de la navegación 3D E.8e 63,6 % en puntuación 5. En conjunto, estos datos confirman que las herramientas de control de cámara y exploración ofrecen una manipulación espacial fluida y efectiva, cumpliendo con los estándares esperados para un SIG.

Finalmente, la evaluación con usuarios corroboró el conflicto respecto a la simulación hidrológica. La claridad de las imágenes y la representación del comportamiento del agua mostraron evaluaciones E.11f desfavorables y neutras, medianas de 3 modas de 2 y 3, donde un 36,4 % de los participantes 4 de 11 otorgó puntuaciones bajas debido a la falta de continuidad, destacando en los comentarios abiertos que el flujo se percibía mediante «bloques prismáticos no naturales» E.13. Sin embargo, el 72,7 % 8 de 11, mediana = 4 consideró que la función aporta valor a la herramienta E.12c . Esto confirma que, si bien la lógica de procesamiento en Unity es viable, la representación gráfica requiere evolucionar hacia soluciones más continuas.

Pregunta 3: ¿La solución desarrollada contribuye a mejorar la comprensión espacial de los acuíferos?

Los resultados reflejan una percepción altamente positiva sobre el aporte de GeoVein a la comprensión espacial hidrogeológica. En la escala Likert, el 100 % de los participantes 11 de 11, mediana y moda de 5 afirmó que la herramienta presenta la información geoespacial de forma más comprensible E.11a. El 81,8 % n = 9 de 11, mediana y moda = 5 indicó que el 3D facilitó entender la forma y ubicación de los acuíferos E.9e, el 90,9 % 10 de 11, mediana y moda = 5 destacó el control de cámara como un factor determinante E.10b, y el 72,7 % 8 de 11, mediana y moda = 5 confirmó comprender mejor la escena al compararla con la imagen 2D inicial E.10a.

Al comparar estos datos con las respuestas abiertas, los usuarios respondieron que este impacto señalando que la herramienta permitió visibilizar «los relieves de las zonas y la interacción de los acuíferos con ellos» y «la diferencia de profundidad» E.16, así como la utilidad de la gestión de capas al indicar que «se puede ocultar el terreno para observar mejor la distribución de los acuíferos» E.12.

Después de este cruce respaldado por un 90,9 % de preferencia 10 de 11, mediana y moda = 5 por la exploración 3D interactiva frente a representaciones estáticas E.10f— confirma la hipótesis de investigación, demostrando que la solución mejora

significativamente la comprensión espacial en comparación con la cartografía 2D tradicional.

5.4.7. Discusión

Los resultados obtenidos permiten validar que GeoVein cumple con las funcionalidades principales definidas durante el desarrollo del sistema. La integración entre la base de datos espacial, procesamiento geométrico, generación del modelo tridimensional y simulación hidrológica permitió construir un prototipo funcional capaz de representar información hidrogeológica dentro de un entorno interactivo. Desde la perspectiva de los usuarios, la representación de acuíferos en 3D favoreció la comprensión espacial de estos, permitiendo interpretar relaciones entre terreno, acuíferos y elementos superficiales. Sin embargo la simulación hidrológica requiere mejoras para comunicar de mejor forma el fenómeno representado. Como trabajo futuro se considera mejorar la interfaz de interacción e incorporar mecanismos que permitan explicar de forma más clara los procesos simulados. Además de incorporar estudios que abarquen especialistas puesto que al ser una herramienta de contenido científico, se requiere precisión en lo que se quiere representar.

5.5. Conclusión

Para cerrar el documento, es bueno hablar de que el proceso tuvo altos y bajos, al principio se pensaba como un software mucho mas completo, más complejo y con operaciones más precisas, sin embargo, a medida que se avanzaba, aparecían limitaciones sobretodo que incluían el alcance y el tiempo de desarrollo.

A partir del análisis de los datos obtenidos en las pruebas técnicas y en la evaluación con usuarios, se presentan las conclusiones para cada una de las preguntas de investigación planteadas al inicio de este trabajo:

1. **Integración de datos**: PostGIS API C# Unity demostró ser técnicamente viable y eficiente para procesar e integrar componentes geoespaciales complejos en tiempo de ejecución, permitiendo que la gran mayoría de los usuarios los reconocieran sin problemas.

2. **Implementación de un SIG 3D**: Declara con honestidad técnica que fue posible implementar las funciones clave de visualización e interacción espacial

de un SIG 3D. Sin embargo, en la simulación, aclara que si bien la capa de procesamiento lógico de datos funcionó, la representación gráfica demostró la necesidad de avanzar hacia *compute shaders* para lograr continuidad visual.

3. **Comprensión Espacial**: Afirma que la representación tridimensional e interactiva facilitó la percepción de profundidad y la escala de los acuíferos subterráneos frente a los métodos 2D tradicionales, cumpliendo con el objetivo funcional de la herramienta.

En conclusión de los resultados obtenidos, se valida la hipótesis de investigación, confirmando que el uso de entornos tridimensionales e interactivos en Unity favorece la comprensión de la estructura y distribución espacial de los acuíferos, reduciendo la abstracción propia de la cartografía 2D tradicional.

5.5.1. Aportes

Los principales aportes del proyecto son la integración de datos geoespaciales en Unity, demostrar que se pueden vincular bases de datos espaciales estándar (PostGIS) con un motor de videojuegos (Unity) para fines geográficos y su interoperabilidad. PostGIS/Unity no es una relación muy explorada y esto es importante porque la integración de ambos componentes da paso a lo que podría ser una serie de softwares interactivos, este en particular su temática es de acuíferos, pero se pueden abrir muchos más estudios que compartan componentes y se usen para la representación ya sea de: volcanes, minerías, sismología, etc. Áreas de estudios que sirven tanto políticamente, económicamente y de estudio para el ser humano. Entregar una herramienta interactiva capaz de representar volúmenes hídricos subterráneos con libertad de navegación.

5.5.2. Trabajos futuros

Para terminar, considerando el aporte que significa este proyecto para los trabajos futuros. El principal enfoque es trabajar más en integrar nuevas fuentes y más elementos geoespaciales es decir trabajar la escabilidad del proyecto. El segundo trabajo a futuro es trabajar en mejoras de usabilidad, incorporar leyendas fijas de elevación/profundidad, brújulas de navegación continua y ajustar la sensibilidad de

la cámara orbital atendiendo al feedback de los usuarios. Reemplazar el renderizado actual para representar el flujo del agua sin discontinuidades visuales.

Glosario

Acuífero: Formación geológica subterránea capaz de almacenar y transmitir agua mediante sus espacios porosos o fracturas. Constituye una de las principales reservas de agua dulce utilizadas para consumo humano, agricultura e industria.

API (Application Programming Interface): Conjunto de definiciones y protocolos que permiten la comunicación entre distintos componentes de software. En este proyecto, permite la comunicación entre Unity y la base de datos PostgreSQL/PostGIS.

Autómata celular: Modelo computacional basado en una estructura de celdas que evolucionan mediante reglas definidas según su estado actual y la interacción con sus vecinos. Se utiliza para representar fenómenos espaciales mediante sistemas discretos.

Base de datos espacial: Sistema de almacenamiento capaz de gestionar información geográfica, permitiendo almacenar, consultar y analizar datos asociados a ubicaciones espaciales.

DEM (Digital Elevation Model): Modelo digital de elevación que representa la superficie terrestre mediante una estructura raster donde cada celda almacena un valor correspondiente a la altura del terreno.

GeoJSON: Formato estándar basado en JSON utilizado para representar información geográfica, permitiendo almacenar geometrías como puntos, líneas y polígonos junto con sus atributos asociados.

Geometría espacial: Representación matemática de elementos ubicados en el espacio geográfico. Puede estar compuesta por puntos, líneas, polígonos o estructuras tridimensionales.

Modelo digital de elevación (DEM): Representación digital de la superficie terrestre mediante una matriz de valores de elevación utilizada para generar modelos tridimensionales del terreno.

Malla 3D: Estructura gráfica compuesta por vértices, aristas y caras que permite representar objetos o superficies tridimensionales dentro de un entorno digital.

Motor de videojuegos: Framework de desarrollo que proporciona herramientas para crear aplicaciones interactivas, incluyendo sistemas de renderizado gráfico, físicas, animaciones e interacción con usuarios.

Napa subterránea: Acumulación de agua ubicada bajo la superficie terrestre dentro de materiales geológicos permeables. En muchos contextos se utiliza como sinónimo de agua subterránea o acuífero.

PostGIS: Extensión de PostgreSQL que incorpora capacidades para almacenar, consultar y procesar información geoespacial dentro de una base de datos relacional.

PostgreSQL: Sistema gestor de bases de datos relacional de código abierto utilizado para almacenar y administrar información estructurada.

Raster: Modelo de representación espacial basado en una cuadrícula de celdas donde cada elemento almacena un valor asociado a una ubicación determinada.

SIG (Sistema de Información Geográfica): Sistema utilizado para capturar, almacenar, analizar y visualizar información asociada a posiciones geográficas.

SIG 3D: Extensión de los Sistemas de Información Geográfica que incorpora representación tridimensional de elementos espaciales, permitiendo visualizar superficies, volúmenes y estructuras subterráneas.

Simulación hidrológica: Representación computacional de procesos relacionados con el comportamiento del agua dentro de un sistema determinado mediante modelos matemáticos o reglas definidas.

SRID (Spatial Reference System Identifier): Identificador utilizado para definir el sistema de referencia espacial asociado a un conjunto de datos geográficos.

Unity: Motor de desarrollo utilizado para crear aplicaciones interactivas y videojuegos, incorporando herramientas para la generación y manipulación de ambientes tridimensionales.

Vectorial: Modelo de representación espacial donde los elementos geográficos se representan mediante geometrías discretas como puntos, líneas y polígonos.

Visvalingam-Whyatt: Algoritmo de simplificación geométrica que reduce la cantidad de puntos de una geometría eliminando aquellos con menor importancia espacial según el área de los triángulos formados entre puntos consecutivos.

Voxel: Unidad básica utilizada para representar datos volumétricos en tres dimensiones. Corresponde a una extensión del concepto de píxel hacia un espacio tridimensional.

Bibliografía

[1] Water Science School, U.S. Geological Survey. How much water is there on, in, and above the earth?, 2019. Accedido: 22-Sep-2025.

[2] C. Griebler. Groundwater ecosystem services: a review. *Freshwater Science*, 34(1):355–367, 2015.

[3] Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia – CR2. La megasequía 2010-2019: una lección para el futuro. `https://www.cr2.cl/megasequia/`, 2015. Recuperado el 24 de octubre de 2025.

[4] IGRAC – Centro Internacional de Evaluación de Recursos de Aguas Subterráneas. Perfil del país sobre aguas subterráneas: Chile, n.d.

[5] Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO). Proyección del consumo de agua en la minería del cobre. período 2024–2034. Technical report, Dirección de Estudios y Políticas Públicas, Comisión Chilena del Cobre, Santiago, Chile, junio 2025. RPI N° 2025-A-4407.

[6] UNESCO. *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2022: Aguas subterráneas: hacer visible el recurso invisible*. UNESCO, París, 2022.

[7] Esri. Arcgis pro, 2025. Software de SIG para análisis y visualización geoespacial en 2D, 3D y 4D.

[8] QGIS Development Team. Qgis (quantum gis), 2023. Software libre de SIG para análisis y visualización geoespacial en 2D y 3D.

[9] Arlen W. Harbaugh. Modflow-2005, the u.s. geological survey modular ground-water model — the ground-water flow process. Technical Report 6–A16, U.S. Geological Survey, Reston, VA, 2005.

[10] M. G. Trefry and C. Muffels. *FEFLOW: Finite element subsurface flow system. Reference manual*. DHI-WASY GmbH, Berlin, Germany, 2007.

[11] Rong-Xin Wang, Rui Wang, Pengcheng Fu, and Jian-Min Zhang. Portable interactive visualization of large-scale simulations in geotechnical engineering using unity3d. *Advances in Engineering Software*, 148:102838, 2020.

[12] Malcolm E. Cox, Allan James, Amy Hawke, and Matthias Raiber. Groundwater visualisation system (gvs): A software framework for integrated display and interrogation of conceptual hydrogeological models, data and time-series animation. *Journal of Hydrology*, 491:56–72, 2013.

[13] Jiyoung Park, KyungOk Lee, and JungHyun Han. Interactive visualization of magnetic field for virtual science experiments. *Journal of Visualization*, pages 1–16, 2015.

[14] The PostgreSQL Global Development Group. Postgresql documentation, 2025.

[15] Regina O. Obe and Leo S. Hsu. *PostGIS in Action*. Manning Publications, 3 edition, 2021.

[16] Psycopg Team. psycopg2: Postgresql database adapter for python, 2025.

[17] GeoAlchemy2 Developers. Geoalchemy2: Spatial extension for sqlalchemy, 2025.

[18] GeoPandas Development Team. Geopandas: Python tools for geographic data, 2025.

[19] Shapely Developers. Shapely: Manipulation and analysis of planar geometric objects, 2025.

[20] Npgsql Project. Npgsql documentation, 2024. https://www.npgsql.org/.

[21] David H. Douglas and Thomas K. Peucker. Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature. *The Canadian Cartographer*, 10(2):112–122, 1973.

[22] Mahesh Visvalingam and J. D. Whyatt. Line generalisation by repeated elimination of points. *The Cartographic Journal*, 30(1):46–51, 1993.

[23] Jason Gregory. *Game Engine Architecture*. A K Peters / CRC Press, 2nd edition, 2014.

[24] James D. Foley, Andries van Dam, Steven K. Feiner, and John F. Hughes. *Computer Graphics: Principles and Practice*. Addison-Wesley, Reading, MA, 2nd edition, 1996.

[25] Charles D. Hansen and Chris R. Johnson, editors. *The Visualization Handbook*. Academic Press / Elsevier, 2005.

[26] Forrest M. Hoffman, editor. *Scientific Visualization: Advances and Challenges*. Academic Press, 1999.

[27] María Elena Rodrigo Clavero, Javier Rodrigo Ilarri, and Eduardo F. Cassiraga. La ley de darcy: Fundamentos del flujo subterráneo en medios porosos, 2025. Material docente.

[28] Stephen Wolfram. Statistical mechanics of cellular automata. *Reviews of Modern Physics*, 55(3):601–644, 1983.

[29] Michael F. Hutchinson and John C. Gallant. Digital elevation models and representation of terrain shape. In *Terrain Analysis: Principles and Applications*. Wiley, 2000.

[30] Rafael C. Gonzalez and Richard E. Woods. *Digital Image Processing*. Pearson, 2018.

[31] Kent Beck and Cynthia Andres. *Extreme Programming Explained: Embrace Change*. Pearson Education, 2nd edition, 2005.

[32] Dorothy Graham, Erik van Veenendaal, Isabel Evans, and Rex Black. *Foundations of Software Testing: ISTQB Certification*. Cengage Learning, 2007.

[33] OpenTopography. Find topography data, 2026. Consultado: 2026-07-06.

A. Links

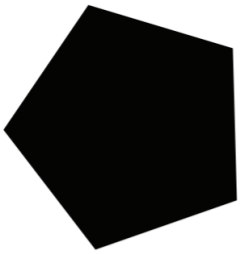
Link a cuestionario
Link a proyecto en Github
Link a proyecto en Ejecutable del proyecto
Link a video presentación del proyecto en Youtube

B. Marco Teórico

La Figura B.1 muestra ejemplos de los tipos de datos espaciales soportados por PostGIS. Los tipos vectoriales representan entidades mediante puntos, líneas y polígonos, mientras que el modelo raster permite almacenar información basada en celdas, como los modelos de elevación digital.

(a) Tipo de dato point [15]

(b) Tipo de dato linestring [15]



(c) Tipo de dato polygon [15]

(d) Modelo de elevación digital (DEM), correspondiente a un tipo de dato raster, imagen aclara con editor de fotos. [33]

Figura B.1: Tipos de datos espaciales soportados por PostGIS.

C. Diseño de software

En esta sección se describen los componentes críticos del sistema GeoVein, identificando sus responsabilidades, entradas, salidas y elementos principales asociados. Estos componentes representan los módulos fundamentales encargados de la comunicación con la base de datos, procesamiento de información geoespacial, generación de elementos tridimensionales, simulación hidrológica e interacción con el usuario.

C.1. Especificación de requerimientos

En el siguiente apartado se detallan los requerimientos del sistema, tanto funcionales como no funcionales. Estos últimos se describen bajo el modelo FURPS, con el objetivo de asegurar no solo el correcto funcionamiento del sistema, sino también la calidad del software en términos de rendimiento, usabilidad y mantenibilidad.

Tabla C.1: Requerimientos funcionales

Ref	**Requerimiento**	**Tipo**	**Descripción**
RF-01	Cargar datos geoespaciales	Proceso	El sistema debe permitir la carga de datos geoespaciales para su posterior procesamiento y visualización.
RF-02	Visualizar modelo de elevación digital	Visualización	El sistema debe visualizar modelos de elevación digital (DEM) en el entorno 3D.
RF-03	Visualizar elementos geográficos	Visualización	El sistema debe permitir la visualización de elementos geográficos como acuíferos, cuencas y lagos.

Tabla C.1: Requerimientos funcionales

Ref	**Requerimiento**	**Tipo**	**Descripción**
RF-04	Navegar en entorno 3D	Interacción	El sistema debe permitir la navegación libre del usuario dentro del entorno tridimensional.
RF-05	Seleccionar elementos geográficos	Interacción	El sistema debe permitir la selección de elementos geográficos dentro de la escena.
RF-06	Mostrar información de elementos	Información	El sistema debe mostrar información asociada a los elementos geográficos seleccionados.
RF-07	Ejecutar simulación hidrológica	Proceso	El sistema debe permitir la ejecución de una simulación hidrológica básica sobre los datos cargados.
RF-08	Visualizar resultados de simulación	Visualización	El sistema debe representar visualmente los resultados obtenidos de la simulación.

Tabla C.2: Requerimientos no funcionales

Ref	**Requerimiento No Funcional**	**FURPS**	**Descripción**
RNF-01	Arquitectura modular del sistema	S	El sistema debe estar organizado de forma modular, permitiendo la separación de responsabilidades entre sus componentes.
RNF-02	Interacción fluida en el entorno	P	El sistema debe mantener una interacción fluida durante la exploración del entorno 3D, evitando interrupciones perceptibles.
RNF-03	Evitar bloqueos en operaciones pesadas	P	El sistema debe evitar bloqueos prolongados durante la carga y procesamiento de datos de gran volumen.

Tabla C.2: Requerimientos no funcionales

Ref	**Requerimiento No Funcional**	**FURPS**	**Descripción**
RNF-04	Extensibilidad de componentes	S	El sistema debe permitir la extensión de sus componentes sin afectar el funcionamiento global.
RNF-05	Usabilidad de la interfaz	U	La interfaz debe ser comprensible para usuarios no expertos, facilitando su uso sin entrenamiento especializado.

C.2. Casos de uso:

C.2.1. Actores:

- **Usuario:** Actor principal del sistema.
- **Base de datos(BD)**: Actor con un rol secundario en el sistema, para esta versión del producto se encarga de almacenar los datos geoespaciales.

C.2.2. Casos de uso:

Tabla C.3: Caso de Uso 1: Cargar datos geoespaciales

Identificador	01
Caso de uso	Cargar datos geoespaciales
Actores	Usuario
Propósito	Permitir al usuario cargar los datos geoespaciales necesarios para su visualización y procesamiento dentro del sistema.
Resumen	El usuario selecciona un conjunto de datos geoespaciales disponibles. El sistema carga y valida la información desde la fuente de datos para su uso posterior en la visualización y simulación.
Referencias cruzadas	RF-01

Pre-condiciones	▪ El usuario tiene acceso al sistema. ▪ Existen datos geoespaciales disponibles.
Post-condiciones	Los datos geoespaciales quedan disponibles en el sistema para su visualización y procesamiento.
Tipo	Primario
Flujo principal	1. El sistema muestra la lista de datos geoespaciales disponibles. 2. El usuario selecciona un conjunto de datos. 3. El sistema carga los datos seleccionados. 4. El sistema valida la integridad de los datos.
Flujos alternativos	Si ocurre un error en la carga o en la conexión a la fuente de datos, el sistema notifica al usuario.

Tabla C.4: Caso de Uso 2: Visualizar modelo 3D de acuífero

Identificador	02
Caso de uso	Visualizar modelo 3D de acuífero
Actores	Usuario
Propósito	Permite al usuario visualizar el acuífero seleccionado como un modelo 3D dentro del entorno del sistema.
Resumen	Después de seleccionar un acuífero, el sistema carga los datos geoespaciales, genera su modelo tridimensional y lo muestra en la interfaz de visualización.
Referencias cruzadas	RF-02, RF-03

Pre-condiciones	▪ El usuario ha cargado previamente un acuífero. ▪ El sistema cuenta con conexión a los datos geoespaciales.
Post-condiciones	El sistema muestra el modelo 3D del acuífero seleccionado.
Tipo	Primario
Flujo principal	1. El usuario acciona el botón para cargar el modelo. 2. El sistema procesa los datos y genera la representación 3D (RF-02, RF-03). 3. El sistema renderiza el modelo en la interfaz de visualización.
Flujos alternativos	Si el sistema detecta un error en la carga de datos o en el servicio de base de datos, notifica al usuario.

Tabla C.5: Caso de Uso 3: Navegar por la escena 3D

Identificador	03
Caso de uso	Navegar por la escena 3D
Actores	Usuario
Propósito	Permitir al usuario desplazarse, rotar y explorar la escena tridimensional cargada en el sistema.
Resumen	El usuario interactúa con los controles de navegación dentro del entorno 3D para modificar su punto de vista y observar los elementos geoespaciales representados en la escena.
Referencias cruzadas	RF-04
Pre-condiciones	▪ El usuario ha cargado previamente un modelo 3D. ▪ La escena ha sido correctamente generada por el sistema.

Post-condiciones	La cámara del sistema refleja la posición, rotación o zoom definidos por la interacción del usuario.
Tipo	Primario
Flujo principal	1. El sistema muestra la escena 3D. 2. El usuario utiliza controles de navegación (mouse, teclado o rueda). 3. El sistema interpreta la entrada del usuario. 4. El sistema actualiza la posición, rotación o zoom de la cámara. 5. El sistema renderiza la escena desde la nueva perspectiva.
Flujos alternativos	▪ Si el usuario intenta moverse fuera de los límites del entorno, el sistema restringe el movimiento. ▪ Si la escena no está completamente cargada, el sistema deshabilita temporalmente la navegación.

Tabla C.6: Caso de Uso 4: Limpiar escena

Identificador	04
Caso de uso	Limpiar Escena
Actores	Usuario
Propósito	Permitir al usuario cargar otro acuífero desde el sistema.
Resumen	El usuario selecciona un elemento, pero decide cambiar el elemento, así que vuelve a cargar los datos de otro acuífero.
Referencias cruzadas	RF-01, RF-05, RF-06

Pre-condiciones	▪ El usuario ha cargado previamente un entorno 3D. ▪ Existen elementos geográficos disponibles en la escena.
Post-condiciones	El sistema muestra información asociada al elemento geográfico seleccionado.
Tipo	Secundario
Flujo principal	1. El sistema muestra la escena 3D con elementos geográficos disponibles. 2. El usuario presiona el botón para borrar los elementos. 3. El sistema borra los datos y limpia los sistemas. 4. El sistema indica que se han borrado los datos.
Flujos alternativos	▪ Si ocurre un error al intentar eliminar los datos, el sistema informa el error y mantiene los datos sin cambios. ▪ Si el sistema detecta que los elementos ya fueron eliminados previamente, informa al usuario y actualiza la escena.

Tabla C.7: Caso de Uso 5: Ejecutar simulación hidrológica

Identificador	05
Caso de uso	Ejecutar simulación hidrológica
Actores	Usuario
Propósito	Permitir al usuario ejecutar una simulación hidrológica sobre el entorno geoespacial cargado en el sistema.

Resumen	El usuario inicia la simulación hidrológica desde la interfaz. El sistema valida la existencia de los datos necesarios, ejecuta el proceso de simulación y actualiza la visualización de los resultados en el entorno 3D.
Referencias cruzadas	RF-01, RF-02, RF-03, RF-07
Pre-condiciones	▪ El usuario ha cargado previamente un entorno 3D válido. ▪ Existen datos geoespaciales disponibles para la simulación.
Post-condiciones	El sistema muestra los resultados de la simulación hidrológica en el entorno 3D.
Tipo	Primario
Flujo principal	1. El sistema muestra el entorno 3D cargado. 2. El usuario selecciona la opción de ejecutar simulación hidrológica. 3. El sistema valida que existan datos necesarios para la simulación. 4. El sistema ejecuta la simulación hidrológica. 5. El sistema actualiza la visualización con los resultados obtenidos.

Flujos alternativos	▪ Si no existen datos cargados, el sistema impide la ejecución y notifica al usuario. ▪ Si ocurre un error durante la simulación, el sistema detiene el proceso y muestra un mensaje de error. ▪ Si la simulación ya está en ejecución, el sistema evita iniciar una nueva instancia.

C.3. Diagramas de interacción

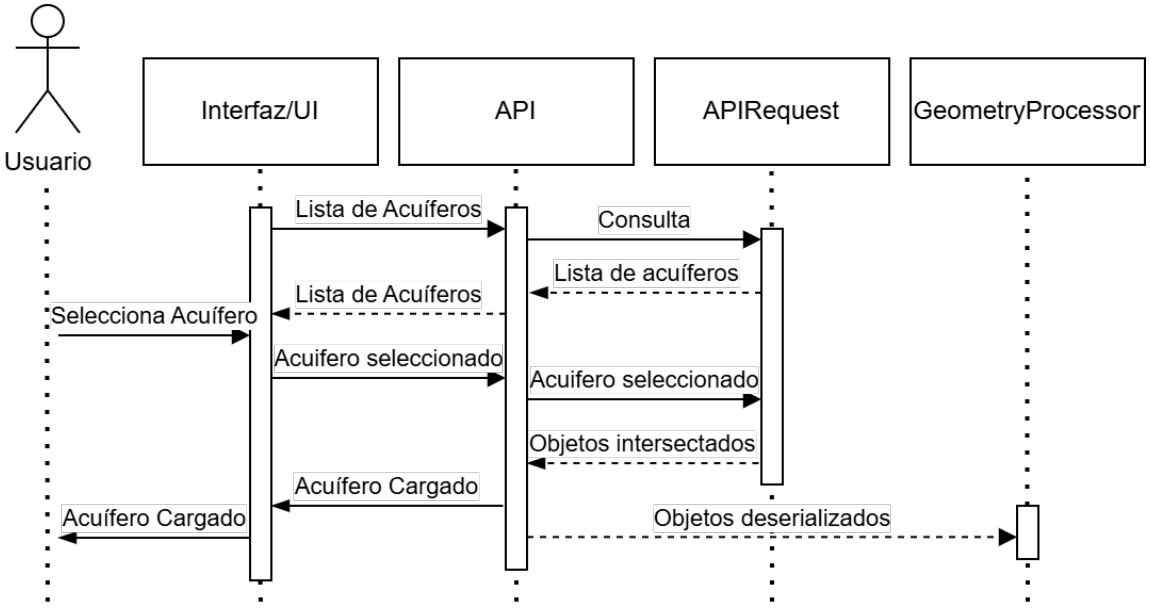


Figura C.1: Carga de acuíferos.

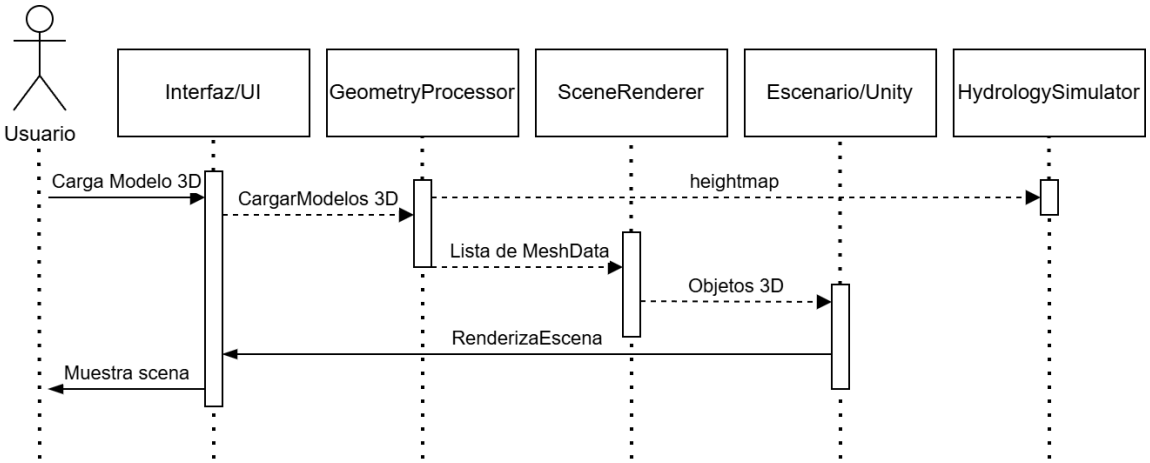


Figura C.2: Carga del modelo 3D.

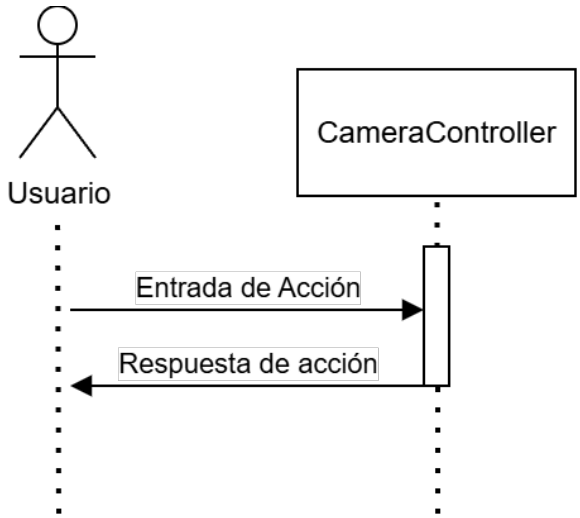


Figura C.3: Control de cámara.

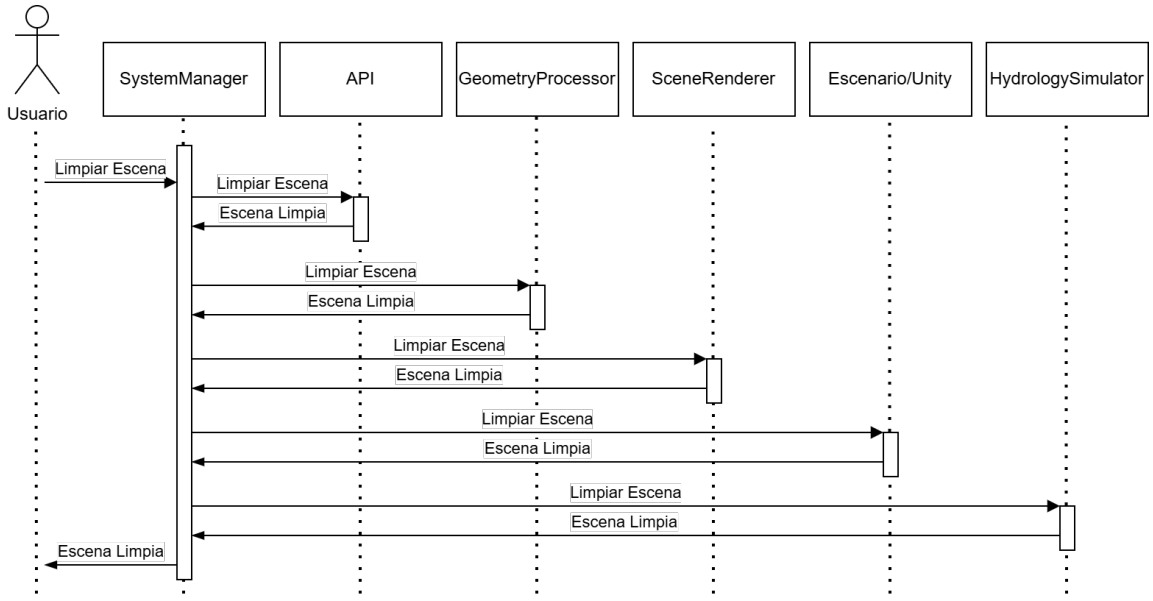


Figura C.4: Limpieza de escena

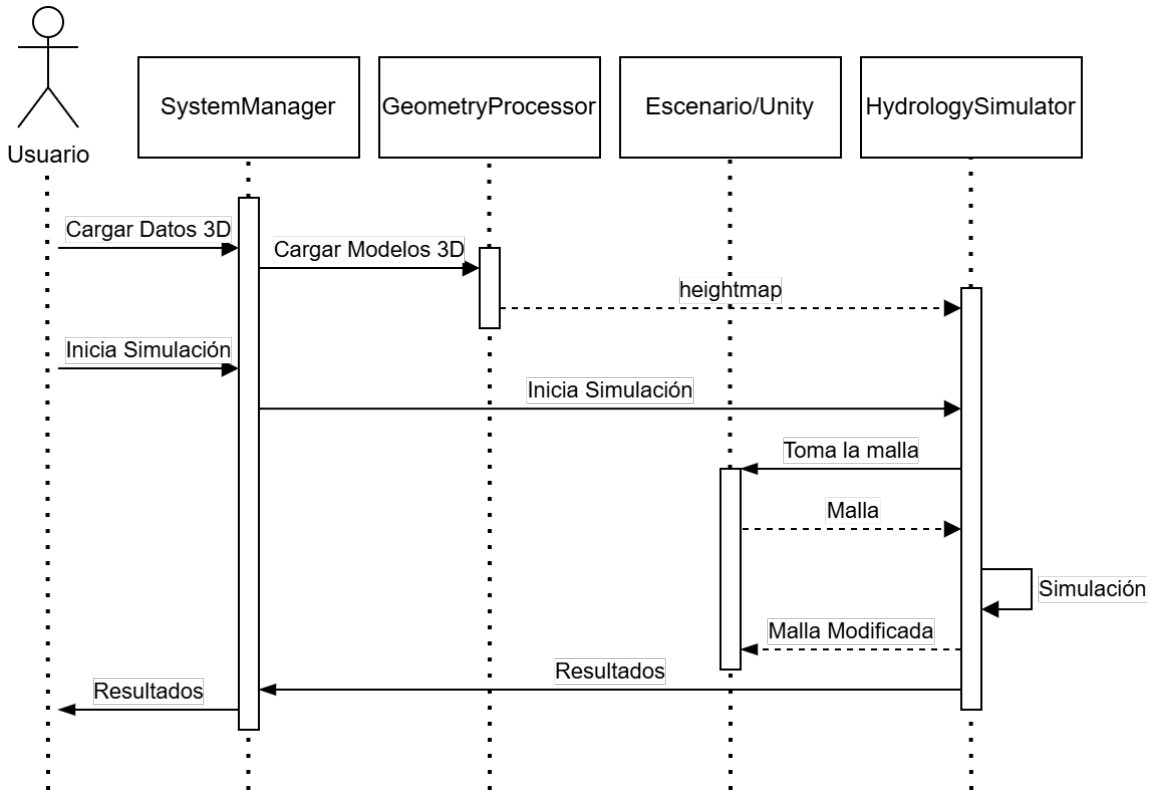


Figura C.5: Ejecutar simulación hidrológica.

C.4. Contratos

Identificador	CON.1
Nombre	Obtener datos de acuífero desde la API
Responsabilidades	Permitir la consulta de datos geoespaciales asociados a un acuífero específico desde la base de datos a través de endpoints definidos.
Referencias cruzadas	Lectura de datos (Api), GVDBController
Notas	El sistema debe exponer un endpoint que reciba el ID del acuífero y retorne datos geométricos y descriptivos.
Excepciones	Si el ID no existe, la API retorna un error controlado o conjunto vacío.
Salida	Conjunto de datos geoespaciales (geom, raster, metadata).
Precondiciones	La base de datos debe estar disponible y contener el acuífero solicitado.
Postcondiciones	Los datos quedan disponibles para ser consumidos por el componente de recepción de datos.

Tabla C.8: Contrato funcional CON.1 - Consulta de datos de acuífero

Identificador	CON.2
Nombre	Solicitar datos geoespaciales desde Unity
Responsabilidades	Construir y enviar solicitudes HTTP hacia la API para obtener datos de un acuífero específico.
Referencias cruzadas	Recepción de datos (ApiRequest), JsonHelper
Notas	La solicitud debe incluir un ID válido de acuífero y manejar distintos formatos de respuesta (JSON).
Excepciones	Error de red, timeout o respuesta malformada de la API.
Salida	Datos crudos provenientes de la API.
Precondiciones	El usuario debe haber solicitado un acuífero válido.
Postcondiciones	Los datos quedan parseados y listos, convertidos a objetos internos (Tables / IElementMap).

Tabla C.9: Contrato funcional CON.2 - Solicitud de datos desde Unity

Identificador	CON.3
Nombre	Procesar geometría geoespacial
Responsabilidades	Normalizar, simplificar, triangular y transformar datos geoespaciales en estructuras compatibles con Unity.
Referencias cruzadas	GeometryProcessor, GenerateDataMesh, SimplifyVW
Notas	El procesamiento incluye reducción de vértices, centrado y generación de meshes.
Excepciones	Geometrías inválidas o sin suficientes puntos para triangulación.
Salida	MeshData y HeightMap normalizados.
Precondiciones	Deben existir datos válidos de tipo IElementMap.
Postcondiciones	Los datos quedan listos para ser renderizados en la escena.

Tabla C.10: Contrato funcional CON.3 - Procesamiento geométrico

Identificador	CON.4
Nombre	Generar objetos 3D en escena
Responsabilidades	Instanciar GameObjects en Unity a partir de MeshData y asignar materiales, colores y comportamiento interactivo.
Referencias cruzadas	SceneRenderer, GeometryObjectFactory, UnityMeshFactory
Notas	Cada objeto generado debe mantener referencia a su origen geoespacial.
Excepciones	Fallo en la creación de meshes o asignación de materiales.
Salida	Objetos visibles en la escena 3D.
Precondiciones	Deben existir MeshData válidos.
Postcondiciones	Los objetos quedan registrados en la escena y disponibles para interacción.

Tabla C.11: Contrato funcional CON.4 - Generación de elementos en escena

Identificador	CON.5
Nombre	Ejecutar simulación hidrológica
Responsabilidades	Coordinar la ejecución del modelo hidrológico sobre el terreno digital, simulando flujo, almacenamiento y recarga de agua.
Referencias cruzadas	HydrologySimulator, HydrologyEngine, SurfaceFlowModel
Notas	La simulación puede ejecutarse en pasos discretos o en tiempo continuo.
Excepciones	Parámetros inválidos o estado inconsistente del modelo.
Salida	Estado actualizado de la simulación hidrológica.
Precondiciones	Debe existir un modelo de terreno y datos geoespaciales cargados.
Postcondiciones	Se actualizan los estados de agua superficial, lagos y acuíferos.

Tabla C.12: Contrato funcional CON.5 - Simulación hidrológica

Identificador	CON.6
Nombre	Interacción del usuario con el sistema
Responsabilidades	Gestionar la interacción del usuario con la simulación, visualización y control del sistema.
Referencias cruzadas	SimulationUIController, CameraController, LayerToggleBuilder
Notas	Incluye control de cámara, UI, capas y elementos del mapa.
Excepciones	Eventos inválidos o entradas no reconocidas.
Salida	Acciones ejecutadas en los módulos del sistema.
Precondiciones	El sistema debe estar inicializado y la escena cargada.
Postcondiciones	El estado de la interfaz y/o simulación se actualiza según la acción del usuario.

Tabla C.13: Contrato funcional CON.6 - Interacción del usuario

C.5. Componentes críticos

En esta sección se describen los componentes críticos del sistema GeoVein, los cuales representan las partes fundamentales responsables del procesamiento, visualización e interacción del sistema. Estos componentes fueron definidos a partir de los requerimientos funcionales del sistema y su importancia dentro del flujo general de ejecución.

C.5.1. Lectura de datos(Api):

Este componente pertece a la lógica detrás de la API, aquí es donde se realizan las consultas mas simples hacia la base de datos.

Funcionalidad general:

- Realizar consultas básicas a una base de datos.
- Retornar los datos geométricos.

Entradas:

- ID de acuífero.

Salidas:

- Conjunto de datos que abarcan tipos de datos como id, nombre, región y datos geométricos(geom, raster).

Responsabilidades:

- Comunicar Unity con la base de datos.
- Mantener coherencia entre los datos almacenados en la base de datos y los datos consumidos por Unity.
- Abstraer el acceso directo a la base de datos mediante endpoints definidos.
- Estandarizar la entrega de datos hacia las capas superiores del sistema.

Elementos asociados (clases representativas):

- `Tables`: Define clases para guardar información y posterior envío a los componentes de la interfaz de Unity.
- `GVDBController`: Encargado de definir los puntos de acceso y comportamientos de estos en la api.

C.5.2. Recepción de datos(ApiRequest):

Este componente es quién realiza las consultas a la API y quién guarda los datos a un lenguaje entendible para Unity.

Funcionalidades:

- Construir solicitudes HTTP hacia la API según el identificador del acuífero.
- Manejar respuestas de la API en distintos formatos (JSON u otros formatos serializados).
- Parsear y mapear los datos recibidos a objetos del sistema (`Tables`).
- Validar la integridad básica de los datos antes de enviarlos a las capas superiores.
- Exponer métodos de acceso a los datos ya procesados para Unity.

Entradas:

- ID de acuífero.
- Conjunto de objetos que interceptan con el acuífero enviados por la API.

Salidas:

- Conjunto de objetos que interceptan con el acuífero como IElementMap.

Responsabilidades:

- Consulta a la API.
- Guarda la información recibida por la API.

Elementos asociados (clases representativas):

- `APIRequest`: Recbibe los datos desde la API
- `Tables` : Define clases para guardar información recibida por la API, contiene clases como acuífero, cuencas, lagos y dem.
- `JsonHelper`: Es un compnete para transformar la información llegada de la API en objetos asociados a la clase
- `GeoLocationHelper`: Otro componente de utilidad que ayuda a rescatar el centro por coordenadas(latitud y longitud).
- `IElementMap`: Es la interfaz base que representa un elemento del mapa. A partir de ella derivan otras interfaces, como `IRaster` e `IGeometricElement`, las cuales definen el comportamiento específico de los distintos tipos de elementos utilizados por el componente `Tables`.

C.5.3. Procesado de datos(GeometryProcessor)

Este componente se encagarga de normalizar e interpretar los datos geoespaciales que vienen de una base de datos de PostGIS a un lenguaje que unity pueda manejar y posicionar dentro del espacio.

Responsabilidades:

- Normaliza los conjunto de datos.

- Reducir la cantidad de vértices.
- Triangular vértices.
- Crear contorno.
- Crear volumen del objeto.
- Centrar objetos.
- Normalizar altura del ráster.
- Interpretar altura del ráster.

Entradas:

- Lista de conjuntos de datos IElementMap

Salidas:

- Conjunto de datos Meshdata.
- HeightMap.

Elementos asociados (clases representativas):

- `DemMaskProcessor`: Componente encargado de generar y procesar máscaras espaciales a partir del modelo digital de elevación (DEM).
- `ExtrudeMeshes`: Clase que transforma geometrías bidimensionales en volúmenes tridimensionales mediante procesos de etrusión. Permite asignar altura a polígonos para generar representación 3D coherente del terreno o entidades geoespaciales.
- `GeometryProcessor`: Componente central del pipeline geométrico encargado de coordinar el procesamiento de datos geoespaciales. Gestiona la normalización, simplificación, triangulación, generación de meshes y preparación de datos para renderizado y simulación.
- `GenerateDataMesh`: Clase encargada de la construcción de estructuras `MeshData` a partir de geometrías procesadas. Realiza la triangulación de polígonos y la generación de mallas compatibles con Unity.

- `MeshData` : Estructura de datos intermedia que representa una malla geométrica dentro del sistema. Contiene información como vértices, triángulos, contorno, centro geométrico y referencia al objeto fuente, sirviendo como puente entre procesamiento y renderizado.
- `SimplifyVW`: [22]Algoritmo de simplificación de polígonos basado en el método de Visvalingam-Whyatt optimizado mediante estructura heap. Su función es reducir la cantidad de vértices manteniendo la forma general de la geometría, mejorando el rendimiento del sistema.

C.5.4. Generación de elementos(SceneRenderer)

Aquí se encarga de crear mesh, componente de unity para el renderizado, el cual es asignado a los elementos que esta misma clase instancia en la escena de Unity.

Responsabilidades:

- Instancia los componentes mesh.
- Instanciar los objetos con los mesh asignados.
- Asigna Color a los objetos.
- Asigna material a los objetos.
- Asigna etiquetas.
- Asigna por posición.

Entradas:

- Conjunto de datos Meshdata

Salidas:

- Sin salida.

Elementos asociados (clases representativas):

- `SceneRenderer`: componente encargado de la generación y gestión de objetos 3D en la escena de Unity a partir de datos `MeshData`. Convierte estructuras geométricas en elementos visuales interactivos, asignando meshes, materiales y comportamiento dentro del entorno.

- `GeometryObjectFactory`: clase responsable de la creación de objetos `GameObject` en la escena, encapsulando la instanciación, configuración y asignación de componentes visuales y de interacción.
- `GeometryProfileResolver`: componente encargado de resolver perfiles de visualización asociados a cada elemento geométrico, definiendo materiales, reglas de renderizado y comportamiento visual según el tipo de entidad.
- `UnityMeshFactory`: clase utilitaria encargada de convertir estructuras `MeshData` en meshes nativos de Unity, generando la geometría renderizable.
- `GeometryRenderItem`: estructura intermedia que representa un elemento listo para renderizado, incluyendo su mesh, metadata, posición y referencia a su fuente de datos.
- `MapTarget`: componente asociado a los objetos instanciados en escena que permite su interacción y navegación dentro del sistema.
- `BottomTargetNavigator`: sistema encargado de registrar y gestionar elementos interactivos de la escena, permitiendo navegación y selección de objetos geoespaciales.

C.5.5. Simulación hidrológica

Este componente es responsable de ejecutar la simulación hidrológica sobre el modelo digital del terreno. Para ello, recibe la información espacial procesada previamente, configura los parámetros de simulación y coordina los distintos modelos encargados de representar procesos como la precipitación, el flujo superficial, el almacenamiento en lagos, la recarga de acuíferos y el transporte entre cuencas.

Funcionalidad general:

- Inicializar el motor de simulación hidrológica.
- Ejecutar la simulación paso a paso sobre el terreno.
- Administrar los parámetros de configuración de la simulación.
- Proporcionar los resultados para su visualización y consulta.

Entradas:

- Modelo digital del terreno (HeightMap).
- Información espacial de lagos, acuíferos, cuencas y máscara del DEM.
- Parámetros de configuración de la simulación hidrológica.

Salidas:

- Estado actualizado de la simulación hidrológica.
- Distribución del agua superficial.
- Información de almacenamiento en lagos, recarga de acuíferos y agua acumulada por cuenca.

Responsabilidades:

- Coordinar la ejecución del motor de simulación hidrológica.
- Gestionar el ciclo de vida de la simulación (inicialización, ejecución, pausa y reinicio).
- Mantener la configuración de los parámetros de simulación.
- Entregar los resultados al componente encargado de la visualización.

Elementos asociados (clases representativas):

- `HydrologySimulator`: coordina la simulación y administra su ciclo de vida.
- `HydrologyEngine`: ejecuta cada iteración del modelo hidrológico.
- `HydrologyState`: almacena el estado de la simulación.
- `SurfaceFlowModel`: calcula el flujo superficial.
- `LakeStorageModel`: modela el almacenamiento de agua en lagos.
- `AquiferRechargePort`: calcula la recarga de acuíferos.
- `BasinFlowRouter`: gestiona el transporte de agua entre cuencas.

C.5.6. Interactividad(CameraController)

Este componente corresponde al módulo encargado de gestionar la interacción entre el usuario y el sistema GeoVein. Su objetivo principal es permitir el control de los distintos procesos del sistema, así como la visualización del estado y los resultados generados por los componentes internos.

Funcionalidad general:

- Permitir la interacción del usuario con el sistema mediante controles de interfaz.
- Coordinar la ejecución de las distintas funcionalidades del sistema.
- Mostrar información relevante sobre el estado de los procesos en ejecución.
- Facilitar la navegación dentro del entorno de simulación.

Entradas:

- Eventos de usuario (teclado, mouse y elementos de interfaz gráfica).
- Parámetros configurables de simulación ingresados por el usuario.
- Acciones de control sobre la simulación (iniciar, pausar, reiniciar).

Salidas:

- Llamadas a los distintos componentes del sistema (simulación, procesamiento de datos y visualización).
- Actualización de la interfaz gráfica con información del estado del sistema.
- Activación de elementos de visualización dentro del entorno 3D.

Responsabilidades:

- Gestionar la interacción del usuario con el sistema.
- Actuar como puente entre la interfaz gráfica y los módulos internos.
- Controlar el flujo de ejecución de la simulación desde el punto de vista del usuario.
- Mantener actualizada la información mostrada en pantalla.

Elementos asociados (clases representativas):

- **Control de simulación e interacción principal**
  - `SimulationUIController`: gestiona la interfaz de control de la simulación.
  - `ControlesData`: almacena y distribuye datos de configuración de la UI.
  - `QuitApplication`: gestiona la salida del sistema.
- **Cámara y navegación**
  - `CameraController`: controla el movimiento y comportamiento de la cámara.
  - `MapTarget`: gestiona el objetivo de navegación en el entorno.
  - `BottomTargetNavigator`: facilita la navegación dentro del mapa o escena.
- **Visualización y selección de elementos**
  - `WorldGrid`: representa la grilla base del mundo.
  - `WorldLabel`: gestiona etiquetas o información visual en el entorno.
  - `AxisGizmo`: referencia visual de ejes en la escena.
- **Edición de capas y elementos del mapa**
  - `LayerColorEditor`: permite editar colores de capas.
  - `LayerColorButtonBuilder`: genera botones de selección de color por capa.
  - `LayerToggleBuilder`: gestiona activación/desactivación de capas.
- **Creación y UI de elementos geoespaciales**
  - `GeometryCardBuilder`: construye tarjetas de información de geometría.
  - `FichaElementoUI`: muestra información detallada de elementos.
- **Configuración de visualización**
  - `ForceAspectRatio16x9`: fuerza relación de aspecto en UI.

Estos componentes se implementan de manera desacoplada para permitir escalabilidad y reutilización dentro del sistema.

D. Validación técnica del sistema

D.1. Casos de prueba

Tabla D.1: Caso de prueba CP-01. Carga de un acuífero desde la base de datos.

Campo	**Descripción**
Caso de prueba	CP-01
Requerimiento asociado	RF-01
Objetivo	Verificar la carga de un acuífero desde la base de datos.
Entrada	ID del acuífero = 1.
Procedimiento	1. Iniciar la aplicación. 2. Solicitar la carga del acuífero. 3. Esperar la respuesta de la API.

Tabla D.2: Caso de prueba CP-02. Generación de la malla tridimensional del acuífero.

Campo	**Descripción**
Caso de prueba	CP-02
Requerimiento asociado	RF-02, RF-03

Campo	**Descripción**
Objetivo	Verificar la generación de la malla tridimensional a partir de los datos geoespaciales obtenidos.
Entrada	Geometría y raster correspondientes al acuífero seleccionado.
Procedimiento	1. Cargar un acuífero. 2. Ejecutar el procesamiento de la geometría. 3. Generar la malla tridimensional.
Resultado esperado	El sistema genera correctamente una malla 3D sin errores de procesamiento.
Comprobación	Visualización de la malla generada.

Tabla D.3: Caso de prueba CP-03. Renderizado del modelo tridimensional en Unity.

Campo	**Descripción**
Caso de prueba	CP-03
Requerimiento asociado	RF-03
Objetivo	Verificar que el modelo tridimensional sea renderizado correctamente dentro de la escena.
Entrada	Malla tridimensional generada.
Procedimiento	1. Generar la malla 3D. 2. Instanciar el modelo en la escena. 3. Verificar su visualización.
Resultado esperado	El acuífero se visualiza correctamente en el entorno 3D sin errores gráficos.
Comprobación	Inspección visual de la escena y verificación de la consola de Unity.

Tabla D.4: Caso de prueba CP-04. Simulación hidrológica del acuífero.

Campo	**Descripción**
Caso de prueba	CP-04
Requerimiento asociado	RF-03
Objetivo	Verificar el funcionamiento de la simulación hidrológica sobre el modelo tridimensional.
Entrada	Modelo 3D cargado y parámetros de simulación por defecto.
Procedimiento	1. Cargar el modelo del acuífero. 2. Iniciar la simulación. 3. Observar el comportamiento del flujo de agua.
Resultado esperado	La simulación se ejecuta correctamente y representa el comportamiento esperado del flujo.
Comprobación	Observación visual de la simulación y revisión de mensajes en la consola.

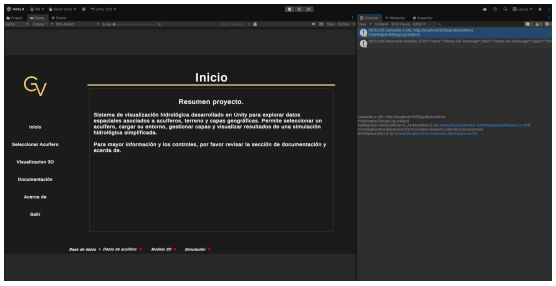
Tabla D.5: Caso de prueba CP-05. Desplazamiento del usuario en el entorno tridimensional.

Campo	**Descripción**
Caso de prueba	CP-05
Requerimiento asociado	RF-03
Objetivo	Verificar que el usuario pueda desplazarse e inspeccionar el modelo tridimensional mediante los controles implementados.
Entrada	Escena con el acuífero cargado.

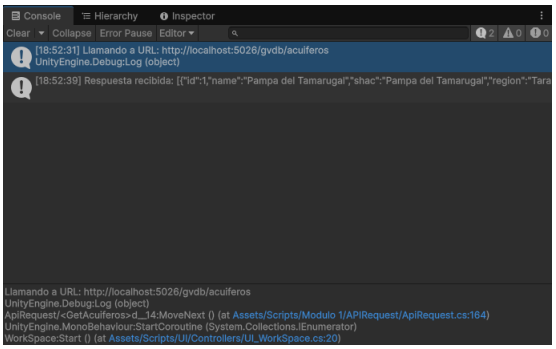
Campo	**Descripción**
Procedimiento	1. Iniciar la escena. 2. Utilizar los controles de movimiento. 3. Recorrer el entorno desde distintos puntos de vista.
Resultado esperado	El usuario puede desplazarse libremente por la escena y observar el modelo desde diferentes perspectivas.
Comprobación	Inspección visual del desplazamiento y ausencia de errores durante la navegación.

D.2. Evidencias de los casos de prueba

D.2.1. CP-01 Carga de acuífero

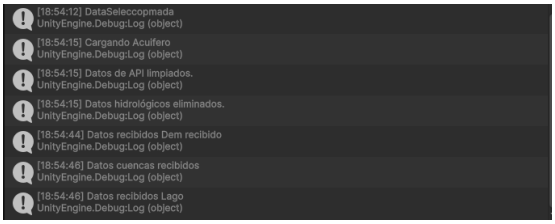


(a) Inicio de la aplicación en Unity



(b) Mensajes registrados durante el inicio del sistema.

(c) Selección del acuífero para su carga.

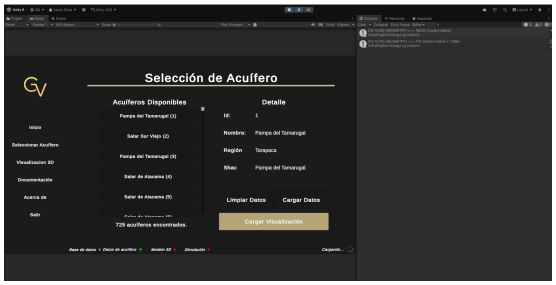


(d) Respuesta de la API con la información del acuífero.

(e) Registro de la geometría recibida desde la API.

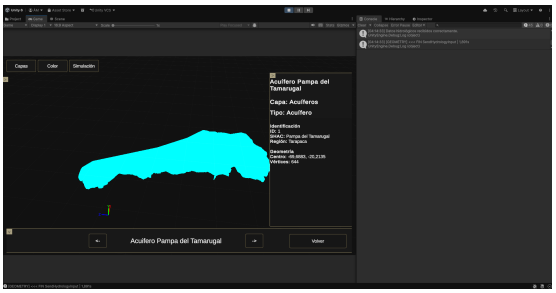
Figura D.1: Evidencia del caso de prueba 1.

D.2.2. CP-02 Generación de malla tridimensional del acuífero



(a) Registro de la geometría recibida desde la API.

(b) Registro de la geometría recibida desde la API.



(c) Registro de la geometría recibida desde la API.

Figura D.2: Evidencia del caso de prueba 2.

D.2.3. CP-03 Renderizado del modelo tridimensional en Unity

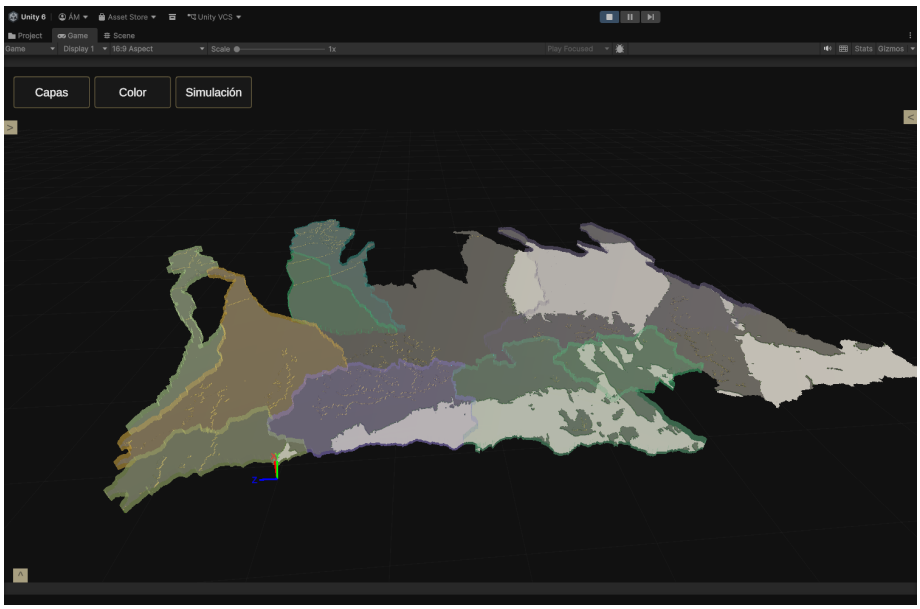


Figura D.3: Registro del modelo tridimensional de los objetos.

D.2.4. CP-04. Simulación hidrológica del acuífero

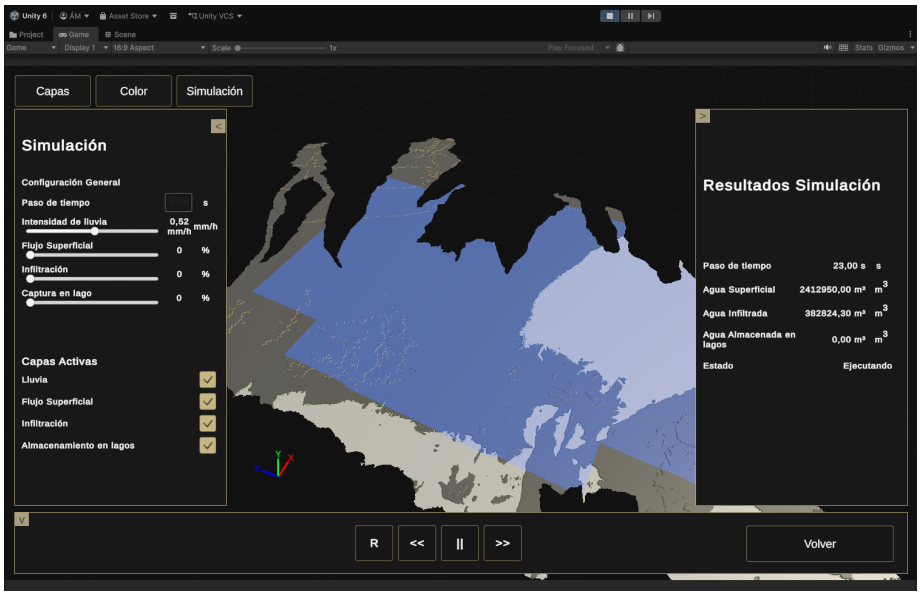
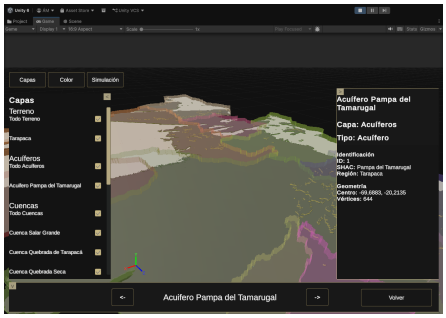


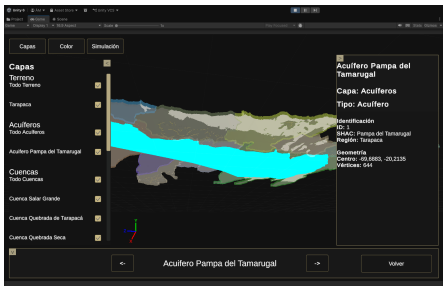
Figura D.4: Registro del modelo tridimensional de los objetos.

D.2.5. CP-05 Desplazamiento del usuario en el entorno tridimensional

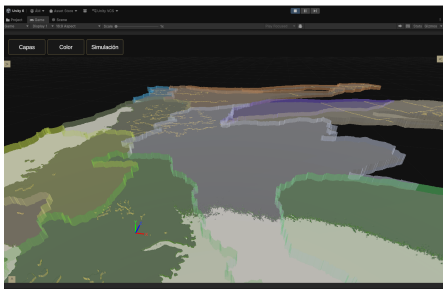
(a) Muestra un estado inicial del modelo.



(b) Acercamiento de cámara.



(c) Rotación de cámara.



(d) Acercamiento al modelo.

Figura D.5: Evidencia del caso de prueba 3.

E. Cuestionario de usabilidad usuarios

E.1. Cuestionario de usabilidad

E.1.1. Perfil

: Esta sección busca recopilar información general sobre el perfil de los/las participantes. Las respuestas serán utilizadas únicamente para caracterizar la muestra del estudio y serán analizadas de forma anónima.

Tabla E.1: Preguntas del instrumento de validación parte 1: Perfil.

Índice	Pregunta	Alternativas
P1	Rango de edad	▪ 18 a 20 años. ▪ 21 a 25 años. ▪ 26 a 30 años. ▪ 31 a 40 años. ▪ Más de 40 años.

Índice	Pregunta	Alternativas
P2	Área de estudio, trabajo o interés principal	▪ Informática / computación / desarrollo de software. ▪ Ingeniería / ciencias aplicadas. ▪ Geografía / cartografía / SIG. ▪ Medioambiente / recursos naturales / hidrología. ▪ Diseño / visualización / multimedia. ▪ Otra. ▪ Prefiero no responder.
P3	¿Ha utilizado anteriormente herramientas de mapas o información geográfica?Ejemplos: Google Maps avanzado, QGIS, ArcGIS, Google Earth, visores territoriales, mapas técnicos.	▪ Si, frecuentemente. ▪ Si, algunas veces. ▪ Muy pocas veces. ▪ No, nunca.
P4	¿Ha utilizado anteriormente software SIG?	▪ Si, tengo experiencia. ▪ Si, pero poca experiencia. ▪ He escuchado sobre ellos, pero los he usado. ▪ No, nunca los he usado.

Índice	Pregunta	Alternativas
P5	¿Qué tan familiarizado/a está con entornos 3D interactivos? Ejemplos: videojuegos 3D, recorridos virtuales, simuladores, Unity, Blender, SketchUp u otros.	▪ Muy familiarizado/a. ▪ Si, algunas veces. ▪ Muy pocas veces. ▪ No, nunca.
P6	¿Ha utilizado anteriormente herramientas de visualización 3D?	▪ Si, frecuentemente. ▪ Si, algunas veces. ▪ Muy pocas veces. ▪ No, nunca.
P7	¿Qué tan familiarizado/a está con conceptos relacionados con acuíferos, cuencas, lagos o terreno?	▪ Muy familiarizado/a. ▪ Algo familiarizado/a. ▪ Poco familiarizado/a. ▪ Nada familiarizado/a.
P8	¿Considera que tiene experiencia previa interpretando mapas o información espacial?	▪ Si, bastante experiencia. ▪ Si, algo de experiencia. ▪ Muy poca experiencia. ▪ No tengo experiencia previa.

E.1.2. Comprensión inicial de la información

Antes de utilizar GeoVein, observe la siguiente imagen de un caso hidrogeológico representado en formato estático.

La información muestra un acuífero y algunos elementos geoespaciales como las cuencas. Responda las siguientes preguntas según lo que logra comprender solo a partir de esta información inicial.

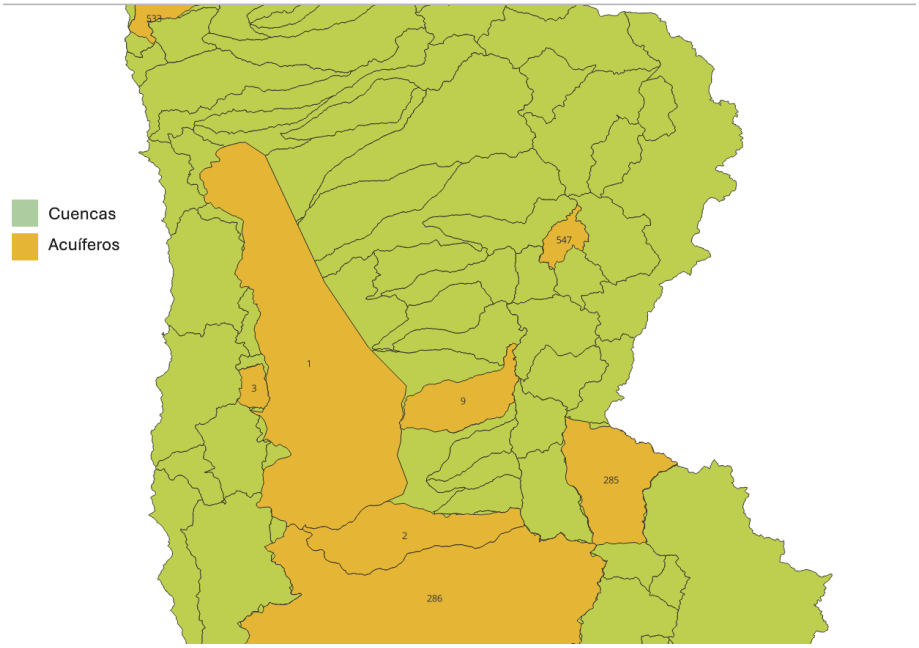


Figura E.1: Imagen referencial de GIS en 2D.

Tabla E.2: Preguntas del instrumento de validación parte 2: Comprensión inicial de la información.

Índice	**Pregunta**	**Alternativas**
P1	¿Qué elementos logra identificar en la imagen?	▪ Acuíferos. ▪ Cuencas. ▪ Límites entre zonas. ▪ No logro identificar claramente los elementos.

Índice	Pregunta	Alternativas
P2	¿Qué tan clara le parece la relación espacial entre acuíferos y cuencas?	Escala de Likert (1 = Nada clara; 2 = Poco clara; 3 = Neutral; 4 = Clara; 5 = Muy clara)
P3	¿Qué tan fácil le resulta interpretar esta representación 2D?	Escala de Likert (1 = Muy difícil; 2 = Un poco difícil; 3 = Neutral; 4 = Un poco fácil; 5 = Muy fácil)
P4	Con sus palabras, describa qué entiende de la relación entre los elementos.	Escala de Likert (1 = Nada clara; 2 = Poco clara; 3 = Neutral; 4 = Clara; 5 = Muy clara)
P5	¿Considera que esta representación 2D es suficiente para comprender la información espacial del caso?	Escala de Likert (1 = Desacuerco; 2 = Un poco en desacuerdo; 3 = Neutral; 4 = Un poco de acuerdo; 5 = En acuerdo)

E.1.3. Uso de GeoVein

En esta sección deberá ejecutar GeoVein y realizar una serie de tareas dentro de la herramienta. El objetivo no es evaluar sus conocimientos, sino observar si el software permite explorar e interpretar información geoespacial de forma clara.

Antes de comenzar, procure estar en un entorno tranquilo y sin interrupciones. Siga las tareas en el orden indicado y responda según su experiencia.

Instrucciones de ejecución:

En el siguiente link se encuentra el software: *https://drive.google.com/file/d/1rm1B0UxqRghy9F*
Después de descargar el .rar, descomprima el archivo, luego inicie "*GeoVein.bat*". Espere unos segundos hasta que se inicie la aplicación GeoVein. Una vez abierta la herramienta, realice las tareas indicadas a continuación:Si la aplicación no inicia correctamente, indíquelo en la pregunta correspondiente y continúe con el formulario.

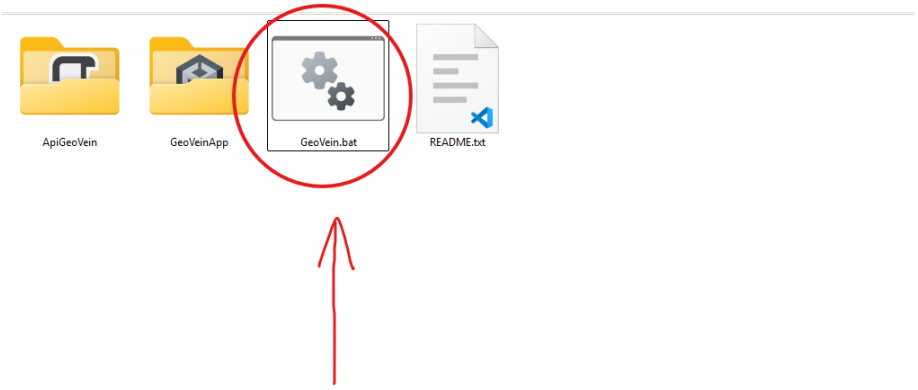


Figura E.2: Instructivo del ejecutable.

Lista de tareas:

Tabla E.3: Tareas del instrumento de validación parte 3: Instrucciones de ejecución.

Tarea	**Pregunta**	**Instrucción**
Tarea 1	Inicio de aplicación.	Abra GeoVein.bat
Tarea 2	Cargar acuífero.	Al abrir GeoVein, observe que a su izquierda se encuentra un menú, diríjase a "Seleccionar Acuífero", seleccione uno de los acuiferos disponibles y presiona el boton cargar acuífero. Una vez cargado los datos presione Çargar Visualización", luego de que termine de cargar los datos, diríjase otra vez al menú que se encuentra en la izquierda y presione "Visualización 3D".
Tarea 3	Visualización inicial.	Observe la escena principal y los elementos disponibles.

Tarea	Pregunta	Instrucción
Tarea 4	Navegación en la escena 3D.	Mueva la cámara para observar el modelo desde distintos ángulos. Intente acercarse, alejarse y cambiar la perspectiva de observación. (Si no conoce los controles visite la sección de documentación).
Tarea 5	Identificación de elementos.	Observe la escena principal y los elementos disponibles.
Tarea 6	Relación espacial entre elementos.	Observe cómo se ubican los elementos entre sí dentro de la escena 3D.
Tarea 7	Cambio de elementos.	Seleccione otro acuífero o cambie a otro elemento disponible dentro de la herramienta, si la interfaz lo permite.
Tarea 8	Interpretación de la escena.	
Tarea 9	Acceso a la simulación .	Luego de cargar un acuífero, en la sección de visualización hay un botón que lo lleva a la sección relacionada con simulación o visualización hidrológica. Active la simulación disponible en la herramienta.
Tarea 10	Observación de la simulación.	Una vez activada la simulación, observe los cambios visuales que ocurren en la escena o en la visualización correspondiente.
Tarea 11	Interpretación de la simulación.	Observe la simulación durante algunos segundos e intente interpretar qué representa.
Tarea 12	Comprensión del comportamiento hidrológico.	
Tarea 13	Relación entre simulación y elementos del mapa.	Observe si la simulación parece relacionarse con el terreno, acuífero, cuencas o lagos representados.
Tarea 14	Opinión sobre la simulación.	

Tabla E.4: Preguntas del instrumento de validación parte 2: Comprensión inicial de la información.

Tarea	**Pregunta**	**Alternativas**
Tarea 1	¿Pudo iniciar GeoVein correctamente?	▪ Si, sin problemas. ▪ Si, pero tardó o tuve alguna dificultad. ▪ No pude iniciar la apliación.
Tarea 2	¿Pudo seleccionar y cargar un acuífero correctamente?	▪ Si, pude seleccionarlo y cargarlo sin dificultad. ▪ Si, pude hacerlo, pero tuve algunas dificultades. ▪ No pude carga el acuífero. ▪ No encontré claramente donde seleccionar o cargar el acuífero.
Tarea 3	¿Pudo identificar que la herramienta muestra información geoespacial relacionada con acuíferos?	▪ Si, claramente. ▪ Si, pero con dificultad. ▪ No lo pude identificar.
Tarea 4	¿Cómo fue la navegación en la escena 3D?	▪ Fácil de usar. ▪ Medianamente fácil. ▪ Difícil de usar. ▪ No pude moverme correctamente en la escena.

Tarea	Pregunta	Alternativas
Tarea 5	¿Qué elementos logró identificar dentro de GeoVein? Puede marcar más de una opción.	▪ Acuífero. ▪ Terreno o relevie. ▪ Cuencas. ▪ Lagos. ▪ Etiquetas o nombres de elementos. ▪ No logré identificar claramente los elementos.
Tarea 6	¿Qué tan clara le pareció la relación espacial entre el acuífero, el terreno y los elementos asociados?	Escala de Likert (1 = Nada clara; 2 = Poco clara; 3 = Moderadamente clara; 4 = Clara; 5 = Muy clara)
Tarea 7	¿Pudo cambiar o explorar otro elemento?	▪ Sí, sin dificultad. ▪ Sí, pero con dificultad. ▪ No pude hacerlo. ▪ No encontré una opción para cambiar de elemento.
Tarea 8	Después de explorar GeoVein, describa brevemente qué entiende de la escena observada. Puede mencionar qué elementos aparecen, cómo se relacionan o qué información le resultó más clara.	Respuesta abierta

Tarea	**Pregunta**	**Alternativas**
Tarea 9	¿Pudo encontrar y activar la simulación?	▪ Sí, pude encontrarla y activarla sin dificultad. ▪ Sí, pude activarla, pero me costó encontrarla. ▪ No pude activar la simulación. ▪ No encontré una opción clara para inciar la simulación.
Tarea 10	¿Logró identificar algún cambio visual asociado a la simulación?	▪ Sí, los cambios fueron claros. ▪ Sí, pero los cambios fueron poco evidentes. ▪ No logré identificar cambios visuales. ▪ No estoy seguro/a de que debía observar.
Tarea 11	¿Qué cree que representa la simulación mostrada?	▪ Movimiento o acumulación de agua. ▪ Relación entre lluvia, terreno y elementos hidrogeológicos. ▪ Cambio visual sin significado claro. ▪ No logré interpretar que representa.

Tarea	Pregunta	Alternativas
Tarea 12	¿Qué tan clara le pareció la relación espacial entre el acuífero, el terreno y los elementos asociados?	Escala de Likert (1 = Nada clara; 2 = Poco clara; 3 = Moderadamente clara; 4 = Clara; 5 = Muy clara)
Tarea 13	¿Qué tan clara le pareció la relación espacial entre el acuífero, el terreno y los elementos asociados?	Escala de Likert (1 = Nada clara; 2 = Poco clara; 3 = Moderadamente clara; 4 = Clara; 5 = Muy clara)
Tarea 14	Describa brevemente qué entendió de la simulación y qué aspecto le pareció más claro o más confuso.	Respuestas abiertas

E.2. Evaluación de usabilidad y comprensión espacial

Luego de utilizar GeoVein, responda las siguientes afirmaciones según su experiencia con la herramienta.

Usabilidad general:

Tabla E.5: Preguntas del instrumento de validación parte 4: Evaluación de usabilidad y comprensión espacial.

Índice	Pregunta	Alternativas
P1	GeoVein fue fácil de utilizar.	Escala de Likert (1 = Desacuerco; 2 = Un poco en desacuerdo; 3 = Neutral; 4 = Un poco de acuerdo; 5 = En acuerdo)
P2	Las opciones del menú fueron claras.	Escala de Likert (1 = Desacuerco; 2 = Un poco en desacuerdo; 3 = Neutral; 4 = Un poco de acuerdo; 5 = En acuerdo)
P3	Pude seleccionar y cargar un acuífero sin mayores dificultades.	Escala de Likert (1 = Desacuerco; 2 = Un poco en desacuerdo; 3 = Neutral; 4 = Un poco de acuerdo; 5 = En acuerdo)

Índice	Pregunta	Alternativas
P4	La navegación dentro de la escena 3D fue comprensible	Escala de Likert (1 = Desacuerco; 2 = Un poco en desacuerdo; 3 = Neutral; 4 = Un poco de acuerdo; 5 = En acuerdo)
P5	Los controles de cámara permitieron observar adecuadamente el modelo.	Escala de Likert (1 = Desacuerco; 2 = Un poco en desacuerdo; 3 = Neutral; 4 = Un poco de acuerdo; 5 = En acuerdo)

Claridad visual:

Tabla E.6: Preguntas del instrumento de validación parte 4: Evaluación de usabilidad y comprensión espacial.

Índice	Pregunta	Alternativas
P6	Pude distinguir claramente los elementos representados en la escena.	Escala de Likert (1 = Desacuerco; 2 = Un poco en desacuerdo; 3 = Neutral; 4 = Un poco de acuerdo; 5 = En acuerdo)
P7	Pude identificar el acuífero seleccionado dentro del entorno 3D.	Escala de Likert (1 = Desacuerco; 2 = Un poco en desacuerdo; 3 = Neutral; 4 = Un poco de acuerdo; 5 = En acuerdo)
P8	Pude reconocer el terreno o relieve asociado al acuífero.	Escala de Likert (1 = Desacuerco; 2 = Un poco en desacuerdo; 3 = Neutral; 4 = Un poco de acuerdo; 5 = En acuerdo)
P9	Pude distinguir los elementos asociados, como cuencas o lagos, cuando estaban presentes.	Escala de Likert (1 = Desacuerco; 2 = Un poco en desacuerdo; 3 = Neutral; 4 = Un poco de acuerdo; 5 = En acuerdo)
P10	Las etiquetas, nombres o información mostrada ayudaron a comprender lo que estaba observando.	Escala de Likert (1 = Desacuerco; 2 = Un poco en desacuerdo; 3 = Neutral; 4 = Un poco de acuerdo; 5 = En acuerdo)

Comprensión espacial:

Tabla E.7: Preguntas del instrumento de validación parte 4: Evaluación de usabilidad y comprensión espacial.

Índice	Pregunta	Alternativas
P11	La visualización 3D me permitió comprender mejor la forma y ubicación del acuífero.	Escala de Likert (1 = Desacuerco; 2 = Un poco en desacuerdo; 3 = Neutral; 4 = Un poco de acuerdo; 5 = En acuerdo)
P12	GeoVein me ayudó a entender la relación espacial entre el acuífero y las cuencas asociadas.	Escala de Likert (1 = Desacuerco; 2 = Un poco en desacuerdo; 3 = Neutral; 4 = Un poco de acuerdo; 5 = En acuerdo)
P13	GeoVein me ayudó a comprender mejor la relación entre los elementos representados en comparación con la imagen 2D inicial.	Escala de Likert (1 = Desacuerco; 2 = Un poco en desacuerdo; 3 = Neutral; 4 = Un poco de acuerdo; 5 = En acuerdo)
P14	La posibilidad de mover la cámara y observar el modelo desde distintos ángulos facilitó la comprensión de la información.	Escala de Likert (1 = Desacuerco; 2 = Un poco en desacuerdo; 3 = Neutral; 4 = Un poco de acuerdo; 5 = En acuerdo)
P15	La representación tridimensional aporta valor para explorar información geoespacial.	Escala de Likert (1 = Desacuerco; 2 = Un poco en desacuerdo; 3 = Neutral; 4 = Un poco de acuerdo; 5 = En acuerdo)

Utilidad percibida:

Tabla E.8: Preguntas del instrumento de validación parte 4: Evaluación de usabilidad y comprensión espacial.

Índice	**Pregunta**	**Alternativas**
P16	Considero que GeoVein puede ser útil para visualizar información hidrogeológica.	Escala de Likert (1 = Desacuerco; 2 = Un poco en desacuerdo; 3 = Neutral; 4 = Un poco de acuerdo; 5 = En acuerdo)
P17	Considero que una herramienta como GeoVein puede facilitar la exploración de datos geoespaciales.	Escala de Likert (1 = Desacuerco; 2 = Un poco en desacuerdo; 3 = Neutral; 4 = Un poco de acuerdo; 5 = En acuerdo)
P18	Preferiría explorar este tipo de información mediante una herramienta interactiva 3D antes que solo mediante una imagen 2D estática.	Escala de Likert (1 = Desacuerco; 2 = Un poco en desacuerdo; 3 = Neutral; 4 = Un poco de acuerdo; 5 = En acuerdo)
P19	La herramienta permite presentar información geoespacial de una forma más comprensible.	Escala de Likert (1 = Desacuerco; 2 = Un poco en desacuerdo; 3 = Neutral; 4 = Un poco de acuerdo; 5 = En acuerdo)
P20	En general, GeoVein cumple adecuadamente su propósito de apoyar la visualización y comprensión espacial de acuíferos.	Escala de Likert (1 = Desacuerco; 2 = Un poco en desacuerdo; 3 = Neutral; 4 = Un poco de acuerdo; 5 = En acuerdo)

Simulación hidrológica:

Tabla E.9: Preguntas del instrumento de validación parte 4: Evaluación de usabilidad y comprensión espacial.

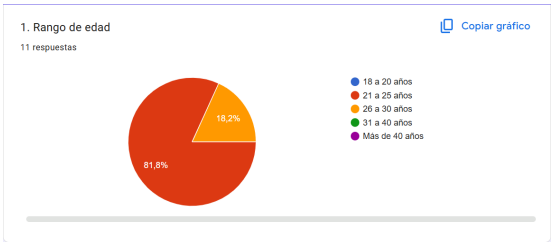
Índice	**Pregunta**	**Alternativas**
P21	La simulación fue fácil de encontrar dentro de la herramienta.	Escala de Likert (1 = Desacuerco; 2 = Un poco en desacuerdo; 3 = Neutral; 4 = Un poco de acuerdo; 5 = En acuerdo)
P22	La simulación fue fácil de activar.	Escala de Likert (1 = Desacuerco; 2 = Un poco en desacuerdo; 3 = Neutral; 4 = Un poco de acuerdo; 5 = En acuerdo)
P23	Los cambios visuales de la simulación fueron claros.	Escala de Likert (1 = Desacuerco; 2 = Un poco en desacuerdo; 3 = Neutral; 4 = Un poco de acuerdo; 5 = En acuerdo)
P24	24. Pude comprender qué fenómeno o comportamiento representaba la simulación.	Escala de Likert (1 = Desacuerco; 2 = Un poco en desacuerdo; 3 = Neutral; 4 = Un poco de acuerdo; 5 = En acuerdo)
P25	25. La simulación ayudó a complementar la visualización del acuífero y su entorno.	Escala de Likert (1 = Desacuerco; 2 = Un poco en desacuerdo; 3 = Neutral; 4 = Un poco de acuerdo; 5 = En acuerdo)
P26	26. La simulación permitió comprender mejor la relación entre el terreno y el comportamiento del agua.	Escala de Likert (1 = Desacuerco; 2 = Un poco en desacuerdo; 3 = Neutral; 4 = Un poco de acuerdo; 5 = En acuerdo)
P27	27. Considero que la simulación aporta valor a la herramienta GeoVein.	Escala de Likert (1 = Desacuerco; 2 = Un poco en desacuerdo; 3 = Neutral; 4 = Un poco de acuerdo; 5 = En acuerdo)

Preguntas abiertas:

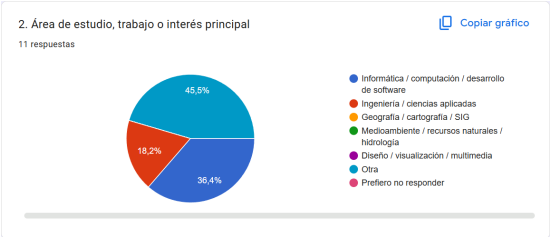
Tabla E.10: Preguntas del instrumento de validación parte 4: Evaluación de usabilidad y comprensión espacial.

Índice	**Pregunta**	**Alternativas**
P1	¿Qué fue lo más claro o útil de GeoVein?	
P2	¿Qué fue lo más difícil o confuso al utilizar GeoVein?	
P3	¿Qué elementos logró comprender mejor usando GeoVein en comparación con la imagen 2D inicial?	
P4	¿Qué cambios o mejoras propondría para facilitar el uso de la herramienta?	
P5	Con sus palabras, describa qué entendió sobre la relación espacial entre el acuífero, el terreno y los elementos asociados.	

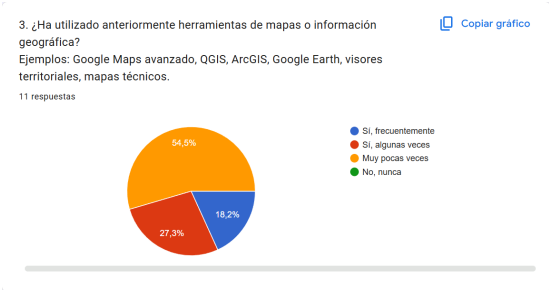
E.3. Resultados de Cuestionario de usabilidad Perfil



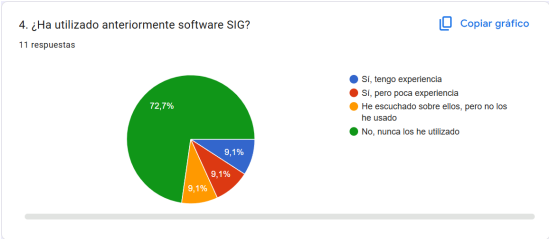
(a) Resultados de la consulta de rango de edad.



(b) Resultados área de interés.

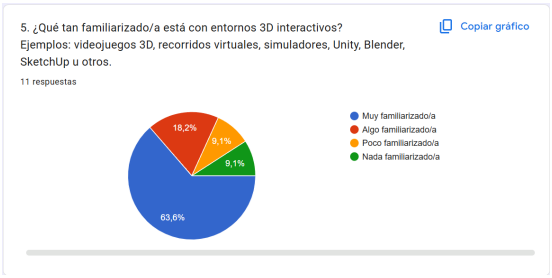


(c) Resultados de uso previo de software de información geográfica.

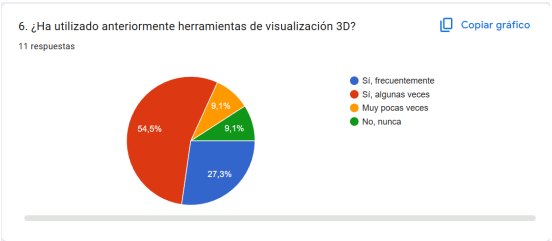


(d) Resultados de previo uso de SIG.

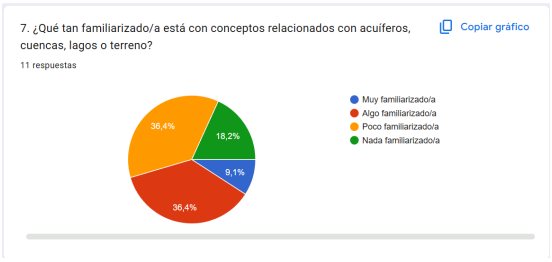
Figura E.3: Resultados del perfil de participantes: preguntas 1 a 4.



(a) Resultados de uso previo de entornos interactivos.



(b) Resultados de uso de herramientas 3D.

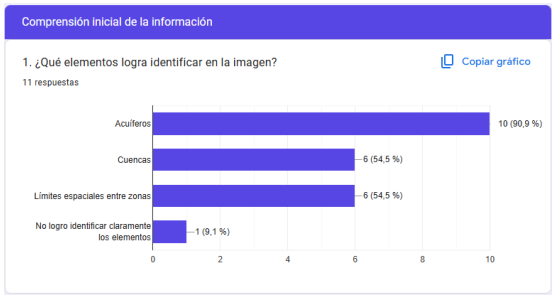


(c) Resultados de familiaridad con conceptos hidrogeológicos.

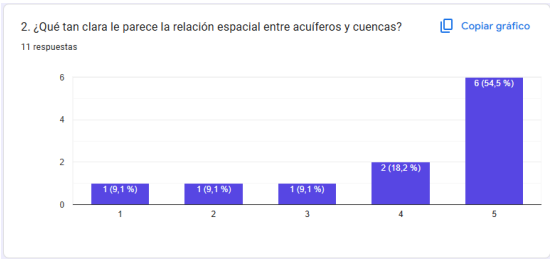
(d) Experiencia previa interpretando mapas.

Figura E.4: Resultados del perfil de participantes: preguntas 5 a 8.

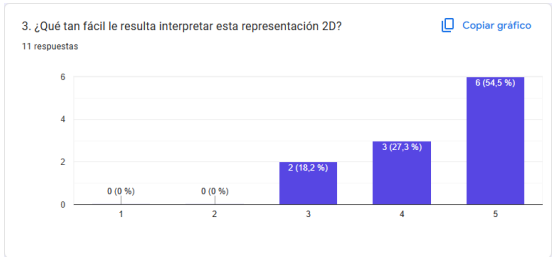
E.4. Resultados de Cuestionario de usabilidad Comprensión inicial



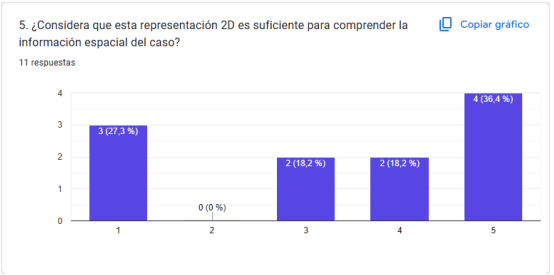
(a) Resultados de elementos que logra identificar la imagen.



(b) Resultados de claridad sobre la relación espacial entre acuíferos y cuencas .



(c) Resultados de uso previo de software de información geográfica.



(d) Resultados de previo uso de SIG.

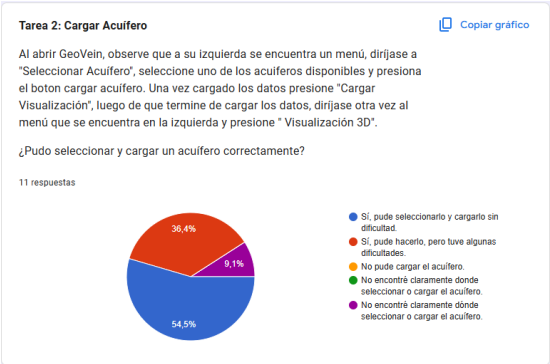
Figura E.5: Resultados del perfil de participantes.

Tabla E.11: Con sus palabras, describa qué entiende de la relación entre los elementos.

Participante	Respuesta
P1	No se
P2	Un acuífero es un espacio geográfico que acumula agua, mientras que una cuenca en una zona de tierra delimitada
P3	Que en un mismo ecosistema hay acuiferos y cuencas una junto a la otra
P4	Segun entiendo las cuencas y los acuíferos están relacionados porque ambos forman parte del recorrido del agua. Las cuencas reciben y conducen el agua en la superficie y una parte de esa agua se puede filtra hacia el suelo, llegando a los acuíferos subterráneos
P5	La verdad no se con claridad que es un acuífero y una cuenca, entonces no le encuentro una relación, pero probablemente con una maqueta o algo similar podría entender y relacionar los elementos, ya que esta posee profundidad
P6	es algo difusa, los acuiferos son altamente reconocibles más no se puede decir lo mismo de las cuencas a pesar de que por descripción etimologica ambas deberían estar relacionadas directamente por abastecimiento.
P7	Lo verde son todas las zonas que poseen cuencas y las de naranjo los acuiferos donde haya la agua subterranea
P8	Es la distribución de acuíferos y cuencas de una zona.
P9	que hay acuíferos y cuencas
P10	Entiendo que los acuíferos se encuentran ubicados dentro o en sectores relacionados con las cuencas hidrográficas. La imagen muestra cómo ambos elementos se distribuyen en el territorio y cómo los límites espaciales permiten diferenciar las distintas zonas. Esto ayuda a comprender dónde se encuentran los recursos de agua subterránea y cómo se relacionan con las cuencas.
P11	Cómo representa los elementos.

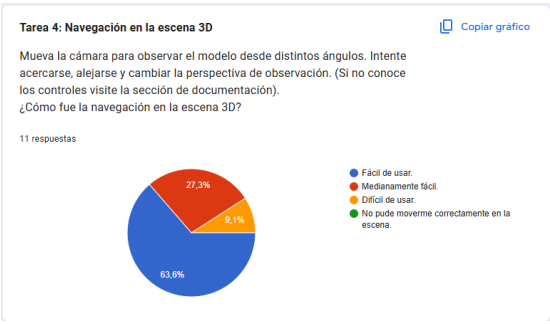
E.5. Resultados de Cuestionario de usabilidad uso de GeoVein

(a) Respuesta sección uso de GeoVein pregunta 1.

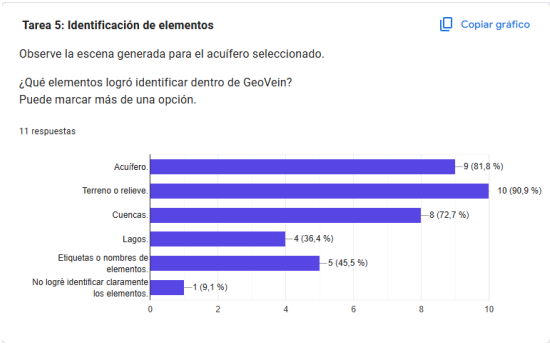


(b) Respuesta sección uso de GeoVein pregunta 2.

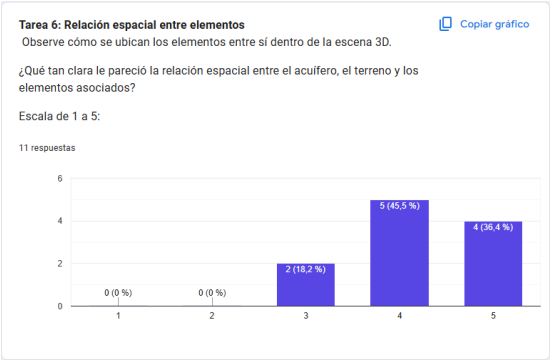
(c) Respuesta sección uso de GeoVein pregunta 3.



(d) Respuesta sección uso de GeoVein pregunta 4.

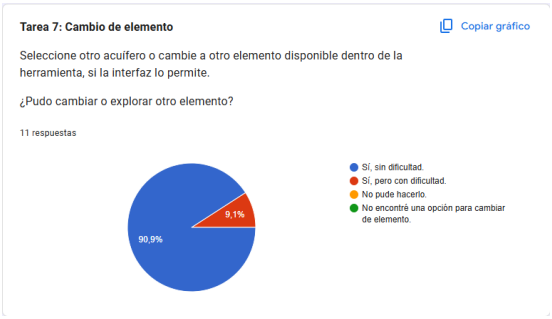


(e) Respuesta sección uso de GeoVein pregunta 5.

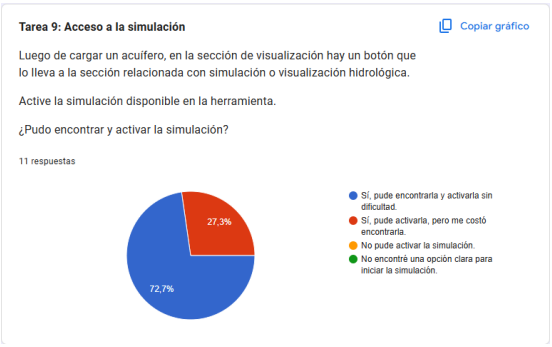


(f) Respuesta sección uso de GeoVein pregunta 6.

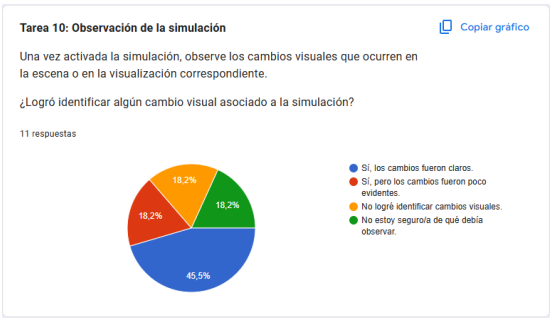
Figura E.6: Resultados de la sección uso de GeoVein: preguntas 1 a 6.



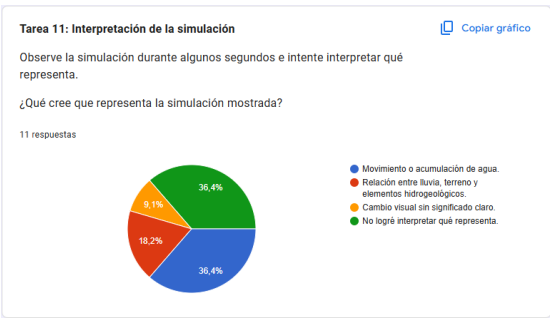
(a) Respuesta sección uso de GeoVein pregunta 7.



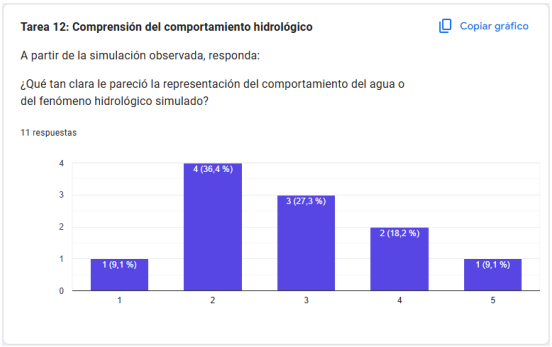
(b) Respuesta sección uso de GeoVein pregunta 9.



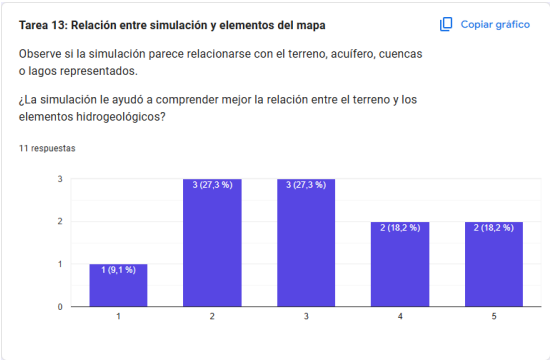
(c) Respuesta sección uso de GeoVein pregunta 10.



(d) Respuesta sección uso de GeoVein pregunta 11.



(e) Respuesta sección uso de GeoVein pregunta 12.



(f) Respuesta sección uso de GeoVein pregunta 13.

Figura E.7: Resultados de la sección uso de GeoVein: preguntas 7 a 13.

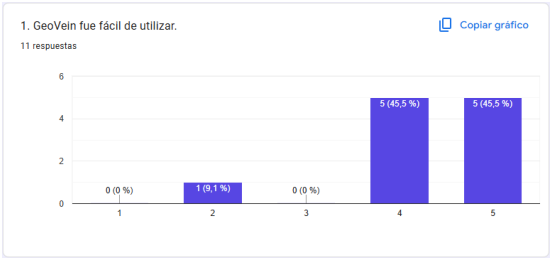
Tabla E.12: 8. Puede mencionar qué elementos aparecen, cómo se relacionan o qué información le resultó más clara.

Participante	Respuesta
P1	El agua quizas deberia de otro color ya que se confunde con una textura mal cargada por lo demas se ve bien y se entiende la relacion
P2	La verdad desconozco algunos términos e información en lo que respecta a geografía, por ende solo pude identificar bien todos los elementos cuando me metí en el apartado de çapasz fui seleccionando una por una
P3	Puedo identificar las distintas cuencas y acuíferos que hay dentro del mapa. En el caso de Acuifero Cuencas Costeras IV Sur se pueden observar las cuatro distintas cuencas y el acuífero.
P4	aparecen las distintas cuencas y acuiferos, los cuales puedo editar para diferenciarlos a mi gusto y asi poder estudiarlos o hacer la simulacion mas enfocada en lo que quiera
P5	Al cargar varias escenas pude diferenciar los distintos acuíferos y cuencas con sus nombres al estar de colores distintos y lograr tener una representación en 3 dimensiones
P6	facilita la visualización de los elementos geograficos en capas, destaca positivamente la representación superpuesta para favorecer el ideario del escenario completo.
P7	Todos los tipos de zonas de agua con sus nombres respectivos, ubicación, densidad y tamaño Sale además información adicional de los datos climaticos, estaciones y geometrias que selecciones Ademas de los datos de registro especializado
P8	A diferencia de la imagen ahora entiendo mejor como es la distribución de los elementos,
P9	todo se logra identificar, sin embargo falto especificar que color le pertenecía a cada cosa
P10	Al explorar GeoVein pude identificar las capas de terreno, acuíferos, cuencas y lagos. La información se muestra de forma más clara porque es posible seleccionar un elemento y ver sus datos, como el nombre del acuífero, la región, su identificación y coordenadas. En este caso observé el Acuífero Pampa del Tamarugal, ubicado en la Región de Tarapacá. Esto facilita comprender cómo se distribuyen los recursos hídricos y su relación con el territorio.

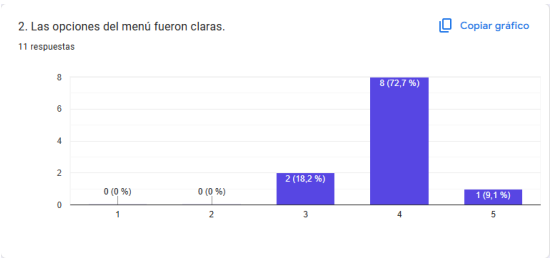
Tabla E.13: 14. Describa brevemente qué entendió de la simulación y qué aspecto le pareció más claro o más confuso.

Participante	Respuesta
P1	Al simular no senti que cambiara nada
P2	La verdad no logré entender mucho de la simulación, pero no sabría decir si es error mií o alguna confusión que me generó el programa
P3	No entendí la relación del tiempo, ni la opción para ingresar segundos manualmente. Pese a esto logro entender que en algunas zonas se acumula más agua, y al subir el porcentaje de infiltración se puede observar donde se filtra más.
P4	entendi el comportamiento del agua y los diferentes acuiferos y cuencas que se encuentran en distintos lados, me parecio un poco confuso la simulacion pero en general es bastante claro y esta todo bien estructurado
P5	En la simulación logré apreciar que por el tiempo se iba colorando azul el terreno, cada vez con un azul más marcado, pero luego de apretar la R (que asumo que es de reiniciar) y ejecutar nuevamente la simulación, no ocurría nada
P6	la representación esto tosca, no se visualiza bien, las acumulaciones hidraúlicas no son fluidas, aumentan en bloques prismaticos nada naturales.
P7	Entendi como funciona, cual es su proposito, los datos correspondientes de las zonas que el usuario eliga La distribucion e información esta muy claro, la simulación sin embargo pese amostrar el cambio en información no muestra un cambio visual que demuestre claramente al usuario que se esta cambiando mas alla de los datos
P8	La simulación me ayudó a comprender mejor la relación entre el terreno y los elementos hidrogeológicos, entender que son como funcionan y su distribución e interacción.
P9	no logre ver con claridad que función cumplía la simulación
P10	Entendí que la simulación muestra cómo la lluvia interactúa con el terreno y cómo el agua se distribuye en las cuencas y los acuíferos. Lo que me pareció más claro fue la relación entre estos elementos y cómo están conectados. Lo más confuso fue interpretar algunos movimientos de la simulación, ya que no se explican en detalle.
P11	Es bastante demostrativa, aunque toma tiempo familiarizarse con el modelo

E.6. Resultados de Cuestionario de usabilidad Evaluación de usabilidad y comprensión espacial

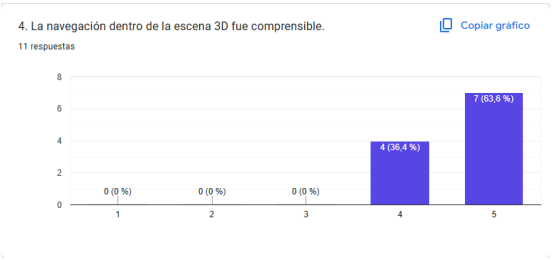


(a) Respuesta comprensión espacial pregunta 1.

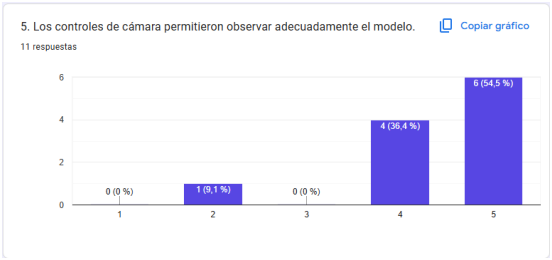


(b) Respuesta comprensión espacial pregunta 2.

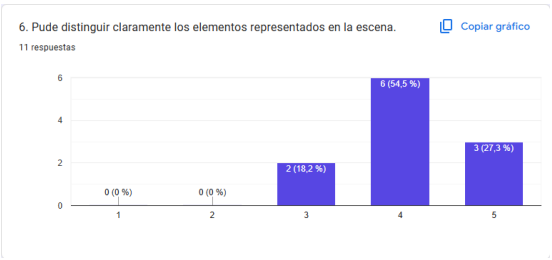
(c) Respuesta comprensión espacial pregunta 3.



(d) Respuesta comprensión espacial pregunta 4.

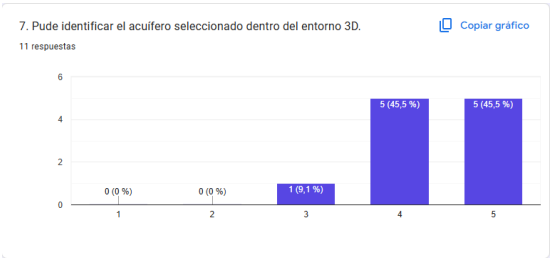


(e) Respuesta comprensión espacial pregunta 5.

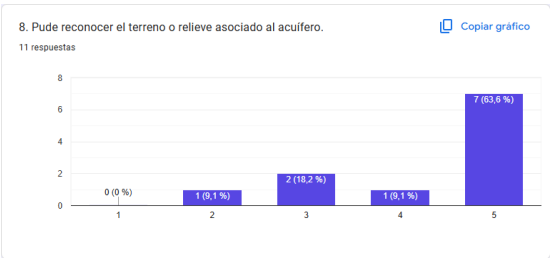


(f) Respuesta comprensión espacial pregunta 6.

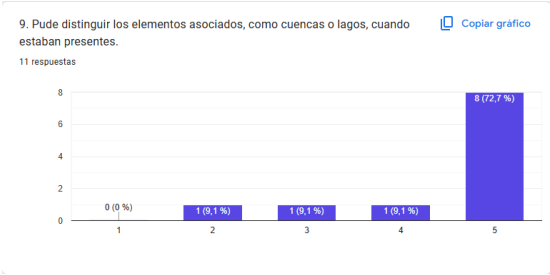
Figura E.8: Resultados de comprensión espacial: preguntas 1 a 6.



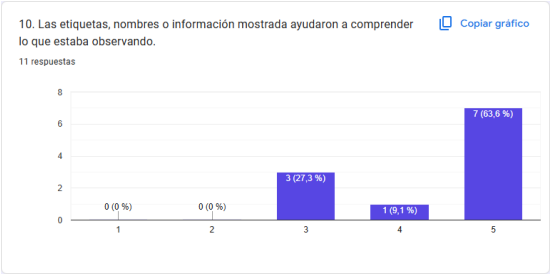
(a) Respuesta comprensión espacial pregunta 7.



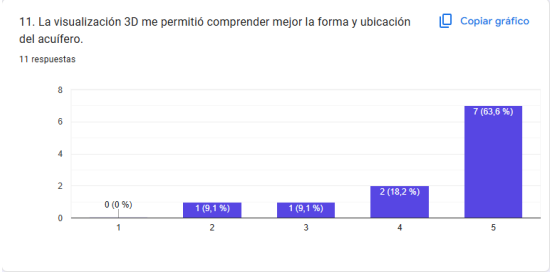
(b) Respuesta comprensión espacial pregunta 8.



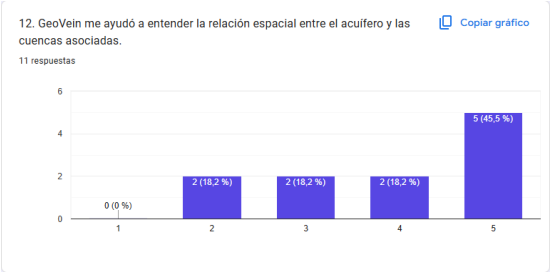
(c) Respuesta comprensión espacial pregunta 9.



(d) Respuesta comprensión espacial pregunta 10.

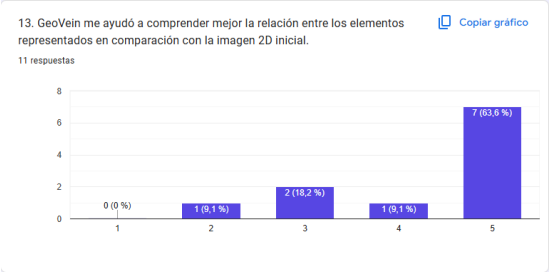


(e) Respuesta comprensión espacial pregunta 11.

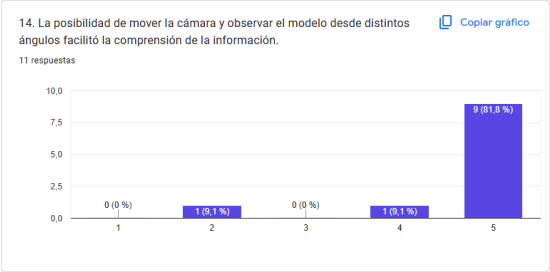


(f) Respuesta comprensión espacial pregunta 12.

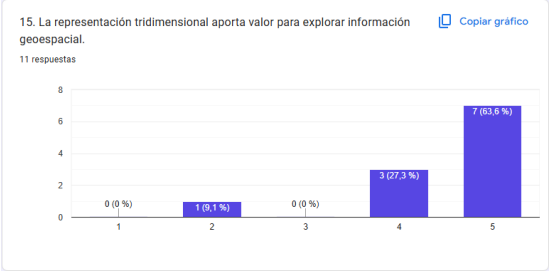
Figura E.9: Resultados de comprensión espacial: preguntas 7 a 12.



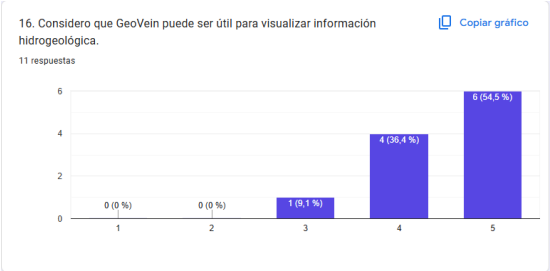
(a) Respuesta comprensión espacial pregunta 13.



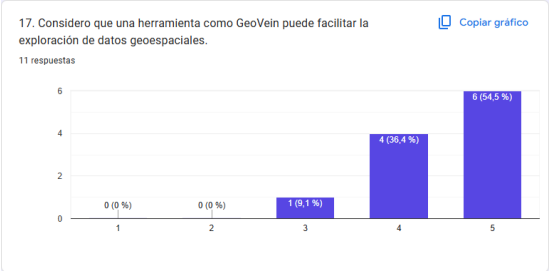
(b) Respuesta comprensión espacial pregunta 14.



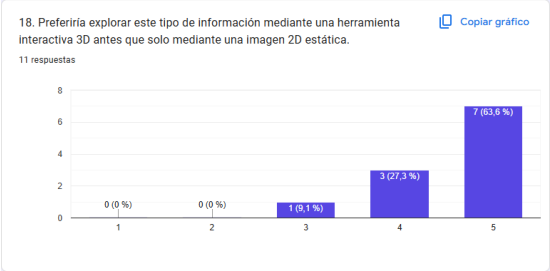
(c) Respuesta comprensión espacial pregunta 15.



(d) Respuesta comprensión espacial pregunta 16.

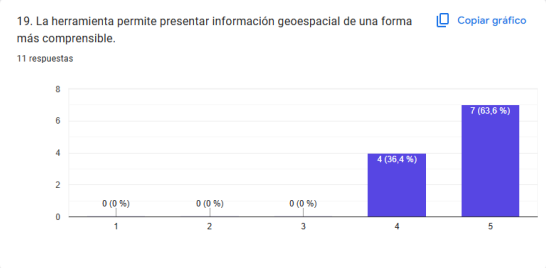


(e) Respuesta comprensión espacial pregunta 17.

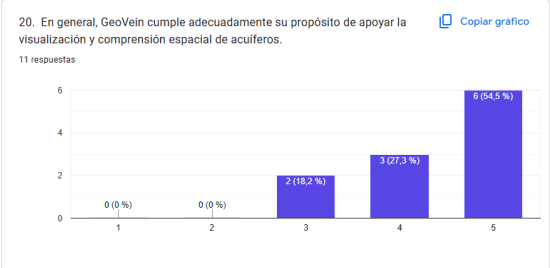


(f) Respuesta comprensión espacial pregunta 18.

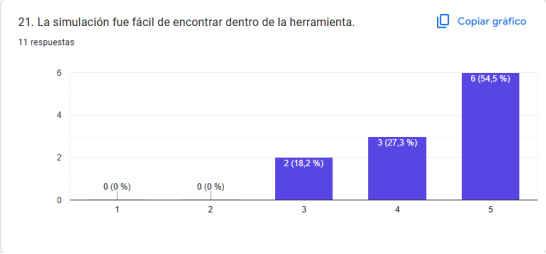
Figura E.10: Resultados de comprensión espacial: preguntas 13 a 18.



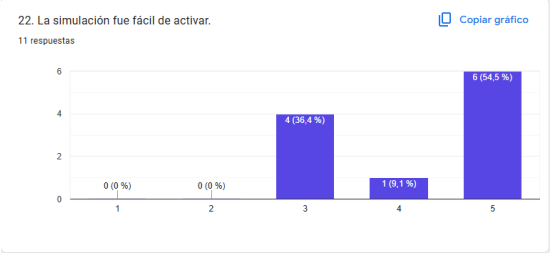
(a) Respuesta comprensión espacial pregunta 19.



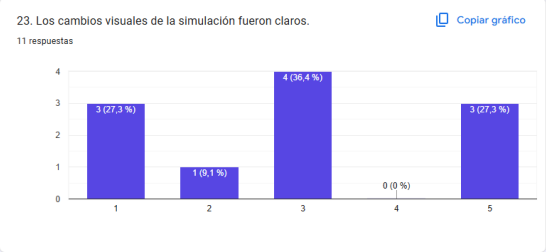
(b) Respuesta comprensión espacial pregunta 20.



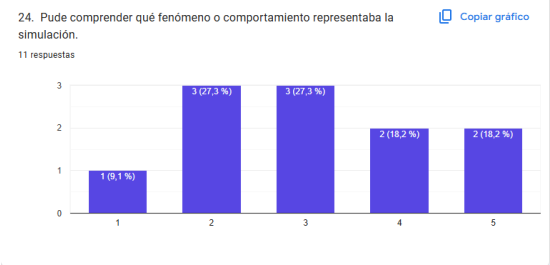
(c) Respuesta comprensión espacial pregunta 21.



(d) Respuesta comprensión espacial pregunta 22.

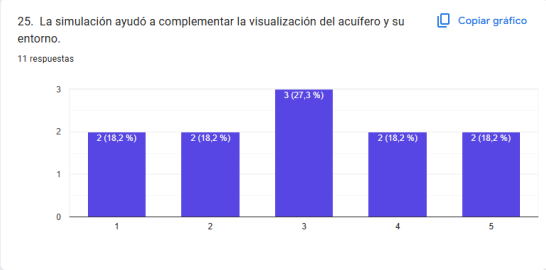


(e) Respuesta comprensión espacial pregunta 23.

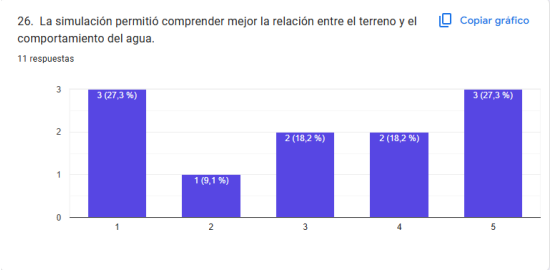


(f) Respuesta comprensión espacial pregunta 24.

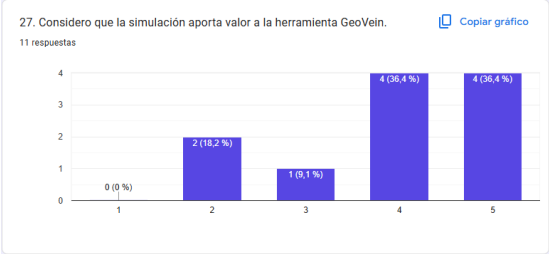
Figura E.11: Resultados de comprensión espacial: preguntas 19 a 24.



(a) Respuesta comprensión espacial pregunta 25.



(b) Respuesta comprensión espacial pregunta 26.



(c) Respuesta comprensión espacial pregunta 27.

Figura E.12: Resultados de comprensión espacial: preguntas 25 a 27.

E.7. Resultados de Cuestionario de usabilidad preguntas abiertas

Tabla E.14: 1. Que fue lo más claro o útil de GeoVein.

Participante	Respuesta
P1	En entorno 3D
P2	Todo desde la carga de datos y la visualización 3D se me hicieron bastante claras
P3	La diferenciación de los acuiferos y las cuencas, además de la posibilidad de utilizar la simulación.
P4	Los entornos 3d
P5	Como representa los elementos
P6	Facil de usar, un poco desordenado a mi parecer, hace falta libertad de movimiento en el modelo, no tan solo con los botones presentados en al app.
P7	La representación visual de loos lugares
P8	El relieve ayudaba mucho a la comprensión
P9	el mapeo 3D del acuífero
P10	Lo más útil fue poder visualizar los acuíferos en un mapa interactivo y acceder a información como el nombre, la región y otros datos, lo que facilitó comprender su ubicación y características.
P11	La facilidad con la cual se pudo acceder a la simulación y la cantidad de información que entrega

Tabla E.15: 2. ¿Qué fue lo más difícil o confuso al utilizar GeoVein?

Participante	Respuesta
P1	La simulacion
P2	La simulación de agua
P3	La forma en que se deben abrir y cargar los datos de un acuifero es ligeramente confuso, al igual que limpiar los datos y abrir un nuevo acuifero.
P4	La simulación no supe lo que debería simular, ya que no se exactamente que es un acuífero ni una cuenca y como debería ser su comportamiento en el entorno
P5	Esta mal organizado, la diagramación es tosca y genera agobio visual. Se siente antiguo y desorganizado.
P6	La representación visual de la simulación
P7	Nada en particular.
P8	las simulaciones
P9	no logre ver con claridad que función cumplía la simulación
P10	Al principio fue un poco confuso entender todas las opciones y la simulación, ya que no explica en detalle qué representa cada elemento o movimiento.

Tabla E.16: 3. ¿Qué elementos logró comprender mejor usando GeoVein en comparación con la imagen 2D inicial?

Participante	Respuesta
P1	La relacion entre acuiferos y cuencas
P2	Los relieves de las zonas y la interacción de los acuiferos con ellas
P3	En la imagen inicial no lograba identificar a que se referia cada zona ni la diferencia entre ellas, lo que es mucho más simple utilizando GeoVein
P4	Las diferentes cuencas y acuiferos
P5	Logre diferenciar las diferencias de las alturas de los elementos
P6	La superposición de los elementos geograficos
P7	Los limites de cada zona, estando mejor representados
P8	La distribución de los elementos
P9	ver a mayor profundidad el acuífero
P10	Comprendí mejor la ubicación de los acuíferos, su relación con las cuencas y el terreno, además de la distribución espacial de estos elementos gracias a la visualización interactiva.
P11	La diferencia de profundidad y disposición de los acuíferos

Tabla E.17: 4. ¿Qué cambios o mejoras propondría para facilitar el uso de la herramienta?

Participante	Respuesta
P1	Que en la simulacion se vean los cambios o sean mas intuitivos ya que no se entendia que pasaba
P2	Mejoraría las interfaces, haría todo un poco más intuitivo, y propondría más claridad para la parte de simulación de agua
P3	Quizás agregar breves descripciones para que sea más amigable para personas no tan familiarizadas con cuencas o acuiferos.
P4	Tal vez el tutorial o la explicacion de los usos no como documentacion sino a la hora de utilizar el programa o a modo de tutorial un paso a paso a modo de ejemplo
P5	Más descripciones en la simulación, como que cosas debería hacer o mostrar mas claro lo que esta pasando; y mostrar con controles de la herramienta de visualización dentro del mapa
P6	la organización y la libre movilidad en la visualización, mayor rango de muestreo y detalles litorales.
P7	Que sea una aplicación o algo ejecutable que no abre la consola de comandos del computador, una mejor represenatcion visual de la simulacion
P8	En el arranque se me quedo pegado.
P9	le asignaría un color a cada lugar correspondiente que sale en el mapeado 3D
P10	Agregaría una breve guía o tutorial al inicio, más explicaciones sobre la simulación y etiquetas que describan mejor la función de cada opción para que sea más fácil de entender.
P11	Un mejor movimiento de la cámara y quizás un apartado que permita seleccionar solo la información de una zona especifica del terreno

Tabla E.18: 5. Con sus palabras, describa qué entendió sobre la relación espacial entre el acuífero, el terreno y los elementos asociados.

Participante	Respuesta
P1	No se
P2	La verdad no sabría que conlusiones dar, ya que no logré usar bien la parte de la simulación con agua
P3	Pude comprender que las cuencas permiten la formación de acuiferos y donde se ubican estos mismos.
P4	Entendi que el acuífero se ubica debajo del terreno y se relaciona con los elementos de la superficie, como las cuencas, ríos o zonas donde circula el agua. Parte del agua que cae o corre sobre el terreno puede infiltrarse en el suelo y llegar al acuífero, por eso el terreno y el acuífero están conectados espacialmente.
P5	Todos funcionan como un sistema
P6	no mucho más de lo que ya sabía previamente, lo destaco como una buena herramienta didáctica para acercar los conceptos a escolares primerios y secundarios iniciales, más para un publico especializado se siente básico.
P7	Acuifero son las zonas de agua que estan bajo tierra, los terrenos son todo el territorio de una zona
P8	La relación espacial entre un acuífero, el terreno y los elementos asociados describe la topografía del agua subterránea.
P9	que los acuíferos se encuentran por debajo de los terrenos visibles (agua subterránea en cuevas)
P10	Entendí que los acuíferos forman parte del territorio y están relacionados con las cuencas, el relieve y las precipitaciones. Todos estos elementos interactúan y ayudan a explicar cómo se almacena y circula el agua subterránea en cada zona.
P11	Los acuíferos se encuentran ubicados de la manera más optima respecto al relieve, concentrándose en el centro de todo el terreno, además estas se encuentran en un nivel inferior en altura con respecto al resto del terreno

E.8. Carta de consentimiento

DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO Y OBJETIVO(S)Este estudio busca evaluar **GeoVein**, una herramienta interactiva en 3D desarrollada como parte de un producto de memoria tecnológica académica de la Universidad de Talca.

GeoVein tiene como propósito integrar información geoespacial relacionada con acuíferos, terreno, cuencas, lagos y otros elementos hidrogeológicos, transformando estos datos en una visualización tridimensional interactiva desarrollada en Unity.

El objetivo del estudio es analizar si el uso de una herramienta 3D interactiva facilita la exploración, visualización y comprensión espacial de información hidrogeológica. Para ello, cada participante deberá ejecutar GeoVein en su computador, realizar una serie de tareas guiadas y luego responder un cuestionario sobre su experiencia de uso, comprensión visual y utilidad percibida.

BENEFICIOSLa participación no contempla beneficios directos para los/las participantes.

PROCEDIMIENTOSLuego de aceptar el consentimiento informado y completar la información demográfica solicitada, cada participante deberá descargar y ejecutar la aplicación GeoVein en su computador. La aplicación se iniciará mediante un archivo ejecutable proporcionado, el cual abrirá tanto la herramienta GeoVein como los servicios locales necesarios para su funcionamiento.

Durante la prueba, el/la participante deberá realizar una serie de tareas guiadas dentro del sistema, tales como seleccionar acuíferos, navegar en la escena 3D, identificar elementos representados, observar capas asociadas y responder preguntas relacionadas con la comprensión espacial de la información visualizada.

La actividad tendrá una duración aproximada de **15 a 25 minutos** y podrá realizarse de manera remota, sin la presencia directa del investigador. Se solicitará que la experiencia se realice en un entorno tranquilo, sin interrupciones y siguiendo las instrucciones entregadas.

El estudio considera aproximadamente 20 **participantes**, mínimo 10 participantes, idealmente mayores de 18 años, con distintos niveles de experiencia en herramientas digitales, mapas, visualización 3D o sistemas de información geográfica. No será necesario contar con conocimiento técnico avanzado ni experiencia previa en hidrogeología.

Los instrumentos de evaluación corresponderán a un cuestionario con escala de

tipo Likert y preguntas abiertas. Las preguntas estarán orientadas a evaluar aspectos como facilidad de uso, claridad de navegación, comprensión de los elementos representados, utilidad percibida de la visualización 3D y capacidad de interpretar relaciones espaciales entre acuíferos, terreno, cuencas y lagos.

Además, se incluirán preguntas abiertas para recoger percepciones personales, dificultades observadas y sugerencias de mejora, complementando los datos cuantitativos obtenidos mediante la escala de evaluación.

RIESGOS Y MOLESTIASLa participación no presenta riesgos relevantes para el/la participante. Podrían existir molestias leves, como cansancio visual, fatiga por uso del computador o frustración leve durante la interacción con la herramienta.

El/la participante podrá pausar o abandonar la actividad en cualquier momento, sin necesidad de dar explicaciones y sin ningún tipo de consecuencia negativa.

COSTOSLa participación en este estudio no tiene ningún costo económico para los/las participantes.

COMPENSACIONESEste estudio no contempla compensación económica ni retribuciones materiales para los/las participantes. La participación será completamente voluntaria.

CONFIDENCIALIDADLa información obtenida durante este estudio será tratada de manera confidencial y utilizada únicamente con fines académicos y de investigación asociados a este proyecto.

Los datos de identificación solicitados en el consentimiento informado serán utilizados solo para dejar constancia de la aceptación de participación y no serán considerados en el análisis de resultados.

Las respuestas del cuestionario serán analizadas de forma colectiva. En caso de que los resultados sean presentados en la memoria, informes, presentaciones académicas o instancias de divulgación, estos se comunicarán de manera anónima, sin incluir nombres, correos electrónicos ni ningún otro dato que permita identificar directamente a una persona.

El acceso a los datos estará limitado al investigador responsable, el profesor guía y/o el equipo académico directamente vinculado al proyecto. La custodia de la información estará a cargo del investigador responsable.

DESTINO DEL MATERIAL OBTENIDOEl material obtenido corresponderá a respuestas de cuestionarios, respuestas a preguntas abiertas y, en caso de solicitarse, evidencia opcional de uso de la herramienta, como capturas de pantalla. No se

obtendrá material biológico ni muestras físicas de ningún tipo.

Los datos recolectados serán almacenados digitalmente mediante Google Forms u otra plataforma equivalente desde el inicio de la etapa de aplicación del estudio hasta la finalización del análisis y cierre del proyecto académico.

La información será almacenada por un máximo de dos años después del cierre del proyecto y posteriormente será eliminada.

COMUNICACIÓN DE RESULTADOSLos resultados de esta investigación serán comunicados de forma global, mediante la memoria de título, presentaciones académicas u otras instancias de divulgación asociadas al proyecto.

En ningún caso se informarán resultados individuales ni se divulgarán datos que permitan identificar a los/las participantes.

Los/las participantes que deseen conocer los resultados generales del estudio podrán solicitarlos al investigador responsable una vez finalizado el análisis de los datos.