



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**Modelamiento del tránsito de lahares por eventual erupción del volcán Cotopaxi en el
área comprendida entre las calles Yaguachi, Av. General Enríquez, Av. San Luis y
Bulevar Sangolquí mediante técnicas de información geoespacial**

Pilataxi Medina Daniel Andrés

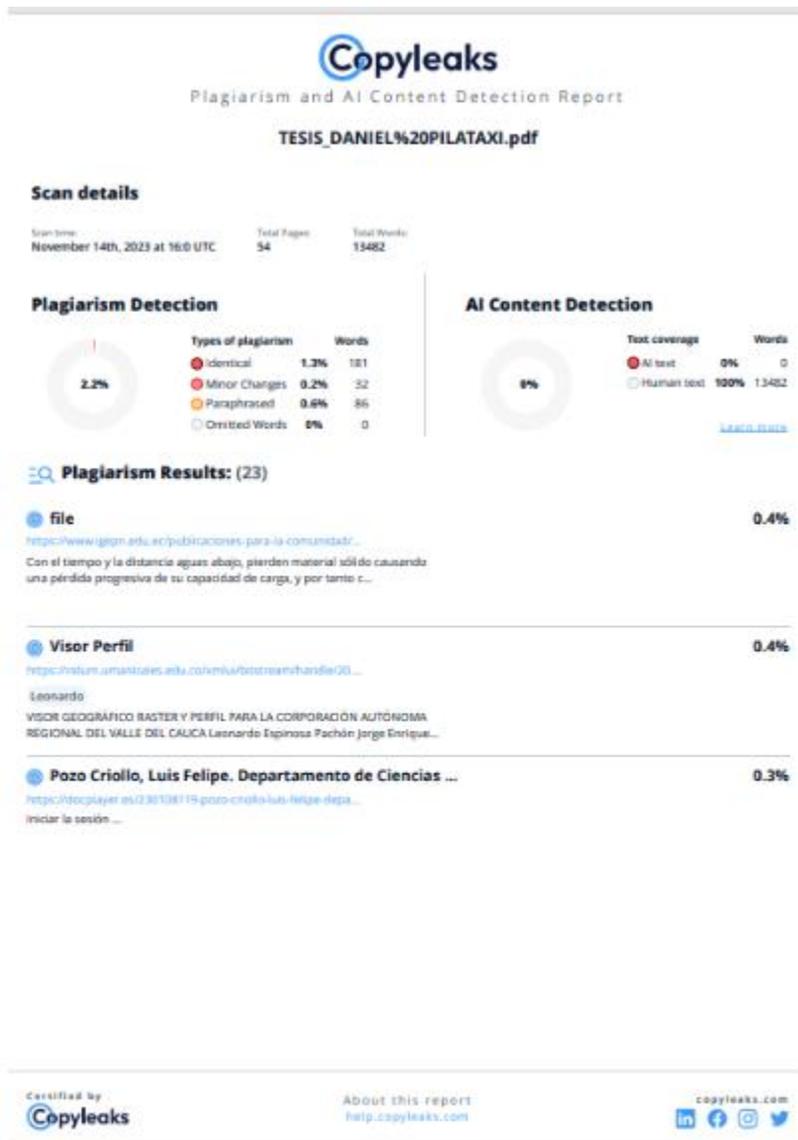
Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente

Trabajo de Titulación previo a la Obtención del Título de Ingeniero Geógrafo y del Medio
Ambiente

Ing. Padilla Almeida, Oswaldo Vinicio, PhD.

6 de diciembre de 2023



Ing. Padilla Almeida, Oswaldo Vinicio, PhD.
Director



Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación: **"Modelamiento del tránsito de lahares por eventual erupción del volcán Cotopaxi en el área comprendida entre las calles Yaguachi, Av. General Enríquez, Av. San Luis y Bulevar Sangolquí mediante técnicas de información geoespacial"** fue realizado por el señor **Pilataxi Medina, Daniel Andrés**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 6 de diciembre de 2023



Ing. Padilla Almeida, Oswaldo Vinicio, PhD.

C. C. 1709776650



Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción
Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente

Responsabilidad de Autoría

Yo, **Pilataxi Medina, Daniel Andrés**, con cédula de ciudadanía n° 1725844862, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Modelamiento del tránsito de lahares por eventual erupción del volcán Cotopaxi en el área comprendida entre las calles Yaguachi, Av. General Enríquez, Av. San Luis y Bulevar Sangolquí mediante técnicas de información geoespacial** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 6 de diciembre de 2023

Pilataxi Medina, Daniel Andrés

C.C.: 1725844862



Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente

Autorización de Publicación

Yo Pilataxi Medina, Daniel Andrés, con cédula de ciudadanía n°1725844862 autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación. **Modelamiento del tránsito de lahares por eventual erupción del volcán Cotopaxi en el área comprendida entre las calles Yaguachi, Av. General Enriquez, Av. San Luis y Bulevar Sangolquí mediante técnicas de información geoespacial en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.**

Sangolquí, 6 de diciembre de 2023

Pilataxi Medina, Daniel Andrés

C.C.: 1725844862

Dedicatoria

A mi madre, América Medina, por apoyarme durante toda mi etapa estudiantil y ser mi fortaleza para poder alcanzar esta meta.

A mi abuelita, Consuelo Pillajo, por acompañarme, apoyarme y brindarme su ayuda incondicional en todas las etapas de mi vida.

A mis hermanos, Matías y Juan Pablo, que cada día me inspiran a ser una mejor persona.

Daniel Pilataxi

Agradecimiento

Agradezco a Dios, por darme sabiduría y fuerzas para salir adelante en todos los aspectos de mi vida.

A mi madre y mi abuelita, que, gracias a su comprensión, amor y apoyo incondicional, pude salir adelante y cumplir una meta importante en mi vida.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por convertirse en mi alma mater y brindarme maravillosas experiencias que me ayudaron a crecer personalmente.

A mi tutor, Ingeniero Oswaldo Padilla, por apoyarme en esta etapa final de mi carrera, su disposición y guía fueron fundamentales para culminar de manera exitosa este trabajo.

Al Ingeniero Mario Cruz, que desde la etapa inicial de este trabajo fue un gran apoyó, su paciencia, su invaluable conocimiento y sus recomendaciones fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

Daniel Pilataxi

Índice de Contenido

Dedicatoria	6
Agradecimiento.....	7
Índice de Contenido.....	8
Índice de Tablas	12
Índice de Figuras	13
Resumen.....	19
Abstract	20
Capítulo I	21
Aspectos Generales.....	21
Antecedentes	21
Planteamiento del problema	23
Justificación e Importancia.....	23
Área de Estudio	24
Objetivos	26
Objetivo General.....	26
Objetivos Específicos	26
Metas	26
Capítulo II	28
Marco Teórico	28
Gestión de Riesgos	28
Prevención	28
Mitigación.....	29
Respuesta	29
Amenazas. - componentes y características.....	29
Amenazas Naturales.....	30

Riesgo	30
Tipos de Riesgos.....	31
Riesgos Geodinámicos	31
Riesgos volcánicos	31
El evento lahar. - Génesis y características.....	31
Lahares Primarios	32
Lahares Secundarios	33
Intensidad de la amenaza.....	34
Tiempo de duración.....	34
Vulnerabilidad. - componentes, características y factores modificadores de la vulnerabilidad	34
Fragilidad:.....	34
Grado de exposición:	34
Capacidad de respuesta:	35
Resiliencia:	35
Costos:.....	35
Volcanes y actividad explosiva.....	36
Area de Influencia.....	37
El Espacio Geográfico; consideraciones.....	37
Territorio; consideraciones.....	37
Uso del suelo	38
Catastro	39
Tecnologías de Información Geoespacial.....	40
Sistemas de Información Geográfica.....	40
ArcGIS. - características y utilidad.....	40
Geodatabase. - uso y características	41
Fotogrametría.....	41
Uso y obtención de información a través de Dron.....	42
Agisoft Metashape Professional. - características y utilidad	42
Ortofoto.....	43
Modelo Digital del Terreno (MDT).....	43
Modelo Digital de Superficie (MDS).....	44
Modelamiento.....	44

HEC-RAS. - características y utilidad.....	44
Cityengine. - características y utilidad.....	46
Realidad Virtual. - características y utilidad	46
Realidad Aumentada. - características y utilidad	47
Blender. - características y utilidad.....	48
Unity. - características y utilidad	49
Vuforia. - características y utilidad.....	50
Marco Legal.....	51
Capítulo III	53
Metodología.....	53
Recopilación de información geoespacial existente.....	54
Depuración de información.....	57
Proceso fotogramétrico	59
Toma de fotografías mediante Dron.....	59
Procesamiento de fotografías	62
Generación de un Modelo Digital de Superficie (MDS).....	62
Generación de un MDT.....	64
Generación de Ortofoto	65
Actualización de información cartográfica de la zona	66
Identificación, selección del software para modelar y obtención de Modelo de inundación	69
Modelamiento en el software seleccionado.....	70
HEC-RAS.....	70
Estructuración de la información	76
Estructuración de información en Cityengine	78
Modelamiento en la plataforma Blender	82
Blender	84
Modelamiento en la plataforma Unity.....	88
Unity	89
Creación de escenas	95
Visualización en Realidad Virtual	97
Realidad Virtual	98

Visualización en Realidad Aumentada	99
Realidad Aumentada (Vuforia).....	101
Análisis de la amenaza	105
Area de Influencia.....	105
Intensidad de la Amenaza	105
Tiempo de duración.....	105
Valoración Económica de los bienes inmuebles afectados	106
Realización de una Geodatabase	111
Capítulo IV	113
Resultados	113
Recopilación de información	113
Proceso Fotogramétrico	116
Modelo Digital de Superficie (MDS).....	116
Modelo Digital del Terreno (MDT).....	117
Ortomosaico.....	118
Análisis y explicación del modelo hidrológico actual.....	119
Comparación con el modelo Padilla y Bosque, 2014	121
Análisis y explicación de escenarios	122
Explicación del modelo actual de inundación por lahares en realidad virtual y aumentada	123
Modelo de recorrido de lahar en Realidad Virtual.....	123
Modelo de recorrido de lahar en Realidad Aumentada.....	124
Análisis de la amenaza.....	127
Valoración Económica	128
Capítulo V	131
Conclusiones y Recomendaciones	131
Conclusiones.....	131
Recomendaciones.....	133
Bibliografía	135

Índice de Tablas

Tabla 1 Información geográfica utilizada en el presente trabajo.	68
Tabla 2 Nivel de Inundación	105
Tabla 3 Dimensiones de los lotes tipo de cada zona	107
Tabla 4 Comparación de modelos de recorrido de lahar.....	121
Tabla 5 Determinación de la Intensidad de la amenaza.....	128

Índice de Figuras

Figura 1. Resumen de datos del modelo numérico realizado en SIM-LAHAR	22
Figura 2. Delimitación del área de estudio.....	24
Figura 3. Tipos de amenazas	30
Figura 4. Ejemplo de lahar primario.....	32
Figura 5. Ejemplo de lahar secundario	33
Figura 6. Factores modificadores de vulnerabilidad física	35
Figura 7. Clasificación de usos principales del Suelo Urbano.....	38
Figura 8. Visualización entorno en ArcScene	40
Figura 9. Dron utilizado en este trabajo	42
Figura 10. Modelo Digital del Terreno	43
Figura 11. Modelo Digital de Superficie	44
Figura 12. Interfaz de Hec-RAS versión 5.0.0	45
Figura 13. Interfaz CityEngine 2019.0	46
Figura 14. Complemento de Realidad Virtual en Blender	47
Figura 15. Interfaz Blender versión 3.5.....	48
Figura 16. Interfaz de la plataforma Unity versión 2021.3.3.....	49
Figura 17. Instalación paquete de Vuforia en la plataforma de Unity.....	50
Figura 18. Esquema de la metodología para la recopilación de información	53
Figura 19. Información recopilada Catastro de Rumiñahui	55
Figura 20. Información recopilada de uso específico de suelo urbano	55
Figura 21. Recopilación de información de edificabilidad actual.....	56
Figura 22. Recopilación información de recorrido de lahares Cotopaxi	56
Figura 23. Zonas dentro del área de estudio	57
Figura 24. Usos específicos de suelo urbano del área de estudio.....	58

Figura 25. Edificabilidad actual del área de estudio.....	58
Figura 26. Ubicación de los puntos de control.....	59
Figura 27. Levantamiento puntos de control (punto 7).....	60
Figura 28. Materialización de los paineles en los puntos de control levantados (punto 7)	60
Figura 29. Infraestructura (cerramiento-muro).....	61
Figura 30. Áreas de vuelo	61
Figura 31. Subida de las fotografías ortogonales	62
Figura 32. Alineación de las fotografías ortogonales	63
Figura 33. Creación de la nube de puntos.....	63
Figura 34. Modelo Digital de Superficie obtenido	64
Figura 35. Creación del Modelo Digital de Terreno	65
Figura 36. Modelo Digital del Terreno obtenido.....	65
Figura 37. Ortomosaico generado.....	66
Figura 38. Ortofoto subida en el software.....	66
Figura 39. Creación del shape	67
Figura 40. Digitalización de las edificaciones presentes en el area de estudio.....	67
Figura 41. Tabla de atributos de los bloques constructivos digitalizados.....	68
Figura 42. Esquema de la metodología para la realización del Modelamiento en Hec-RAS	69
Figura 43. Ventana de proyectos creados	70
Figura 44. Comando RAS Mapper	70
Figura 45. Opción para crear un nuevo terreno.....	71
Figura 46. Modelo Digital de Superficie en Hec-RAS	71
Figura 47. Herramienta Geometric Data.....	72
Figura 48. Herramienta para crear la malla	72
Figura 49. Delimitación de aguas arriba y aguas abajo	73

Figura 50. Parámetros para la creación de la malla	73
Figura 51. Creación de la capa “Unsteady Flow Data”	73
Figura 52. Parámetros para el modelo de inundación	74
Figura 53. Resumen de afectación de los lahares por el cauce del Río Santa Clara	74
Figura 54. Creación de la capa Unsteady Flow Analysis	75
Figura 55. Area de inundación	76
Figura 56. Esquema de la metodología para la estructuración de información en CityEngine ..	76
Figura 57. Importación de los bloques constructivos en formato shape.....	78
Figura 58. Importación de la ortofoto.....	79
Figura 59. Área de estudio con la forma real del terreno	79
Figura 60. Herramienta para alinear los bloques constructivos con el terreno	79
Figura 61. Bloques constructivos alineados con el terreno	80
Figura 62. Herramienta “Building simple” para añadir el atributo de la altura.....	80
Figura 63. Bloques constructivos generados en 3D con la altura correspondiente	81
Figura 64. Exportación de los bloques constructivos en formato FBX	82
Figura 65. Esquema de la metodología para la elaboración del Modelamiento en la plataforma Blender	82
Figura 66. Importación del modelo digital de terreno	84
Figura 67. Modo de edición para extruir el modelo	84
Figura 68. Modelo digital del terreno extruido.....	85
Figura 69. Proceso para importar la ortofoto	85
Figura 70. Ortofoto importada sobre el modelo digital del terreno	85
Figura 71. Modelo Digital del Terreno del área de estudio	86
Figura 72. Proceso para importar la capa del lahar	86
Figura 73. Aplicación de color y textura a la capa del lahar	87

Figura 74. Bloques constructivos en 3D y estructurados por su uso principal de suelo	87
Figura 75. Exportación del modelo en formato FBX	88
Figura 76. Esquema de la metodología para la elaboración del Modelamiento en Unity	88
Figura 77. Creación del Proyecto	90
Figura 78. Escena Principal de trabajo	90
Figura 79. Configuración de la plataforma de trabajo	91
Figura 80. Modelo Digital del Terreno importado en formato FBX	91
Figura 81. Creación del material para el Modelo Digital del Terreno	92
Figura 82. Modelo Digital del Terreno con el material creado	92
Figura 83. Importación de los bloques constructivos	93
Figura 84. Importación del modelo de lahar en formato FBX.....	93
Figura 85. Creación del script para la simulación del escenario	94
Figura 86. Script de simulación creada.....	94
Figura 87. Escenario generado	94
Figura 88. Creación del Game Object y el script de cambio de escena.....	95
Figura 89. Asignación del script a la escena	95
Figura 90. Escena de Simulación con los botones para activar los diferentes productos	96
Figura 91. Esquema de la metodología para la visualización del Modelo en Realidad Virtual ..	97
Figura 92. Ejecución del comando Blender_oculus	98
Figura 93. Herramienta de realidad virtual.....	98
Figura 94. Programa utilizado para la visualización en realidad virtual.....	98
Figura 95. Gafas de realidad virtual.....	99
Figura 96. Esquema de la metodología para la visualización del Modelo en Realidad Aumentada	99
Figura 97. Configuración del paquete de Vuforia	101

Figura 98. Creación de la licencia en la página de Vuforia engine	101
Figura 99. Creación de la AR Camera.....	102
Figura 100. Configuración de la plataforma de trabajo	102
Figura 101. Creación de Image Target.....	103
Figura 102. Insumos importados sobre el Image Target.....	103
Figura 103. Generación del escenario en la plataforma de Android	104
Figura 104. Archivo del escenario en APK	104
Figura 105. Fórmula para el avalúo de la propiedad	106
Figura 106. Zonas homogéneas.....	107
Figura 107. Lote tipo de la zona 1	108
Figura 108. Visita de campo lote de la zona 1	108
Figura 109. Factor estado de conservación y mantenimiento.....	108
Figura 110. Factor de uso de la unidad arquitectónica	109
Figura 111. Tabla de Información recopilada en campo	109
Figura 112. Cálculos del Lote Tipo.....	110
Figura 113. Información adicional y métodos para el avalúo de una propiedad.....	110
Figura 114. Factor de inflación	111
Figura 115. Asignación del nombre a la GDB.....	112
Figura 116. Información dentro de la geodatabase (GDB)	112
Figura 117. Corrida de la topología en la geodatabase (GDB)	112
Figura 118. Edificabilidad actual – Área de estudio	113
Figura 119. Usos principales de suelo urbano – Área de estudio	115
Figura 120. Modelo Digital de Superficie (MDS) del área de estudio generado en el software Agisoft Metashape Professional.....	116

Figura 121. Modelo Digital de Terreno (MDT) del área de estudio generado en el software Agisoft Metashape Professional.....	117
Figura 122. Ortomosaico del área de estudio.....	118
Figura 123. Modelo de inundación	120
Figura 124. Comparación de modelos de recorrido de lahar	121
Figura 125. Visualización en realidad virtual	123
Figura 126. Modelo de inundación en la plataforma de Blender	123
Figura 127. Escena principal del escenario creado en Realidad Aumentada	124
Figura 128. Escenario del modelo de inundación en realidad aumentada.....	125
Figura 129. Modelo actual de inundación generado	125
Figura 130. Intensidad de la amenaza	127
Figura 131. Zonas según su valor económico	128
Figura 132. Avalúo de las propiedades	130

Resumen

En los últimos años en el Valle de los Chillos se ha incrementado el número de construcciones y por ende el de su población, por tal motivo, diferentes zonas han sufrido un cambio en el uso de suelo, las mismas que se encuentran en áreas de influencia ante una eventual erupción del volcán Cotopaxi. En este trabajo se realizó un modelo actualizado del tránsito de lahares ante una eventual erupción del volcán Cotopaxi en el área comprendida entre las calles Yaguachi, Av. General Enríquez, Av. San Luis y Bulevar Sangolquí, para lo cual se recopiló y sistematizó información existente relativa al tema. En la primera etapa se realizó una visita de campo y un proceso fotogramétrico a fin de obtener varios productos (un modelo digital del terreno, un modelo digital de superficie y una ortofoto) de la zona de estudio, mismos que sirvieron como insumos para las siguientes etapas del proyecto, posterior a esto, se realizó un modelamiento de inundación utilizando un software de modelador hidrológico para compararlo con un modelo anterior, a fin de identificar nuevas áreas de posible afectación, también se generó un escenario actual en realidad virtual y aumentada, y finalmente se realizó un análisis de la amenaza donde se obtuvo las zonas con mayor y menor peligro, así como también un valor económico aproximado de las posibles pérdidas ante este evento natural.

Palabras clave: lahar, modelamiento, realidad virtual, realidad aumentada.

Abstract

In recent years, the number of constructions in the Valle de los Chillos has increased, along with its population. For this reason, different areas have undergone a change in land use, and they are situated in the influence areas in the event of a Cotopaxi volcano eruption. In this work, an updated model of lahar transit in the event of a Cotopaxi volcano eruption was carried out in the area encompassed by Yaguachi Street, General Enriquez Avenue, San Luis Avenue, and Sangolquí Boulevard. To achieve this, existing information related to the topic was collected and systematized. In the first stage, a field visit and photogrammetric process were conducted to obtain various products (a digital terrain model, a digital surface model, and an orthophoto) of the study area, which served as inputs for the subsequent stages of the project. Following this, a flood modeling was performed using hydrological modeling software to compare it with a previous model in order to identify new potentially affected areas. Additionally, a current scenario was generated in virtual and augmented reality. Finally, a threat analysis was conducted, revealing the areas of higher and lower risk, as well as an approximate economic value of potential losses from this natural event.

Key words: lahar, modeling, virtual reality, augmented reality.

Capítulo I

Aspectos Generales

El presente capítulo menciona los antecedentes del evento natural ocurrido históricamente y su ubicación geográfica, investigaciones que se han realizado en base rastros que ha dejado estos eventos, estudios realizados utilizando softwares de modeladores hidrológicos. Así como también el planteamiento del problema, la justificación e importancia, el área de estudio y finalmente los objetivos y metas planteadas los cuales fueron establecidos en función de los apartados mencionados anteriormente.

Antecedentes

El Ecuador se encuentra en el Cinturón de Fuego del Pacífico, la cordillera de los Andes que lo atraviesa posee volcanes activos, que constituyen una amenaza para la población circundante (Cevallos et al., 2017).

La última erupción importante del volcán Cotopaxi fue en 1877, (Salazar & D'Ercole, 2009) misma que originó un lahar con volumen de 40 millones de metros cúbicos y alturas entre 7 y 30 metros, ocasionando daños en la infraestructura de los valles de Los Chillos y Latacunga (Regalado, 2015). Los ríos Pita y Santa Clara son vías de tránsito de lahares los cuales cruzan por centros poblados como Sangolquí (Bucheli, 2020), por tal motivo se han realizado estudios (Carrillo, 2013), para identificar los potenciales sectores en riesgo en el valle de los Chillos.

Los mecanismos de simulación de eventos geológicos son otra alternativa de estudios debido a que proporcionan información para mitigar y prevenir riesgos (Regalado, 2015). Así mismo (Aguilera & Toulkeridis, 2004) en su proyecto de Prevención de Riesgos Asociados con la Erupción del Volcán Cotopaxi presenta una tabla con datos referidos a un modelo numérico

realizado en el software SIM-LAHAR, el cual está en función de más de 170 perfiles transversales a escala 1:2000, mediante los cuales obtuvo la geometría de los cauces, altura de la onda y tiempo de arribo (ver figura 1).

Según (Padilla & Bosque, 2014) en su investigación presentan cálculos, análisis y representación de tiempos de evacuación para los pobladores, en el Valle de los Chillos, ante una eventual erupción del volcán Cotopaxi. En la actualidad el uso de herramientas geoinformáticas son de utilidad para realizar modelos en realidad aumentada y cartografía de riesgos (Naranjo, 2007).

En el año 2015 se registró un nuevo período de actividad volcánica (Vera et al., 2019), que despertó el interés de analizar los riesgos a los que está sometido el Cantón Rumiñahui (López, 2018), sin explotar las potencialidades de las herramientas geoinformáticas.

Figura 1.

Resumen de datos del modelo numérico realizado en SIM-LAHAR

RIO PITA			
Construcciones e infraestructura	Altura Máxima -metros-	Tiempo Arribo -minutos-	Afectación
Bocatoma Pita-Tambo	19	14	Sumergida
Puente Cashapamba	6	22	Sumergido
Urbanización La Colina	10-12	25	Parcialmente inundada
Playa Chica	1	30	Parcialmente inundada
El Triángulo	4-7	31	Sumergido
Puente Vía al Tingo	(7)-15	32	Sumergido

RIO EL SALTO			
Construcciones e infraestructura	Altura Máxima -metros-	Tiempo Arribo -minutos-	Afectación
Sifón El Salto	13-31	14	Sumergido
Puente río El Salto	16-34	15	Sumergido

RIO SANTA CLARA			
Construcciones e infraestructura	Altura Máxima (*) -metros-	Tiempo Arribo -minutos-	Afectación
Puente San Fernando	(17)	23	Sin daño
Central Santa Rosa	21	23	Sumergida
Puente Loreto	9	24	Sumergido
Hacienda Chillo Cia.	3-4	25	Inundada
Selva Alegre	8	25	Parcialmente inundado
Colegio Juan de Salinas	5	28	Inundado
El Choclo	3-5	30	Inundado
Avenida Luis Cordero	10	30	Parcialmente inundada
Puente El Aguacate	6	31	Sumergido
Fábrica Santa Bárbara	(7)	31	Sin daño
Ciudadela Yaguachi	(2)	31	Parcialmente inundada
ESPE	(2)	35	Parcialmente inundada
Academia de Guerra	1-6	35	Inundada
San Rafael	8	35	Parcialmente inundado

Nota. Datos referidos a un Modelo Numérico. Tomado de *Prevención de Riesgos Asociados con la Erupción del Volcán Cotopaxi*, por (Aguilera & Toulkeridis, 2004)

Planteamiento del problema

El volcán Cotopaxi en su última erupción, 1877, generó lahares importantes, que circularon por los ríos Pita y Santa Clara, mismos que cruzan diferentes centros poblados como Sangolquí (Bucheli, 2020), poniendo en peligro la vida de las personas.

El área comprendida entre las calles Yaguachi, Av. General Enríquez, Av. San Luis y Bulevar Sangolquí, se encuentra dentro del área de influencia del tránsito de lahares; el área de estudio en la actualidad presenta instituciones educativas, centros comerciales, instalaciones militares, lugares de cultos religiosos y viviendas, que potencialmente podrían afectarse por este fenómeno volcánico. En los trabajos de (Padilla & Bosque, 2014) (Rodriguez et al., 2017) no está actualizado en cuanto al uso del suelo y expansión urbana se refiere, por tanto, el presente estudio pretende simular en realidad virtual y aumentada el tránsito de lahares acorde a la situación actual de ocupación el suelo, a fin de que sirva como apoyo a la cartografía temática de riesgos.

Justificación e Importancia

La expansión urbana que experimenta el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) se refleja en el cambio de uso del suelo especialmente en los Valles de los Chillos y Tumbaco; así el área de estudio se ha vuelto comercial con un evidente incremento de negocios pequeños, instituciones educativas y fundaciones de carácter social, ubicados cerca del río Santa Clara, por lo que es necesario investigar el grado de afectación que, eventualmente, podrían sufrir por una inundación de lodo (lahar). Para tal fin se debe realizar un modelo actual de recorrido de lahares, debido a que el estudio de Padilla y Bosque, se realizó hace ocho años.

Del mismo modo, el presente proyecto está alineado con uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2015-2030, siendo este el numero 11 (Ciudades y Comunidades Sostenibles), mismo que menciona en sus apartados 11.5 reducir el número de muertes y

pérdidas económicas provocadas por los desastres a la población más vulnerable, de la misma manera en el apartado 11.b se enfoca en implementar políticas y poner en práctica el Marco Sendai para la reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030 (NACIONES UNIDAS, 2015).

Además, el proyecto cumple con lo estipulado en el Plan Nacional de Desarrollo 2021-2025, en los objetivos del Eje Seguridad Integral, debido a que en su objetivo 9 se menciona garantizar la seguridad ciudadana, orden público y gestión de riesgos, a través de la identificación de riesgos que afecten al territorio ecuatoriano, el cual se lo realizara difundiendo información oportuna y coordinando acciones a fin de prevenir, enfrentar y mitigar la vulnerabilidad para reducir los riesgos (Secretaría Nacional de Planificación, 2021).

Finalmente, el presente trabajo permitirá conocer nuevos escenarios potenciales de inundaciones en el área a investigarse; así mismo, la representación en realidad virtual y aumentada permitirá observar de forma más detallada los resultados que se obtengan al finalizar el trabajo. Por lo tanto, este modelamiento se podría convertir en una herramienta que permita planificar acciones de protección, mitigación a incluirse en Planes de Contingencia y Planes de Ordenamiento Territorial del sector.

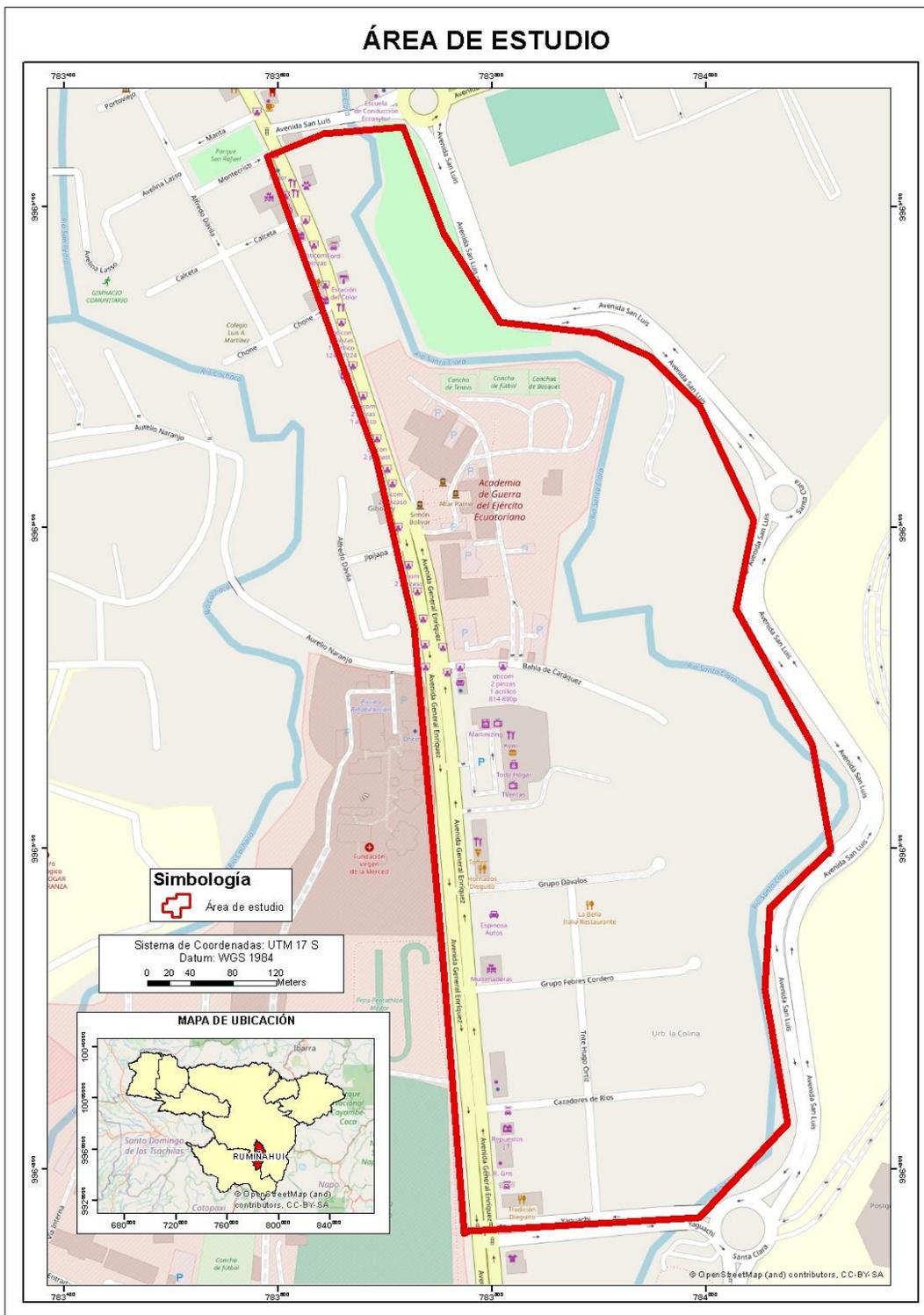
Área de Estudio

El área comprendida entre las calles Yaguachi, Av. General Enríquez, Av. San Luis y Bulevar Sangolquí (ver Figura 2), se encuentra dentro de la zona de recorrido de potenciales lahares del volcán Cotopaxi, a través del río Santa Clara que recorre el área, según el Mapa Regional de Amenazas Volcánicas Potenciales del volcán Cotopaxi (López, 2018).

Figura 2.

Delimitación del área de estudio

ÁREA DE ESTUDIO



Objetivos

Objetivo General

Modelar el tránsito de lahares ante una eventual erupción del volcán Cotopaxi en el área comprendida entre las calles Yaguachi, Av. General Enríquez, Av. San Luis y Bulevar Sangolquí, mediante técnicas geoespaciales y de realidad aumentada para contribución al módulo de amenazas y riesgos Geonode ESPE.

Objetivos Específicos

- Recopilar y sistematizar información existente relativa al tema.
- Realizar el ajuste fotogramétrico con la finalidad de obtener sus productos deseados (ortomosaico, Modelos Digital de alturas)
 - Modelar el tránsito de lahares del volcán Cotopaxi utilizando software hidrológico en función de información recopilada.
 - Analizar el modelo desarrollado y contrastar con el modelo de recorridos de lahares previamente realizado por Padilla & Bosque, 2014 mediante un proceso comparativo a fin de obtener visualmente los diferentes escenarios.
 - Generar un escenario mediante modeladores hidrológicos en el área indicada de influencia de lahares del volcán Cotopaxi a fin de obtener un modelo digital en realidad aumentada actualizado a la fecha.

Metas

- Una Geodatabase con la información recopilada.
- Un Modelo Digital de Terreno (MDT), un Modelo Digital de Superficie (MDS) y un Ortomosaico del área de influencia.

- Un modelo de recorrido de lahares del volcán Cotopaxi en el área comprendida entre las calles Yaguachi, Av. General Enríquez, Av. San Luis y Bulevar Sangolquí en el valle de los Chillos.
- Un cuadro comparativo con el análisis entre los modelos obtenidos por Padilla & Bosque, 2014 y el modelo realizado.
- Un modelo digital visual en realidad aumentada del recorrido de lahares del volcán Cotopaxi en el área comprendida entre las calles Yaguachi, Av. General Enríquez, Av. San Luis y Bulevar Sangolquí en el valle de los Chillos, con información de uso de suelo actualizado a la fecha.

Capítulo II

Marco Teórico

El presente capítulo explica los términos de gestión de riesgos, sus componentes y características, sistemas de información geográfica, sus componentes y su aplicación, plataformas de realidad virtual y aumentada, sus definiciones y aplicaciones. Así mismo se menciona que función cumplió cada uno de estos en las diferentes etapas que se ejecutaron para realizar este trabajo.

Gestión de Riesgos

Es un proceso que consiste en la prevención y mitigación de riesgos, los cuales permiten estar en la capacidad de responder ante un evento natural (Herzer et al., 2002), en este caso el desarrollo de un modelo actualizado de recorrido de lahar y su visualización en realidad virtual sería una herramienta de apoyo, debido a que el escenario generado ayudaría a identificar de mejor manera los lugares donde se podría implementar la gestión de riesgos, ya que en el área de influencia existen diferentes tipos de construcciones (equipamientos de salud, seguridad, educación), las cuales cumplen un rol importante dentro de esta zona.

Prevención

Es parte de la gestión de riesgos en donde se actúa de manera anticipada a través de medidas que permitan reducir o en el mejor de los casos evitar el daño que pueda causar un evento natural en un determinado territorio (DGOA, 2009), el modelo actualizado generado en este trabajo permitiría ver el escenario que se produciría ante la amenaza del tránsito de lahar y tomar medidas en ese sentido.

Mitigación

Es un elemento dentro de la gestión de riesgos que engloba un conjunto de actividades las cuales permitan disminuir la vulnerabilidad o en este caso la intensidad de la amenaza en un área determinada ante la ocurrencia de un fenómeno natural (DGOA, 2009), está relacionada con la parte económica (costo/beneficio), debido a que la implementación de esta medida podría reducir de manera significativa económicamente el daño que podría causar un evento natural (Freeman et al., 2003). El modelamiento actualizado ayudaría a identificar las zonas en el área de estudio donde se podrían realizar obras que permitirían reducir el daño ocasionado a las diferentes construcciones que se encuentren en una zona con alta intensidad de amenaza.

Respuesta

Es la etapa en la que se actúa de manera inmediata ante la ocurrencia de un evento natural, a fin de proteger a la población afectada (UNISDR, 2009), la visualización del modelo en realidad virtual permitiría visualizar de manera detallada el escenario generado en el área de estudio, mismo que podría apoyar en la gestión de riesgos para establecer medidas que permitan mejorar la capacidad de respuesta.

Amenazas. - componentes y características

La amenaza es un suceso, fenómeno o evento negativo que tiene un potencial de causar daño, muerte y destrucción, pero no se sabe, conoce o no se puede estimar si va a ocurrir, es decir, no hay un cálculo de probabilidad (Milanés et al., 2017a). Se compone de varios elementos de los cuales en este trabajo se utilizarán área de influencia e intensidad. En este caso el lahar se considera una amenaza porque la expansión urbana ha ocupado el área

por donde se estima que transitarán los lahares (área inundable o de influencia), en caso de una erupción explosiva del volcán Cotopaxi.

Amenazas Naturales

Las amenazas naturales son eventos con potencial dañino y pueden ser de tipo climatológicos o geológicos (Lavell, 1999), el caso de estudio corresponde a una amenaza de tipo geológico, debido a que se trata de una erupción volcánica, producto de esta ocurre el fenómeno natural del flujo de lahares, en donde en este trabajo se hizo el modelamiento de uno de los recorridos y se obtuvo un modelo actualizado en la zona de estudio.

Figura 3.

Tipos de amenazas



Nota. Tipos de amenazas. Tomado de *Amenazas, Riesgos y Desastres*, por (Milanés et al., 2017)

Riesgo

El riesgo es la probabilidad de ocurrencia de que el territorio sufra una situación de destrucción a tal punto de no poder superar su capacidad de respuesta, es decir, entrar en una condición de crisis.

$$\text{RIESGO}=\text{AMENAZA}*\text{VULNERABILIDAD}$$

Esta expresión matemática indica que el riesgo está en función de la amenaza (peligro) y la vulnerabilidad (sociedad). Debido a que ambos están mutuamente condicionados, si no existe una amenaza, no existiría un riesgo (INDECI, 2009).

Tipos de Riesgos

Existen diferentes tipos de riesgos, en este caso el presente trabajo está relacionado con una erupción volcánica y a su vez con el tránsito de lahares, los mismos que se encuentran dentro del grupo de riesgos geodinámicos y volcánicos.

Riesgos Geodinámicos

Son aquellos que están asociados a fenómenos geológicos, y de acuerdo a su génesis pueden ser internos o externos (Pesantes & Carrión, 2009), el caso de este trabajo el área de estudio se encuentra dentro del área de influencia de un riesgo volcánico, por tal motivo, correspondería a un riesgo geodinámico interno.

Riesgos volcánicos

Es la probabilidad de que ocurra la erupción de un volcán y este a su vez cause un daño potencial en el territorio debido a que posee varios factores como: flujos piroclásticos, coladas lávicas, caída de ceniza, lahares (Llinares et al., 2004). En este caso se escogió analizar el fenómeno de los lahares debido a que por el área de estudio atraviesan dos ríos que son: el Santa Clara y el San Pedro, los cuales son vía de recorrido de este fenómeno natural.

El evento lahar. - Génesis y características

Un lahar es una mezcla de productos volcánicos, y si es el caso de ser un flujo, este busca los cauces de cuerpos de agua y seguir dicha trayectoria, también pueden ocurrir por el deshielo del glaciar del volcán cuando este erupciona (Mothes & Vallance, 2015), este a su vez

tiene varias fases como: flujo de escombros (fracciones líquidas y sólidas iguales volumétricamente), transicional (altas cargas de sedimentos) y fangosa (agua con sedimentos de grano fino suspendidos) (Harris, 2015)

En este caso en una eventual erupción del volcán Cotopaxi, los flujos piroclásticos que se producen pueden generar lahares cuando los fragmentos de rocas que fluyen a altas temperaturas se mezclan derritiendo la nieve y el hielo, estos pueden ser potencialmente destructivos por su gran velocidad y densidad. (Global Compact corporate, 2021).

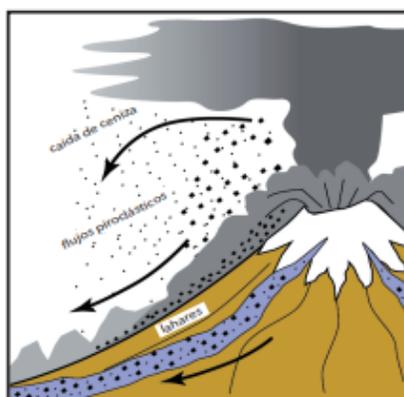
De acuerdo a su origen los lahares pueden ser primarios o secundarios.

Lahares Primarios

Son aquellos que su origen es producto directo de una erupción volcánica, poseen características de gran volumen y alcanzan altas velocidades (Mothes & Vallance, 2015).

Figura 4.

Ejemplo de lahar primario



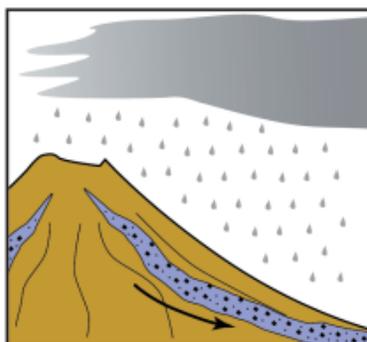
Nota. Lahar primario. Tomado de *Lahares (flujos de lodo)*, por (Almeida et al., 2017)

Lahares Secundarios

Son aquellos que se producen luego de una erupción volcánica, es decir, son originados por lluvias, que, al caer sobre un material previo, este es removido originando flujos con menor volumen y velocidad que un lahar primario (Mothes & Vallance, 2015) .

Figura 5.

Ejemplo de lahar secundario



Nota. Lahar secundario. Tomado de *Lahares (flujos de lodo)*, por (Almeida et al., 2017)

Un lahar tiene una morfología, la cual cuenta con las siguientes características: La fuente de un lahar es lugar donde se inicia el flujo y esta puede ser el cráter del volcán o áreas donde el material volcánico está acumulado, también cuenta con un canal de flujo, que es el camino por donde se desplaza cuesta abajo, como el cauce de ríos cercanos, otra parte es la cabeza del lahar, que es el lugar donde se acumula una gran cantidad de material y alcanza altas velocidades, el cuerpo del lahar es la parte central del flujo donde el material que es transportado se mezcla con agua y forma una mezcla de lodo y escombros, la cola del lahar es la parte trasera del flujo y en esta la velocidad del lahar disminuye gradualmente y finalmente el lateral del lahar son los bordes del flujo que están formados por el material arrancado durante el recorrido del lahar (Aguilera & Toulkeridis, 2004).

Intensidad de la amenaza

Es el grado potencial de posibles daños, la cual puede variar dependiendo de su ubicación geográfica (MIDEPLAN, 2014) (Ojeda et al., 2007) en este estudio se analizará la intensidad de acuerdo a la ubicación de las infraestructuras y al nivel de inundación que se presente en los diferentes lugares del área de influencia.

Tiempo de duración

Es la duración que tiene la amenaza, esta puede ser corta o larga dependiendo del fenómeno natural (MIDEPLAN, 2014), en este caso la amenaza a analizar tiene una duración de minutos, incluso segundos con respecto al área de estudio.

Estos componentes analizarán y se podrán visualizar en el modelo que se obtendrá en el presente trabajo.

Vulnerabilidad. - componentes, características y factores modificadores de la vulnerabilidad

La vulnerabilidad es la facilidad, propensión y susceptibilidad en la que se encuentra un territorio frente a la ocurrencia de un evento negativo, esta tiene relación directa con la intensidad de la amenaza, en lo que se refiere al grado de exposición o cercanía a la amenaza (INDECI, 2009).

Los componentes de la vulnerabilidad son los siguientes:

Fragilidad: Es la facilidad con que algo se pueda dañar frente a una situación de ocurrencia de un peligro (FAO, 2009). Se relaciona directamente con la vulnerabilidad, debido a que mientras un elemento sea más frágil, este se vuelve más vulnerable y viceversa.

Grado de exposición: Se refiere a que tan cerca o lejos se encuentre la amenaza del área de influencia (Secretaría General de la Comunidad Andina, 2009). Tiene una relación

directa con la vulnerabilidad, es decir, mientras más cerca se encuentre la amenaza del área de influencia, esta provoca más daños y por ende el área de influencia se vuelve más vulnerable.

Capacidad de respuesta: Es el conjunto de medidas y acciones que se aplican durante la ocurrencia de una emergencia o desastre, con objeto de reducir los efectos que estos puedan ocasionar (Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI), 2009). Este componente tiene una relación inversa con la vulnerabilidad, debido a que, si existe una buena capacidad de respuesta, la vulnerabilidad se reduciría.

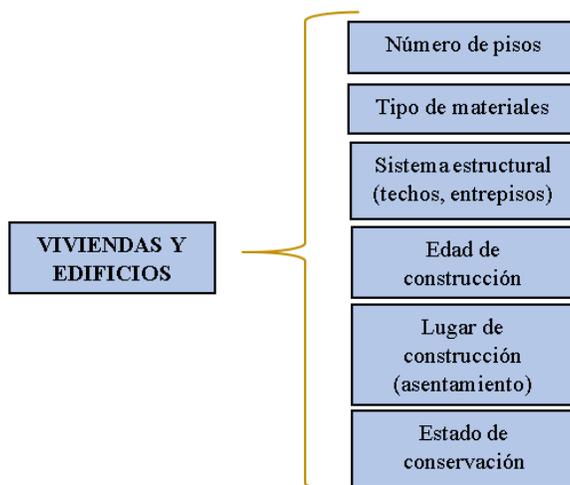
Resiliencia: Es una etapa fundamental de recuperación a mediano y largo plazo, luego de la ocurrencia de un desastre, en esta fase se busca reconstruir de modo que, si vuelve a suceder un evento natural, sus daños sean menores (Secretaría General de la Comunidad Andina, 2009). Este componente se relaciona de manera inversa con la vulnerabilidad, es decir, mientras mejor sea su recuperación, la vulnerabilidad se reduciría.

Costos: Este componente tiene relación especial con la vulnerabilidad física, debido a que esta comprende infraestructura, misma que se tendrá que recuperar o rehabilitar y reconstruir luego de la ocurrencia de un desastre (Navarro et al., 2020).

La vulnerabilidad tiene factores modificadores, de estos dependerá si el daño es mayor o menor, en este caso, se enfocó en la vulnerabilidad física, la cual está relacionada con la parte de la infraestructura de un territorio, es decir, las viviendas y edificios (ver figura 6).

Figura 6.

Factores modificadores de vulnerabilidad física



Nota. Elaboración propia

Volcanes y actividad explosiva

Un volcán es una estructura geológica formada alrededor de un orificio circular y es por donde se produce una erupción de rocas total o parcialmente fundidas (en estado líquido) (Instituto Geofísico - EPN, 2023). En este proyecto se tomará como caso de estudio una eventual erupción del volcán Cotopaxi y las áreas de influencia del recorrido de lahares que se produzcan como resultado de este evento.

El Cotopaxi es un volcán activo que se encuentra a 45 km al Sureste de Quito, está rodeado por páramos y otros volcanes (Instituto Geofísico - EPN, 2014), tiene erupciones aproximadamente cada siglo, siendo la última en el año de 1877 (Aguilera & Toulkeridis, 2004). Sus erupciones han formado grandes lahares (flujos de lodo y escombros), los mismos que atraviesan centros poblados como Sangolquí (Instituto Geofísico - EPN, 2014). Dentro de este centro poblado se ha delimitado el área de estudio para la realización de un modelo actualizado de recorrido de lahares.

Los diferentes tipos de actividad volcánica tienen su origen en volcanes que han tenido un comportamiento predominante (Sieron, 2014) en este caso de estudio se considera el tipo de

erupción vulcaniana debido a que la última actividad volcánica explosiva del volcán Cotopaxi fue en 1877 (Aguilera & Toulkeridis, 2004), misma que origino caída de cenizas, emisión de flujos piroclásticos y lahares originados por la fusión del hielo glacial.

Area de Influencia

Es el lugar o espacio geográfico, donde sucede un fenómeno natural y es afectado potencialmente por el mismo, la identificación de esta permite realizar una evaluación de riesgos y establecer medidas de prevención y mitigación (MIDEPLAN, 2014) (Departamento de Desarrollo Regional y Medio Ambiente Secretaría Ejecutiva p, 1991), en este trabajo el área de influencia es afectada por un lahar.

El Espacio Geográfico; consideraciones

Es el lugar (naturaleza pura) donde interactúan los diferentes elementos físicos como el relieve, clima, geomorfología, vegetación y que además se encuentra sin intervención humana directa (Vargas Ulate, 2012). En este trabajo el área de estudio se encuentra donde inicialmente era considerado un espacio geográfico, debido a que por esta zona hace varios años transitó un flujo de lahar producto de la erupción del volcán Cotopaxi (Ordóñez et al., 2013)

Territorio; consideraciones

Es una parte del espacio geográfico que ha sido ocupada por la gente donde viven y realizan sus diferentes actividades (Hoffmann & Morales Gamboa, 2019). La zona en la que se realizó el presente trabajo se convirtió en territorio, debido a que en este lugar existen asentamientos humanos, mismos que han invadido el área de influencia del tránsito de lahares, razón por la cual este fenómeno se ha convertido en una amenaza para toda la población que se encuentre dentro de esta zona.

Uso del suelo

Como se está trabajando en el territorio, dentro del mismo se tiene un determinado uso del suelo, el cual según el (GADMUR, 2018) se define por el tipo de uso asignado a un delimitado espacio geográfico, que dependiendo de sus características físicas será determinado para un fin específico. El desarrollo de este trabajo se lo realizó en una zona de suelo urbano, el cual tiene en diferentes usos que son: principales, complementario, restringido y prohibido y no permitidos (MIDUVI, 2018).

Dentro del área de estudio se identificó que existe el uso principal de suelo urbano, el cual abarca los siguientes usos: residencial, residencial combinado, múltiple, industrial, equipamiento, protección natural y protección arquitectónica cultural.

Figura 7.

Clasificación de usos principales del Suelo Urbano

CÓDIGO	USO PRINCIPAL	ACTIVIDADES PREDOMINANTES	DENSIDAD PROYECTADA
R1	Residencial 1	Residenciales, con usos complementarios como comercio, servicio y equipamiento básicos	180 hab/ha.
R2	Residencial 2	Residenciales, con usos complementarios como comercio, servicio y equipamiento básicos	360 hab/ha.
RC1	Residencial Combinado 1	Residenciales, con usos complementarios como comercio, servicios, actividades institucionales; en diferentes escalas y coberturas, en uso exclusivo o combinados con otros usos de suelo en lotes y edificaciones.	180 hab/ha.
RC2	Residencial Combinado 2	Residenciales, con usos complementarios como comercio, servicios, actividades institucionales; en diferentes escalas y coberturas, en uso exclusivo o combinados con otros usos de suelo en lotes y edificaciones.	360 hab/ha.
RC3	Residencial Combinado 3	Residencial de carácter intensivo, proyectos habitacionales en altura, Combinado con servicios, comercio y equipamiento	480 hab/ha.

PN	Protección Natural	Es un suelo no urbanizable con usos destinados a la conservación y protección del suelo, que asegure la calidad ambiental, el equilibrio ecológico y el desarrollo sustentable. Se incluirán en este uso, los taludes o terrenos con pendientes iguales o superiores a 27 grados o 50% de inclinación; cuerpos de agua y terrenos comprendidos bajo la cota de máxima crecida de los mismos.	
----	--------------------	--	--

E1	Equipamiento 1	Las actividades de servicio social, recreación y deporte, seguridad entre otras, que tienen radio de influencia de 1km o de 15 min caminando. Es el equipamiento básico que sirve a un sector determinado como barrio, conjuntos habitacionales y urbanizaciones pequeñas.	
E2	Equipamiento 2	Las actividades de servicio social, recreación y deporte, seguridad entre otras, es el equipamiento especializado que tiene radio de influencia de 2 km y que sirve a una zona.	
E3	Equipamiento 3	Corresponde a los servicios que se entregan dentro de la jurisdicción del Cantón a nivel administrativo o por las entidades públicas sectoriales,	

Nota. Usos principales del Suelo Urbano. Tomado de *Ordenanza de zonificación, uso y ocupación del suelo del cantón Rumiñahui*, por (GADMR, 2018)

Catastro

El tema en particular de la zona de interés es el catastro, el cual según (Erba & Piumetto, 2013) (IAAO, 2013) es definido como un inventario o registro que recopila, gestiona y contiene información de bienes inmuebles, donde dicha información es utilizada con fines de planificación territorial, temas administrativos y gestión fiscal. El área de estudio del presente trabajo tiene varios bienes inmuebles, por tal motivo es importante tener información recopilada que permita conocer el tipo de infraestructura existente y en este caso al ser una zona que se encuentra dentro de amenaza de lahar, es necesario tener una idea de la valoración económica que presenta este sector, a fin de poder implementar planes de mitigación que permitan reducir los daños y por ende los costos que dejaría como consecuencia este evento natural.

Tecnologías de Información Geoespacial

Dentro de las tecnologías de información geoespacial que se utilizaron para el desarrollo de este trabajo se encuentran las siguientes:

Sistemas de Información Geográfica

Es un conjunto de software y hardware capaz de gestionar y analizar información geográfica, así como también ser visualizada a través de un mapa y escenarios en 3D. Estos sistemas fueron de gran ayuda para la realización de este trabajo, debido a que fueron utilizados para, la recopilación y estructuración de información, misma que fue utilizada para los diferentes procesos.

ArcGIS. - características y utilidad

ArcGIS es un software de Sistemas de Información Geográfica que sirve para analizar y procesar información geoespacial, cuenta con una plataforma digital la cual administra la geodatabase de un conjunto de bases de datos además tiene un software orientado a la distribución de datos a través de internet (Pucha et al., 2017). En este trabajo se utilizó dos herramientas de ArcGIS que son ArcMap y ArcScene, el primero de ellos fue útil para almacenar, estructurar y procesar la información geoespacial obtenida para el desarrollo del trabajo, mientras que el segundo complemento fue de gran utilidad para modelar y analizar información geoespacial, así como también poder visualizarla en 3D (ver figura 8).

Figura 8.

Visualización entorno en ArcScene



Geodatabase. - uso y características

Es un conjunto de dataset geográficos que están interrelacionados mediante estructuras complejas, posee la característica de tener varios usuarios y pueden convertirse de bases de datos pequeñas a bases de datos más grandes (ArcGIS Pro 3.0, 2020), en el presente proyecto se creó una geodatabase a fin de tener la información ordenada, estructurada y actualizada del área de estudio con sus diferentes variables como: edificabilidad, construcciones, vías, cuerpos de agua, uso de suelo, modelo digital de superficie, modelo digital del terreno y la ortofoto, que fueron de gran utilidad al momento de realizar el modelo de inundación del lahar.

Fotogrametría

Es una técnica de medición y generación de modelos tridimensionales mediante el uso de fotografías (Caro, 2012), para este trabajo se empleó la fotogrametría aérea, en donde se realizó un proceso fotogramétrico, a fin de obtener como producto final un modelo digital de superficie (MDS), un modelo digital del terreno (MDT) y una ortofoto del área de estudio.

Uso y obtención de información a través de Dron

El dron es una plataforma (aeronave) no tripulada la cual se opera mediante un control a distancia y porta un tipo de sensor a fin de obtener datos geoespaciales (Gastón & Pérez, 2014). En este estudio se empleará esta herramienta para realizar un levantamiento fotogramétrico de la zona de estudio, con la finalidad de obtener una ortofoto actualizada del sector. Para obtener información mediante este equipo es necesario realizar un procedimiento previo al vuelo el cual consiste en delimitar el área de vuelo, seguidamente realizar un plan de vuelo y finalmente ingresar esta información a la aplicación que en este caso fue DronDeploy.

Figura 9.

Dron utilizado en este trabajo



Nota. Dron Mavic Air 2

Agisoft Metashape Professional. - características y utilidad

Es un software que tiene la capacidad de realizar procesos fotogramétricos de imágenes en cámaras RGB o multiespectrales, también genera modelos en 3D mismos que sirven para poder utilizarlos en aplicaciones de Sistemas de Información Geográfica (AgiSoft LLC, 2021). En el presente trabajo se utilizó este software para realizar el procesamiento de las fotografías ortogonales que fueron tomadas con el dron mencionado anteriormente, el software generó una nube de puntos densa, creó una malla y finalmente generó un modelo digital de superficie (MDS), un modelo digital del terreno (MDT) y una ortofoto.

Ortofoto

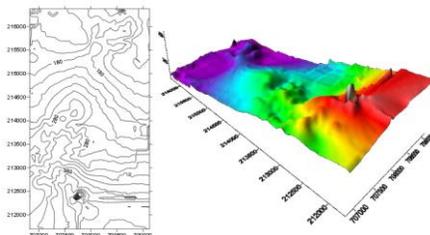
Es una representación fotográfica de la superficie del terreno, donde las deformaciones debidas al desplazamiento por relieve e inclinación de la cámara han sido corregidas (Jáuregui et al., 2006), posee características métricas similares a las de un mapa, incluyendo una escala conocida (Berenguer, 2016). En este estudio la ortofoto es uno de los insumos principales para el desarrollo del trabajo debido a que contiene información actual a la fecha de vuelo, la misma que se utilizó como base para el desarrollo del modelamiento en los diferentes softwares empleados.

Modelo Digital del Terreno (MDT)

Es un conjunto de capas (formato ráster), una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno (Duque, 2015) es decir, recrea la forma del terreno una vez que fueron removidos elementos como: vegetación, edificaciones (Felicísimo, 1994). Para este estudio el modelo digital del terreno se obtuvo a través del software Agisoft Metashape Professional, fue útil para realizar varios procesamientos, uno de ellos fue darle la forma del relieve del terreno a la ortofoto, también sirvió como insumo en los diferentes softwares en los que se realizó el modelamiento.

Figura 10.

Modelo Digital del Terreno



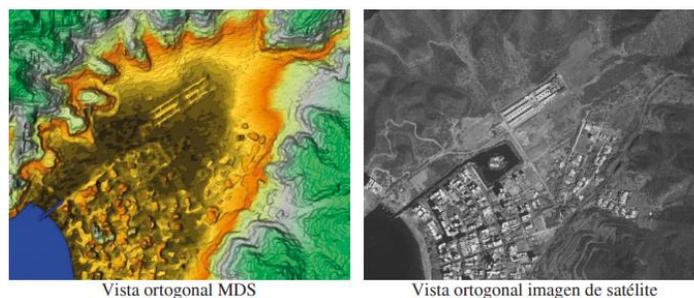
Nota. Modelo Digital del Terreno. Tomado de *Estudio de la exactitud de los modelos digitales del terreno (MDT)*, por (Entombo, 2013)

Modelo Digital de Superficie (MDS)

El modelo digital de superficie representa los elementos presentes en la superficie como: vegetación, edificaciones e infraestructura (Bolaños & Rozo, 2023), en el presente trabajo el modelo digital de superficie se obtuvo a través del software Agisoft Metashape Professional, producto que se utilizó como insumo para realizar el modelamiento de inundación en el software Hec-RAS.

Figura 11.

Modelo Digital de Superficie



Nota. Modelo Digital de Superficie. Tomado de Modelo digital de la superficie a partir de imágenes de satélite Ikonos para el análisis de áreas de inundación en Santa Marta, Colombia, por (Bolaños & Rozo, 2023)

Modelamiento

Es una representación de objetos, procesos o conceptos, que permiten predecir o analizar el comportamiento de estos en el espacio (IBM Corporation, 2021), el uso de esta técnica en este trabajo fue fundamental, debido a que permitió generar un escenario de un fenómeno natural y analizarlo con respecto a la intensidad de su amenaza.

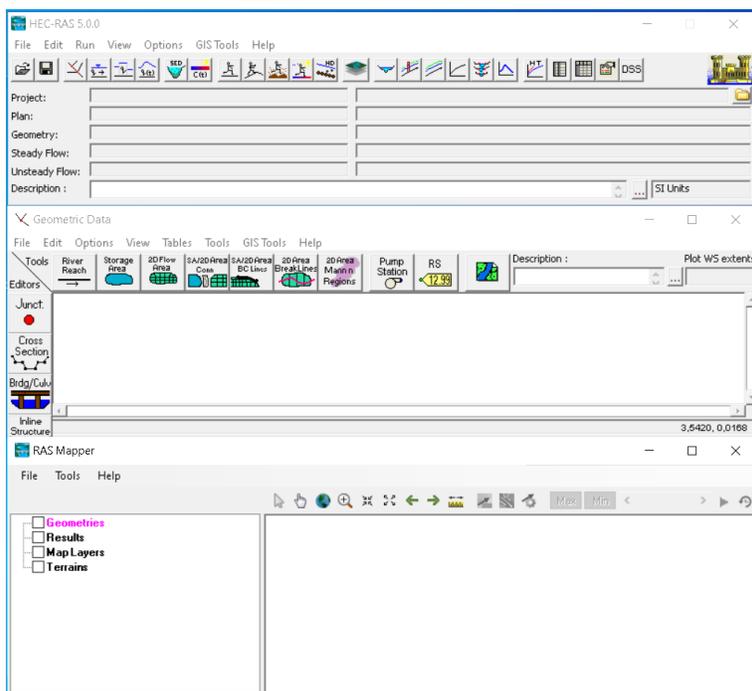
HEC-RAS. - características y utilidad

Es un software de modelización hidrológica que permite simular flujos de manera unidimensional y bidimensional a fin de obtener el nivel del agua en diferentes causas ya sean naturales o artificiales (Villón, 2014), uno de sus principales usos es realizar estudios de inundabilidad y determinar las zonas vulnerables a esto (Benayas, 2016).

Dentro de este trabajo fue de gran utilidad para realizar la simulación del modelo de recorrido de lahar, debido a que como insumo se utilizó el modelo digital de superficie (MDS) de la zona de estudio, datos de flujo de lahar y tiempo, el cual permitió recrear y generar resultados de inundación y tiempo del evento en las zonas que probablemente serían inundados ante este fenómeno.

Figura 12.

Interfaz de Hec-RAS versión 5.0.0



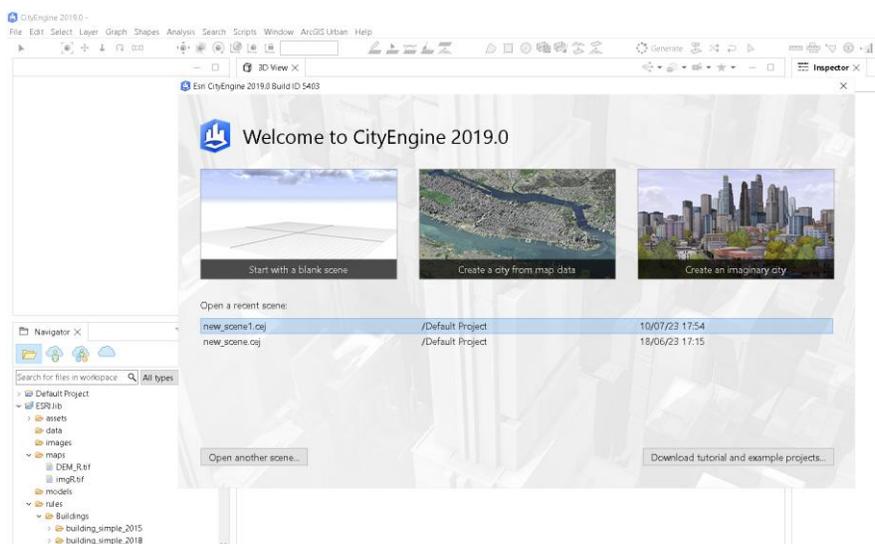
Cityengine. - características y utilidad

Es un software que tiene la capacidad de generar entornos urbanos de manera tridimensional, permite crear escenarios con datos reales y ficticios, además posee características y funciones como la integración con otros programas de visualización en 3D, a fin de otorgar a los usuarios exportar la información a diferentes plataformas para visualizarla y modificarla (Duarte, 2018).

Para el desarrollo de este trabajo, se empleó este software para estructurar la información de los bloques constructivos, debido a que cuenta con varias herramientas que permitieron caracterizar la misma y generar los modelos en 3D de acuerdo a los atributos que se estableció.

Figura 13.

Interfaz CityEngine 2019.0



Realidad Virtual. - características y utilidad

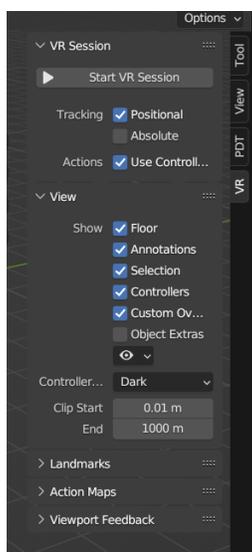
Es una tecnología que tiene una capacidad inmersiva la cual engaña a los sentidos de una persona y esta pueda experimentar el entorno generado por la computadora como si fuera

real (Bockholt, 2017), la utilización de gafas de realidad virtual y controladores permite al usuario navegar dentro del escenario y tener la sensación de estar presente en el (EDS/ROBOTICS, 2021)

La visualización de los resultados en realidad virtual fue mediante la plataforma de Blender y la activación del addon de realidad virtual, el cual permitió que la configuración de las gafas y controles sea reconocida correctamente, esta es una manera diferente de poder visualizar un escenario que comúnmente solo se podían visualizar en un plano 2D.

Figura 14.

Complemento de Realidad Virtual en Blender



Realidad Aumentada. - características y utilidad

Es una tecnología que busca la interacción de las personas con objetos virtuales superpuestos (Melo Bohórquez & -Colombia, 2018), existen diferentes tipos de realidad aumentada, una de ellas se basa en la utilización de marcadores, mientras que la otra no, para el caso de la primera es necesario contar con ciertos componentes como: un objeto real, un dispositivo con cámara y un software para que la realidad aumentada pueda reproducirse correctamente (Microsoft 365, 2023).

Para el presente trabajo se escogió esta tecnología como una forma mas de poder representar el modelo de recorrido de lahar, las plataformas empleadas para esto fueron Unity y Vuforia, esto se realizó a fin de tener diferentes opciones de visualización, en donde se pueda apreciar de mejor manera y se logre tener un mejor entendimiento al momento de analizar los resultados.

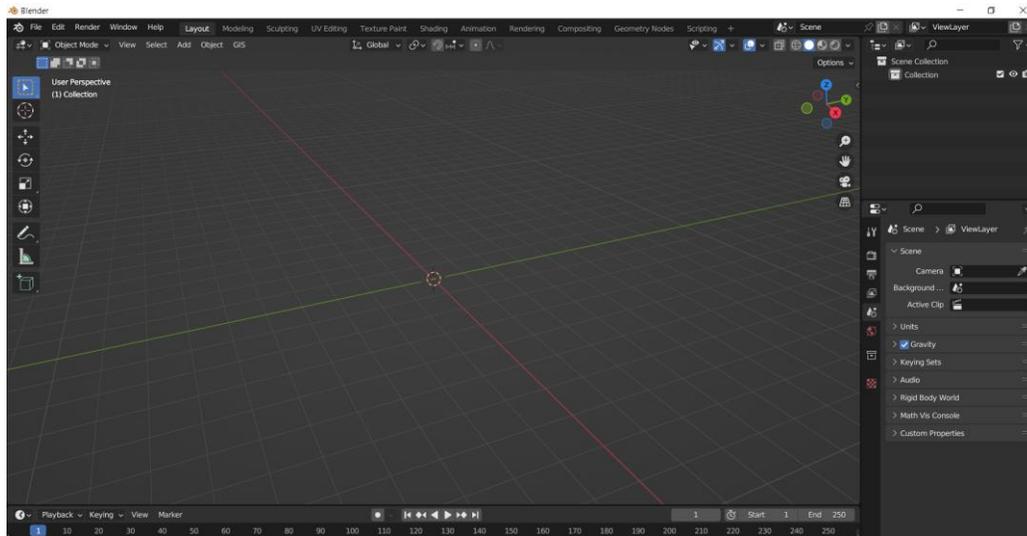
Blender. - características y utilidad

Es una multiplataforma de código abierto que se utiliza para realizar modelos, animaciones, simulaciones, creación de juegos, cuenta con varias herramientas como es el caso de una extensión para poder visualizar en realidad virtual, la cual intenta establecer una conexión a la plataforma OpenXR a fin de compartir el viewport con un HMD (Suau, 2011).

Este software se utilizó para realizar la simulación de inundación en el área de estudio, importar, visualizar el modelo digital del terreno, la ortofoto y los bloques constructivos, estos ultimo fueron estructurados en CityEngine y poder generar un escenario del recorrido de lahar en realidad virtual.

Figura 15.

Interfaz Blender versión 3.5



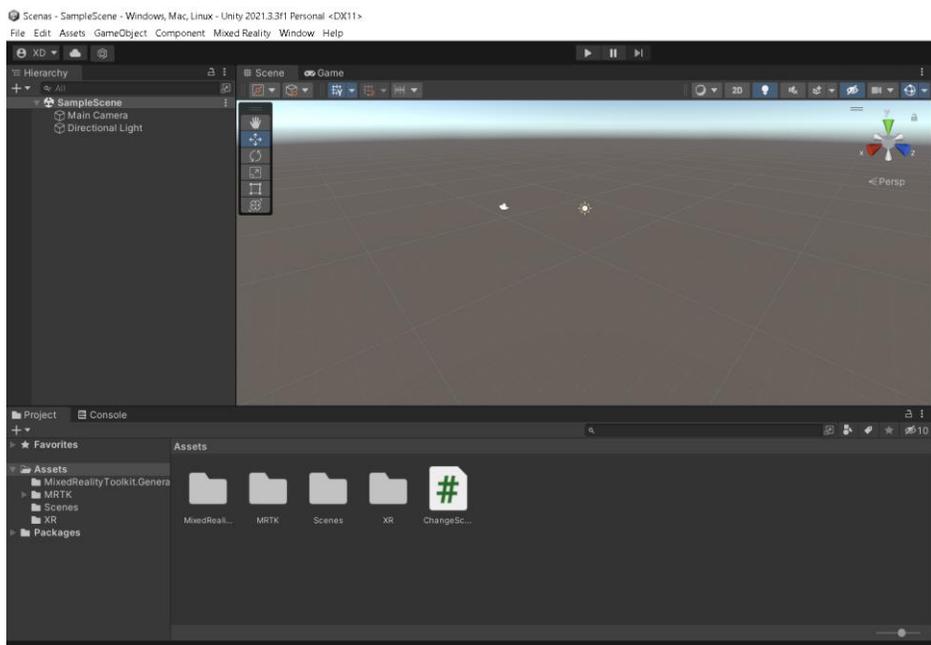
Unity. - características y utilidad

Es una plataforma que brinda herramientas para desarrollar juegos, programar vía scripting (Hernández et al., 2018) (Jiménez, 2015), tiene la capacidad de correr en diferentes plataformas los productos que fueron desarrollados en esta, cuenta con soporte para realidad virtual y mixta, estas y otras características más hacen que este sea uno de los motores de videojuegos preferidos actualmente (Cerón & Bedoya, 2014).

En este trabajo se utilizó Unity para la creación del escenario de recorrido de lahar en realidad aumentada, por lo cual gracias a la compatibilidad de formatos que existe entre este programa y Blender se pudo utilizar como insumos los productos obtenidos en esta plataforma.

Figura 16.

Interfaz de la plataforma Unity versión 2021.3.3



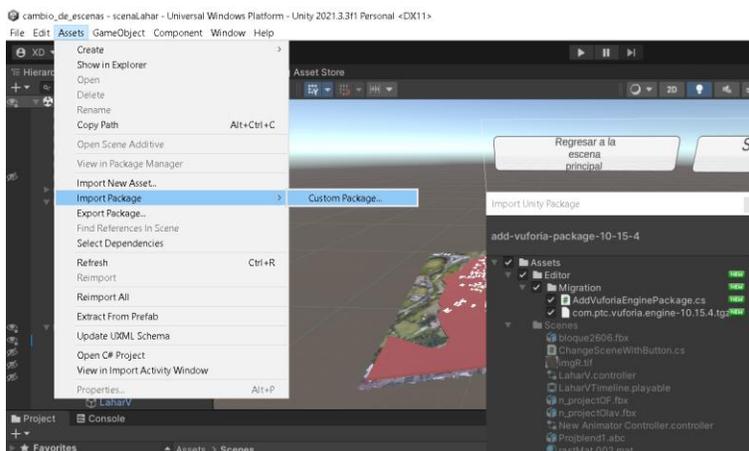
Vuforia. - características y utilidad

Es una plataforma de realidad aumentada que mediante el reconocimiento de imágenes planas permite incorporar objetos virtuales en el mundo real a través de la cámara de un celular o computadora (Liu et al., 2018), además tiene la capacidad de integrarse con la plataforma de Unity permitiendo crear aplicaciones para Android utilizando un flujo especial de trabajo (Adrianto et al., 2016).

Para la representación del modelo de inundación en realidad aumentada se descargó el paquete de Vuforia y se instaló en la plataforma de Unity, se configuró la plataforma y se procedió a generar el escenario, en donde como imagen para representar se escogió una en formato JPG, la cual sirvió como base para el reconocimiento del programa en formato apk.

Figura 17.

Instalación paquete de Vuforia en la plataforma de Unity



Marco Legal

El presente trabajo de titulación con respecto a la Gestión de Riesgos se basa en las siguientes leyes y reglamentos:

Constitución de la República del Ecuador

Título VII: Régimen del Buen Vivir

Sección novena: Gestión del Riesgo

Art. 389.- El Estado protegerá al territorio de los efectos negativos de origen natural o antrópico a través la implementación de planes de mitigación a fin de reducir su nivel de vulnerabilidad (Constitución de la República del Ecuador, 2008)

Plan de Creación de Oportunidades

Eje Seguridad Integral

Objetivo 9: Garantizar la seguridad ciudadana, orden público y gestión de riesgos

El estado debe garantizar la convivencia segura para los ciudadanos, el cual busca fortalecer la gestión de riesgos identificando aquellos riesgos que afecten al territorio ecuatoriano, esto se logrará generando difusión de información y coordinando acciones

pertinentes a fin de prevenir y mitigar la vulnerabilidad y por ende el riesgo (Secretaría Nacional de Planificación, 2021)

Lineamientos

E1. Consiste en mejorar e impulsar el conocimiento del riesgo de desastres en todo el territorio nacional, esto se logrará con la participación de la academia e instituciones técnico-científicas, a fin de ayudar en la toma de decisiones que promuevan un desarrollo sostenible.

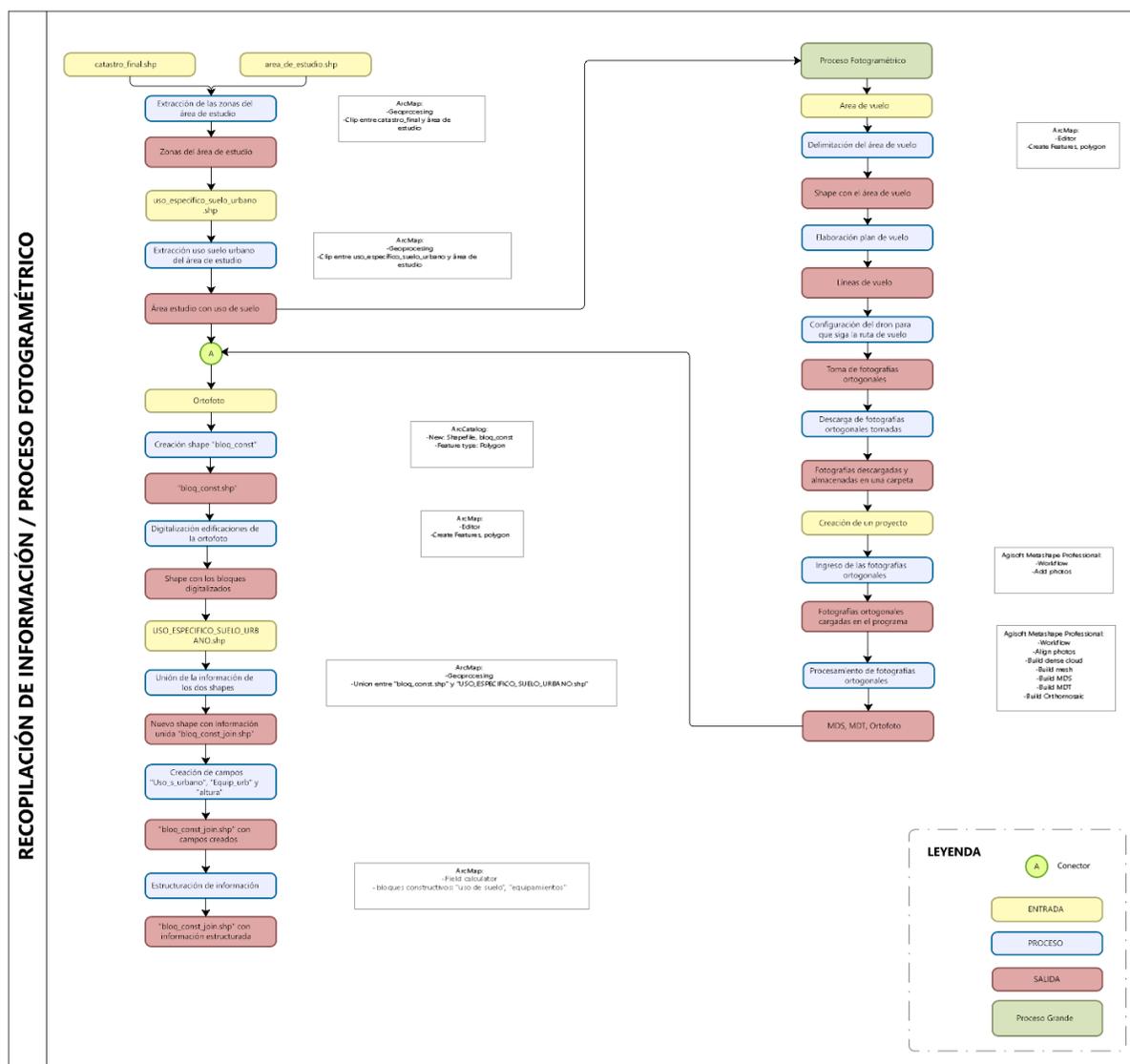
Capítulo III

Metodología

El presente capítulo explica la metodología que se llevó a cabo a fin de cumplir cada uno de los objetivos y metas planteadas en el trabajo, el cual se basa en varias etapas que son: la primera etapa consistió en la recopilación de información geoespacial existente, la cual fue proporcionada por el laboratorio de la carrera de ingeniería geoespacial de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE y el GAD de Rumiñahui, luego se hizo una visita de campo para realizar un levantamiento fotogramétrico del área de estudio donde se obtuvo los siguientes productos: modelo digital del terreno (MDT), modelo digital de superficie (MDS) y una ortofoto, mismos que sirvieron como insumos para la generación del modelo, finalmente se utilizó diferentes softwares de información geográfica para el procesamiento de información, un software de modeladores hidrológicos para realizar el modelamiento del flujo de lahar y plataformas de realidad virtual y aumentada para la representación del modelo actualizado.

Figura 18.

Esquema de la metodología para la recopilación de información

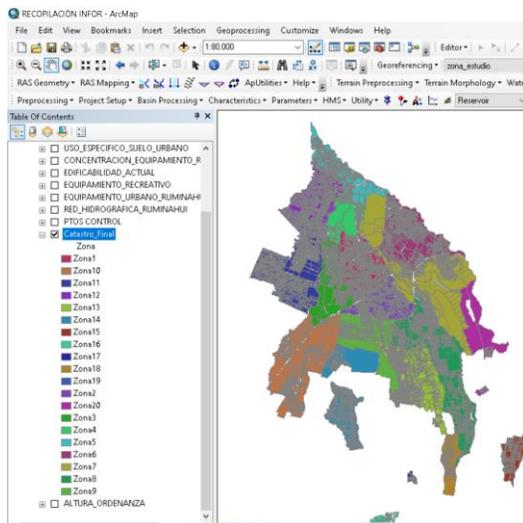


Recopilación de información geoespacial existente

La información que se obtuvo para el desarrollo del siguiente trabajo fue la siguiente: catastro del Cantón Rumiñahui, la cual se encontraba distribuida por zonas (ver figura 19), información del uso de suelo (ver figura 20), edificabilidad (ver figura 21) y recorrido del flujo de lahares (ver figura 22), misma que fue proporcionada por el laboratorio de Ingeniería Geográfica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE y el GAD de Rumiñahui respectivamente.

Figura 19.

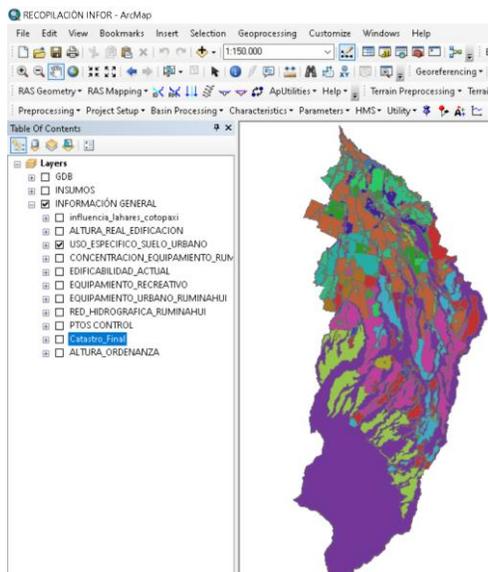
Información recopilada Catastro de Rumiñahui



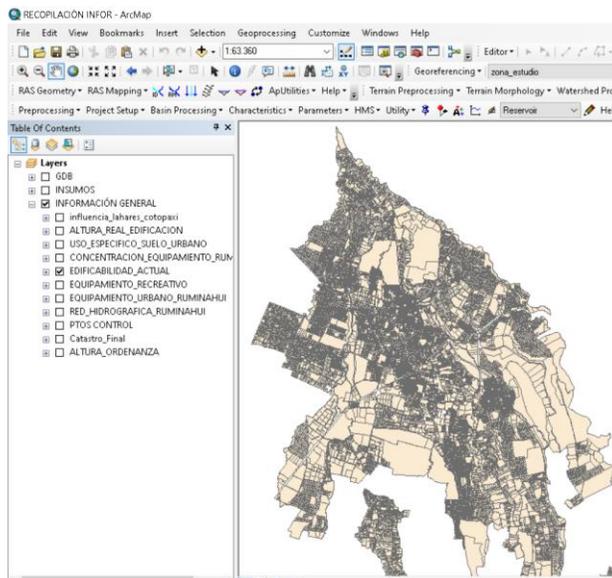
Nota. Catastro de Rumiñahui, por (GAD Rumiñahui, 2023)

Figura 20.

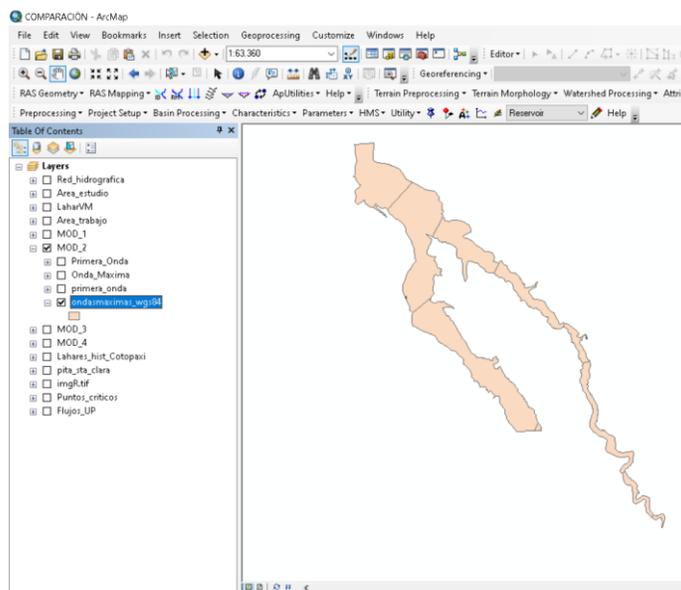
Información recopilada de uso específico de suelo urbano



Nota. Uso de Suelo Urbano, por (GAD Rumiñahui, 2023)

Figura 21.*Recopilación de información de edificabilidad actual*

Nota. Edificabilidad actual, por (GAD Rumiñahui, 2023)

Figura 22.*Recopilación información de recorrido de lahares Cotopaxi*

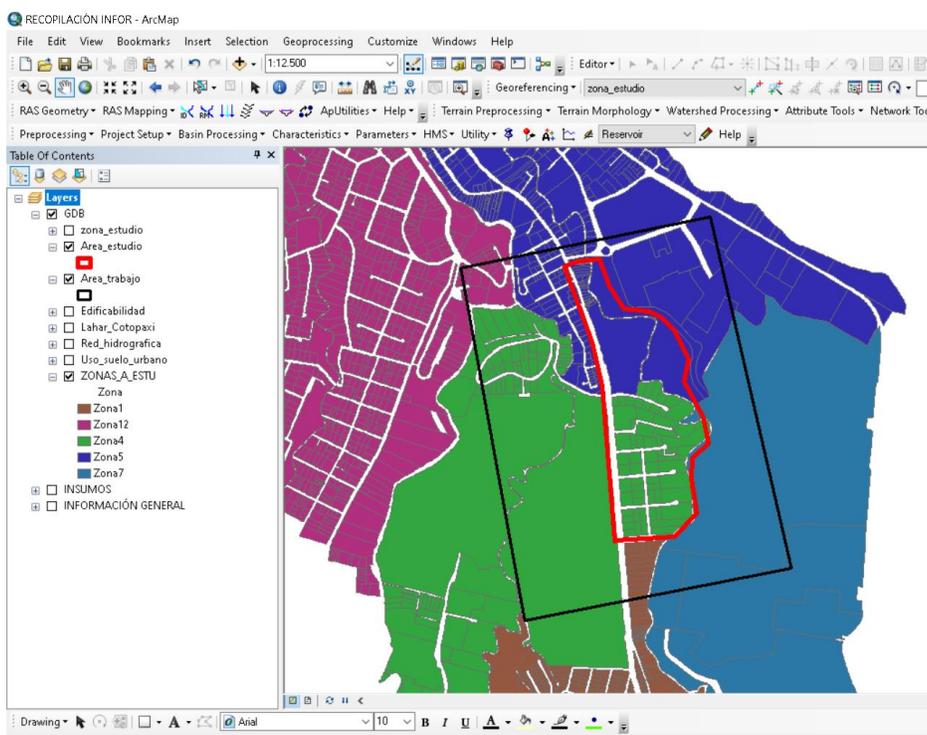
Nota. Recorrido de lahares Cotopaxi, por (Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, 2023)

Depuración de información

Para la realización del trabajo primero se procedió a depurar la información obtenida de catastros, el área de estudio está comprendida dentro de las zonas (4,5,7,12) del cantón Rumiñahui (ver Figura 23), luego con la ayuda del software ArcGIS se realizó un geoprocésamiento de esta información, el cual que permitió extraer todas las entidades que se encontraban dentro de la zona de estudio, dando como resultado la generación de una nueva capa denominada “Zonas_A_Estudio”.

Figura 23.

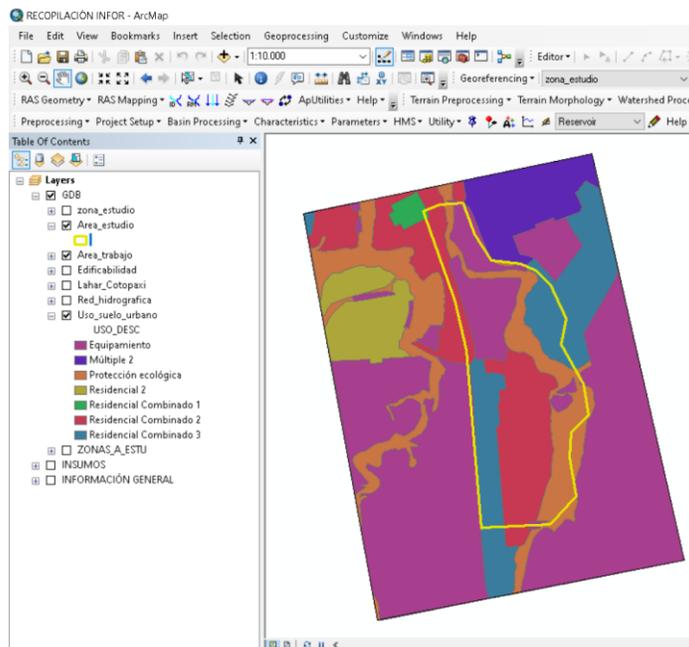
Zonas dentro del área de estudio



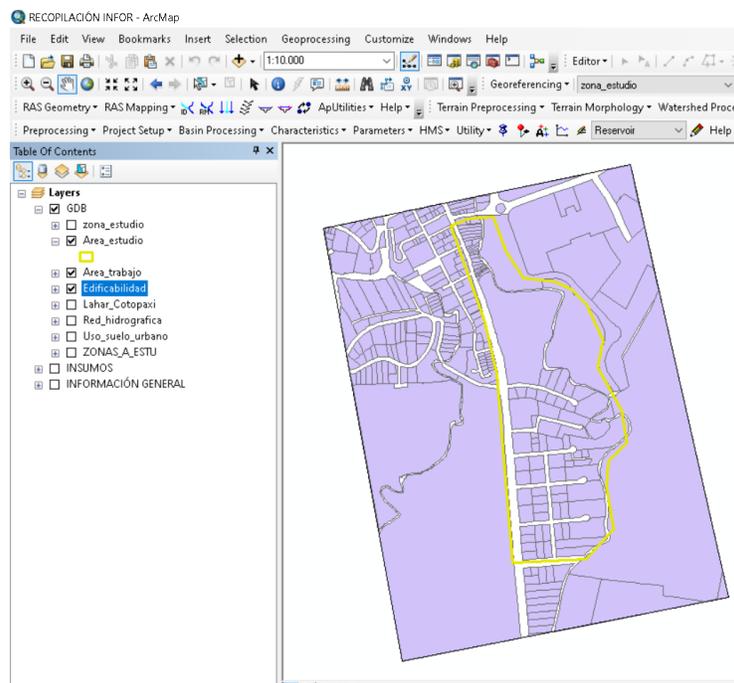
Este procedimiento se realizó varias veces para la depuración de la información recopilada que se encontraba en formato shapefile y producto de esto se generaron diferentes capas de información, las cuales fueron denominadas de la siguiente manera: uso_suelo_urbano (ver figura 24) y edificabilidad (ver figura 25).

Figura 24.

Usos específicos de suelo urbano del área de estudio

**Figura 25.**

Edificabilidad actual del área de estudio



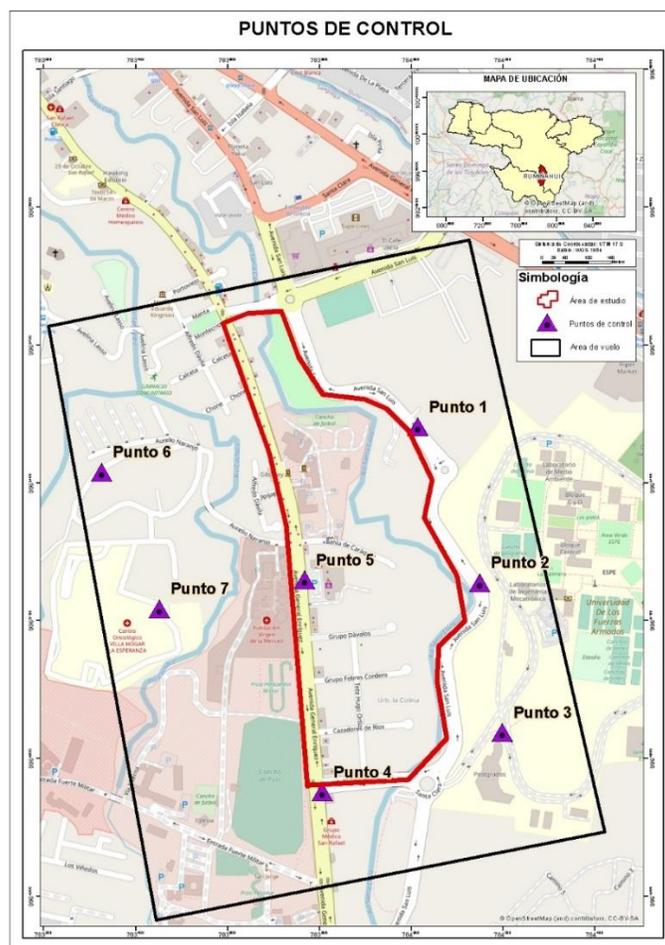
Proceso fotogramétrico

Toma de fotografías mediante Dron

Primero se delimitó un área de vuelo la cual contenía el área de estudio y luego se establecieron puntos de control ubicados de manera homogénea dentro de la zona de estudio (ver figura 26).

Figura 26.

Ubicación de los puntos de control



Después se realizó una visita de campo para realizar el levantamiento de estos puntos con la ayuda de equipos GNSS (ver figura 27), los cuales fueron prestados por el laboratorio de Ingeniería Geográfica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Figura 27.

Levantamiento puntos de control (punto 7)



Luego estos puntos de control fueron materializados a manera de paineles, los cuales fueron realizados con una dimensión de 80*80 cm y fueron señalados con pintura de color negro y rojo (ver figura 28), además se fotografió infraestructura de interés para este trabajo (ver figura 29).

Figura 28.

Materialización de los paineles en los puntos de control levantados (punto 7)



Figura 29.

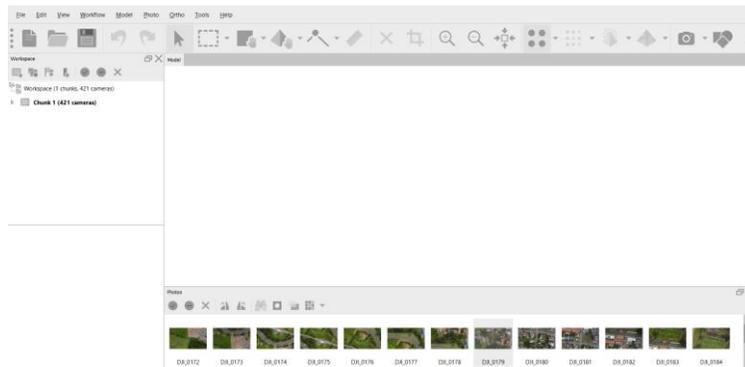
Infraestructura (cerramiento-muro)



Posterior a ello se procedió a realizar el plan de vuelo, mismo que fue realizado en tres etapas debido a la extensión del terreno (ver figura 30) y a las características que posee el dron.

Figura 30.

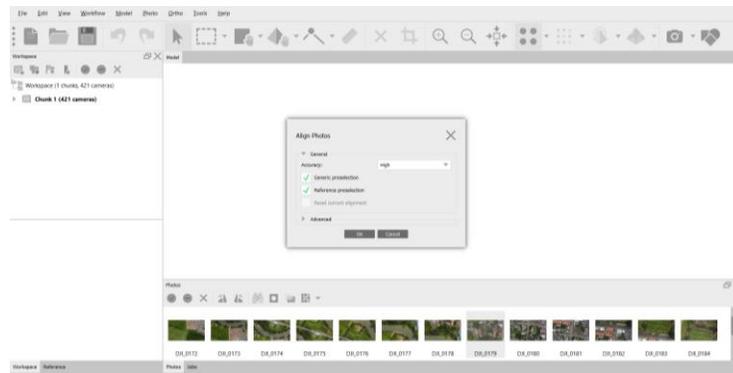
Áreas de vuelo



Luego se procedió a alinear las fotografías (ver figura 32)

Figura 32.

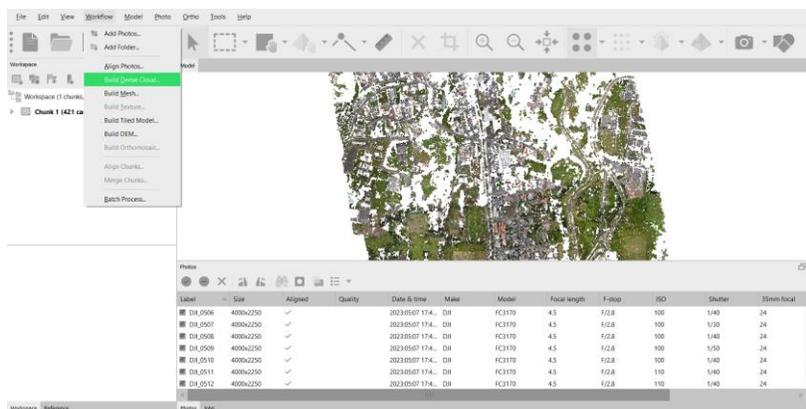
Alineación de las fotografías ortogonales



Posterior a esto, se creó una nube de puntos y una nube de puntos densa (ver figura 33).

Figura 33.

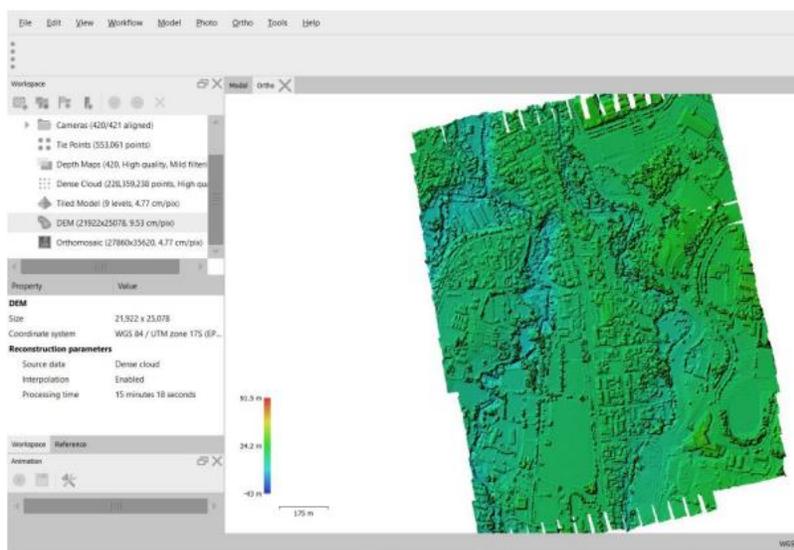
Creación de la nube de puntos



Luego se procesó nuevamente la nube de puntos densa obtenida anteriormente y se creó una nueva malla utilizando información de infraestructura, árboles y demás elementos presentes en el área de estudio y finalmente se obtuvo el modelo digital de superficie (ver figura 34).

Figura 34.

Modelo Digital de Superficie obtenido



Generación de un MDT

Para la generación del modelo digital del terreno se utilizó como insumo la nube de puntos densa obtenida la primera vez, la cual se procesó nuevamente y se creó una nueva

malla utilizando información únicamente del relieve del terreno (ver figura 35), la cual generó curvas de nivel y finalmente se obtuvo el modelo digital de terreno (ver figura 36).

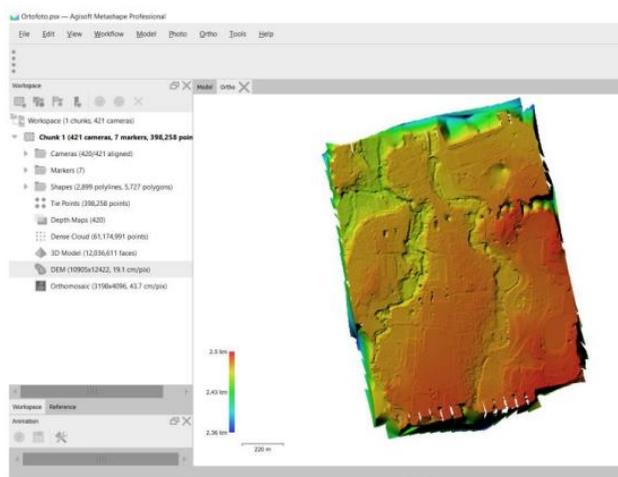
Figura 35.

Creación del Modelo Digital de Terreno



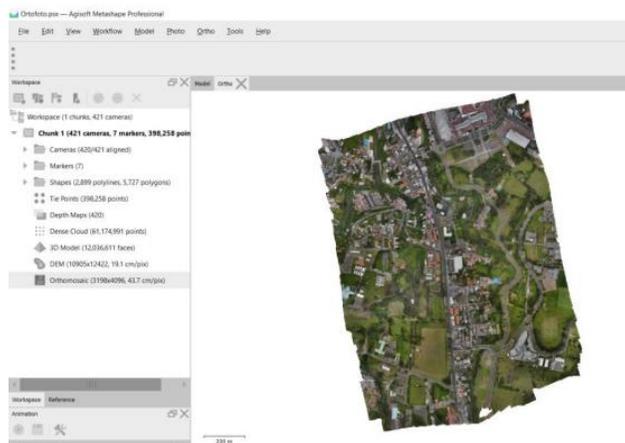
Figura 36.

Modelo Digital del Terreno obtenido



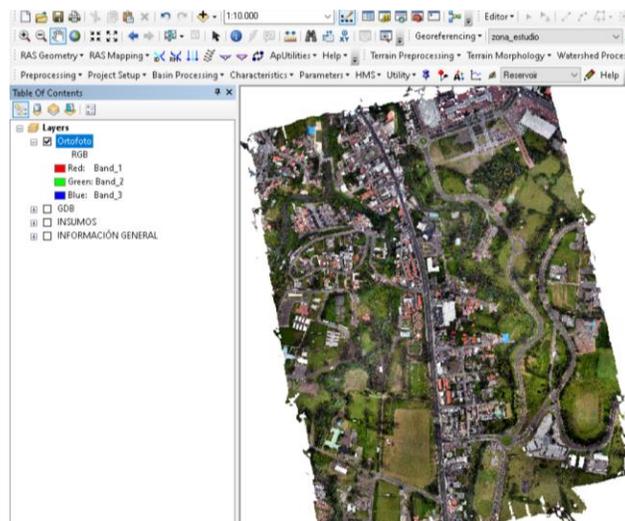
Generación de Ortofoto

De la nube de puntos densa ya generada, se procedió a corregir eliminando zonas que se encontraban fuera del área de trabajo, a fin de obtener el producto final que es la ortofoto georreferenciada con los puntos de control establecidos inicialmente (ver figura 37).

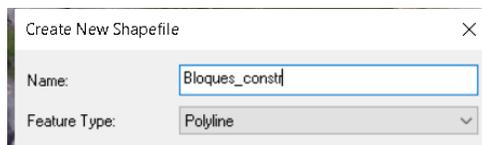
Figura 37.*Ortomosaico generado***Actualización de información cartográfica de la zona**

La actualización de información cartográfica realizó de la siguiente manera:

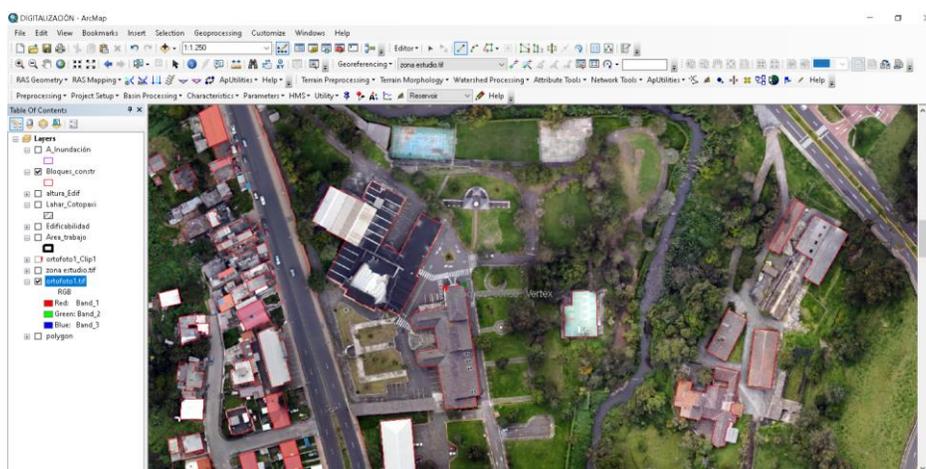
Primero se cargó la ortofoto (ver figura 38).

Figura 38.*Ortofoto subida en el software*

Seguidamente se creó un shape, con el nombre "bloq_const" (ver figura 39).

Figura 39.*Creación del shape*

En el shape creado se digitalizó todas las construcciones dentro del área de influencia (ver figura 40).

Figura 40.*Digitalización de las edificaciones presentes en el area de estudio*

En este paso se procede a organizar la información geoespacial recopilada, a fin de tener ordenada y simbolizada jerárquicamente cada uno de los insumos.

La información de la capa denominada “bloq_const” se estructuró creando nuevos campos de información (número de pisos, uso de suelo urbano, equipamientos) (ver figura 41), debido a que este tipo de información fue necesaria para ingresar como insumo en los diferentes softwares de modelamiento, especialmente para la visualización en 3D.

Figura 41.

Tabla de atributos de los bloques constructivos digitalizados

FID	Shape	Pisos	Uso_s_urb	Equip_urb
171	Polygon	2	Equipamiento	EQ Seguridad
172	Polygon	1	Equipamiento	EQ Seguridad
173	Polygon	2	Equipamiento	EQ Seguridad
174	Polygon	1	Equipamiento	EQ Seguridad
180	Polygon	1	Equipamiento	EQ Seguridad
358	Polygon	1	Residencial Combinado 2	EQ Religioso
91	Polygon	1	Equipamiento	EQ Educación
92	Polygon	1	Equipamiento	EQ Educación
93	Polygon	1	Equipamiento	EQ Educación
94	Polygon	1	Equipamiento	EQ Educación

Tabla 1

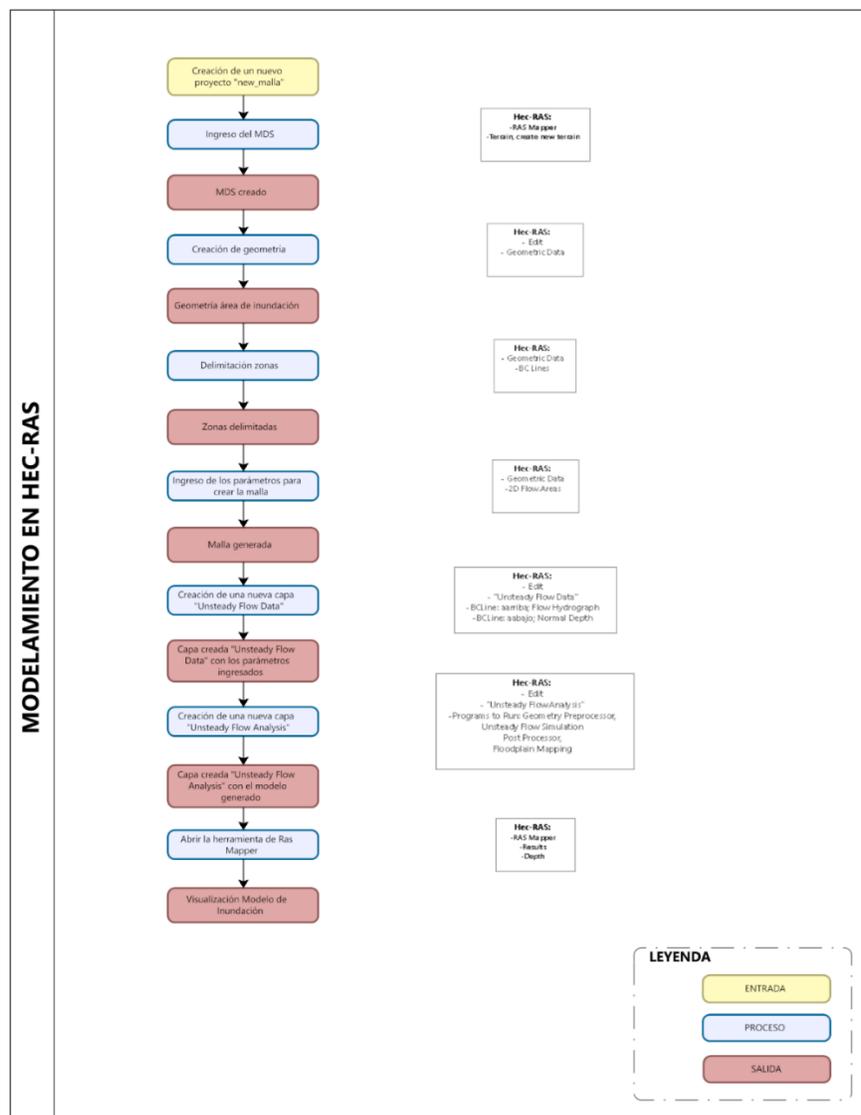
Información geográfica utilizada en el presente trabajo.

Insumos	Fuente	Formato	Descripción
Catastro del cantón			Información proporcionada por el
Rumiñahui	GAD Rumiñahui	DWG	Departamento de Avalúos y Catastros del GAD de Rumiñahui a escala 1:1000
Shape recorrido lahar	ESPE	SHP	Información proporcionada por Ph.D. Padilla Oswaldo, a escala 1:5000
Shape de edificabilidad actual	GAD Rumiñahui	SHP	Información proporcionada por el GAD de Rumiñahui
Shape de uso de suelo	GAD Rumiñahui	SHP	Información proporcionada por el GAD de Rumiñahui
Modelo Digital del Terreno	Elaboración propia	TIFF	Información procesada y obtenida por autor del trabajo
Modelo Digital de Superficie	Elaboración propia	TIFF	Información procesada y obtenida por autor del trabajo
Ortomosaico	Elaboración propia	TIFF	Información procesada y obtenida por autor del trabajo

Identificación, selección del software para modelar y obtención de Modelo de inundación

Figura 42.

Esquema de la metodología para la realización del Modelamiento en Hec-RAS



Para el desarrollo del modelo de inundación se investigó diferentes softwares para realizar modelamientos hidrológicos. En este caso se seleccionó el software HEC-RAS el cual es un programa que permite realizar modelamientos dinámicos unidimensionales.

Modelamiento en el software seleccionado

A continuación, se detalla el procedimiento a seguir en cada uno de los softwares utilizados:

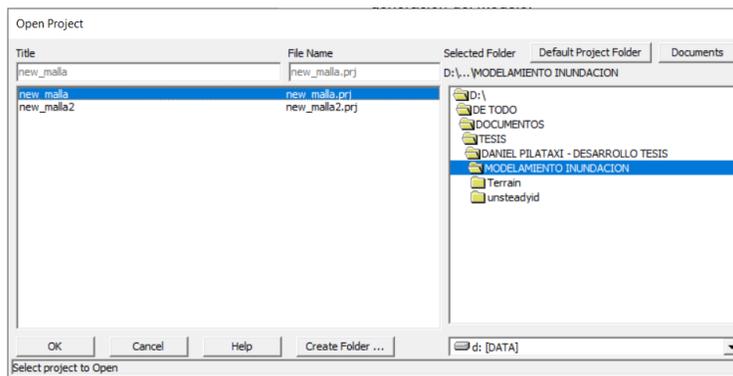
HEC-RAS

La versión que se utilizó fue la 5.0

Primero se creó un nuevo proyecto denominado “new_malla” (ver figura 43)

Figura 43.

Ventana de proyectos creados

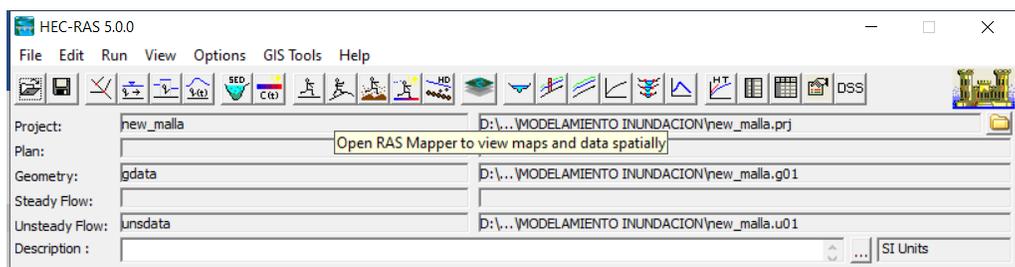


Una vez creado el proyecto se procede a ingresar los insumos con los que se va a trabajar.

Esto se lo hace desde el comando denominado “RAS Mapper” (ver figura 44)

Figura 44.

Comando RAS Mapper

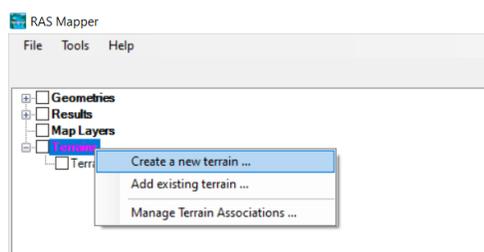


En esta ventana se ingresa como insumo el modelo digital de superficie (MDS), esto se hace de la siguiente manera:

Click derecho en la opción “terrain” y seguidamente en “create a new terrain” (ver figura 45)

Figura 45.

Opción para crear un nuevo terreno



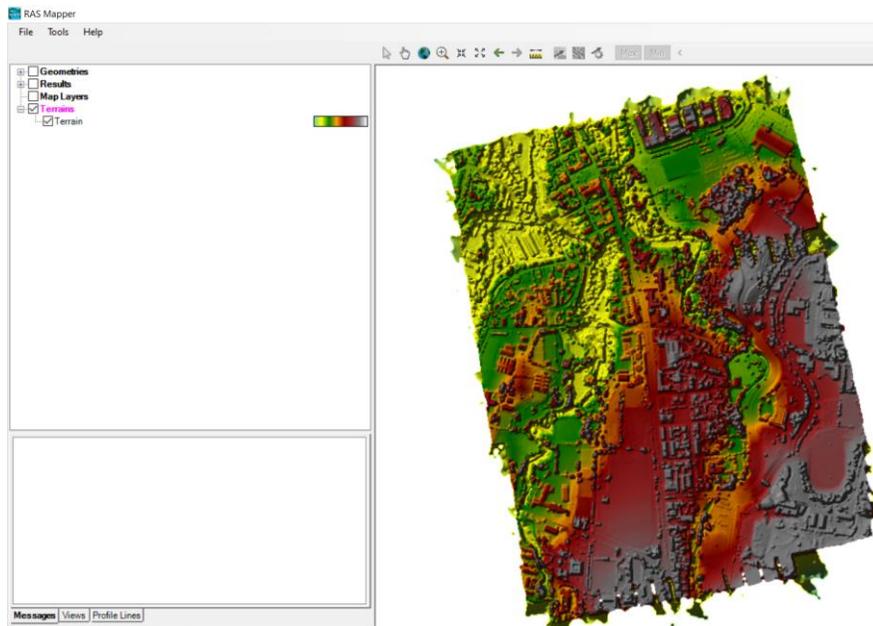
Nota: En la ventana que se abre se ingresa el modelo como se observa a continuación



Una vez ingresado el modelo, se observa de la siguiente manera (ver figura 46)

Figura 46.

Modelo Digital de Superficie en Hec-RAS

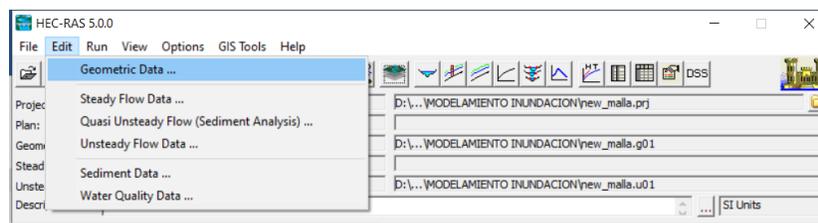


Luego se procedió a crear la geometría (área de inundación), esto se realizó de la siguiente manera:

Click en la pestaña “edit”, seguidamente en “Geometric Data” (ver figura 47)

Figura 47.

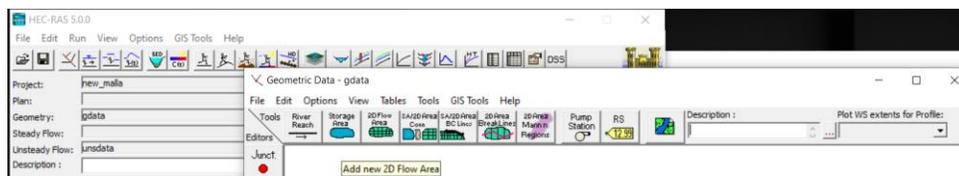
Herramienta Geometric Data



Click en la opción “2D Flow area” y se procede a digitalizar el área de inundación (ver figura 48)

Figura 48.

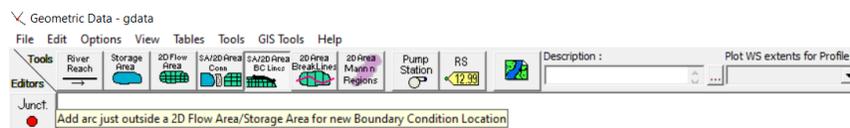
Herramienta para crear la malla



Luego desde la siguiente opción se procede a delimitar las zonas que corresponden a aguas arriba y aguas abajo (ver figura 49).

Figura 49.

Delimitación de aguas arriba y aguas abajo

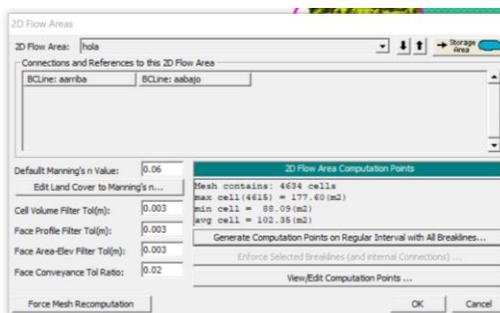


Con la información generada se procede a crear la malla de la siguiente manera:

Se establecen los parámetros de resolución y luego se crea la malla (ver figura 50).

Figura 50.

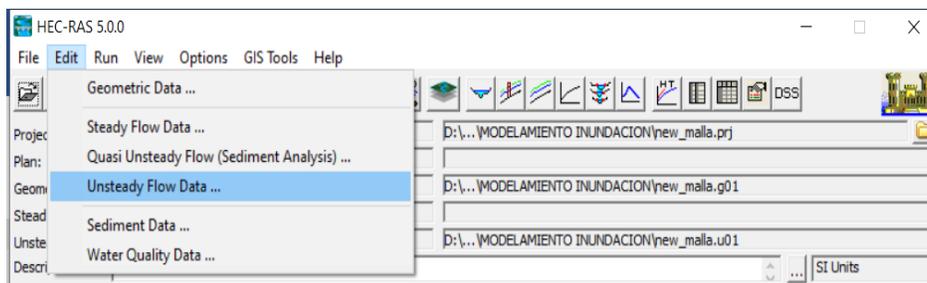
Parámetros para la creación de la malla



Finalmente se guarda la geometría, luego se procede a crear otra capa denominada “Unsteady Flow data” (ver figura 51)

Figura 51.

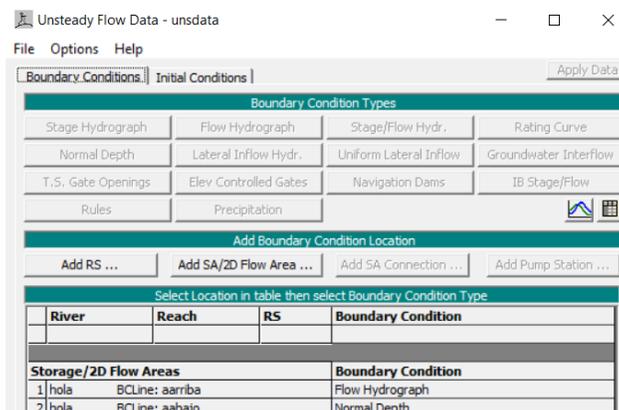
Creación de la capa “Unsteady Flow Data”



Nota: En esta opción se ingresan los parámetros de aguas arriba y aguas abajo, los parámetros de tiempo, flujo de inundación y la pendiente del terreno los cuales influirán en el modelamiento (ver figura 52).

Figura 52.

Parámetros para el modelo de inundación



Nota: Los datos para el modelamiento se tomaron de la siguiente tabla (ver Figura 53)

Figura 53.

Resumen de afectación de los lahares por el cauce del Río Santa Clara

ZONA	ÁREA	VOLUMEN (10 ⁶ m ³)	CAUDAL (10 ³ m ³ /s)		Coef. Manning	MÁXIMA ALTURA (m)		OBSERVACIÓN	AFECTACIÓN
			30%	40%		30%	40%		
<i>Píntag</i>	Barrio Carlos Gavilanes	44,1	14,7	19,6	0.09	20	25	-	Sumergido
<i>Píntag</i>	Club Los Chillos	44,1	14,7	19,6	0.09	22	25	-	Sumergido
<i>Píntag</i>	Selva Alegre	44,1	14,7	19,6	0.09	8	10	-	Inundado
<i>Píntag</i>	Colegio Juan de Salinas	44,1	14,7	19,6	0.09	14	17	-	Sumergido
<i>Píntag</i>	El Choclo	44,1	14,7	19,6	0.09	6	8	-	Inundado
<i>Sangolquí</i>	Emp. Eléctrica Quito	44,1	14,7	19,6	0.09	4	5	Los flujos tienen una extensión de 300 y 260 m a cada lado del río.	Inundado
<i>Sangolquí</i>	River Mall	44,1	14,7	19,6	0.09	3,24	3,60	Los flujos tienen una extensión de 300 m a cada lado del río.	Parcialmente Inundado
<i>Sangolquí</i>	Club de Oficiales	44,1	14,7	19,6	0.09	1,46	2	Los flujos tienen una extensión de 300 y 200 m.	Parcialmente Inundado
<i>Sangolquí</i>	ESPE	44,1	14,7	19,6	0.09	4	4	-	Parcialmente Inundado
<i>Sangolquí</i>	San Luis Shopping	44,1	14,7	19,6	0.09	2	4	-	Parcialmente Inundado
<i>Sangolquí</i>	San Rafael	44,1	14,7	19,6	0.09	5	6	Los flujos tienen una extensión de 300 y 86 m.	Inundado

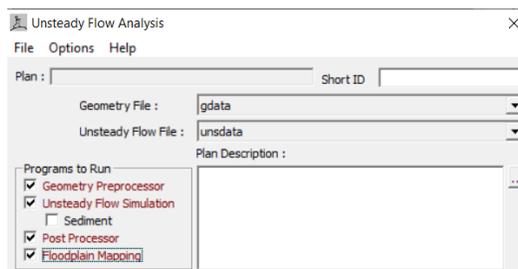
Nota. Resumen de afectación de los lahares por el cauce del Río Santa Clara. Tomado de *Simulación de lahares del volcán Cotopaxi en sus drenajes del lado norte con el uso del programa HEC-RAS*, por (Carrillo, 2013)

Finalmente se guarda la capa

Luego se crea una nueva capa denominada “Unsteady Flow Analysis”, la cual va a contener el modelo, en esta se ingresan las capas creadas previamente y se marcan los siguientes parámetros (ver figura 54).

Figura 54.

Creación de la capa Unsteady Flow Analysis



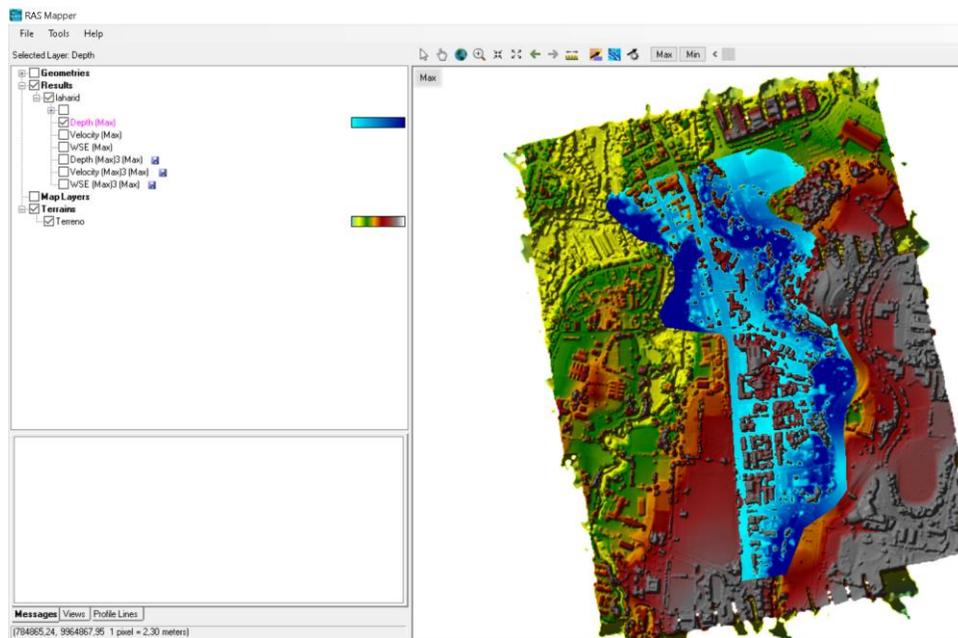
Nota. En esta capa se corre toda la información creada en las capas anteriores

Nuevamente se abre la ventana de RAS Mapper, en la cual se encuentran todas las capas creadas, así como también se podrá visualizar el resultado del modelamiento.

Finalmente se procede a correr el modelo de inundación (ver figura 55).

Figura 55.

Area de inundación



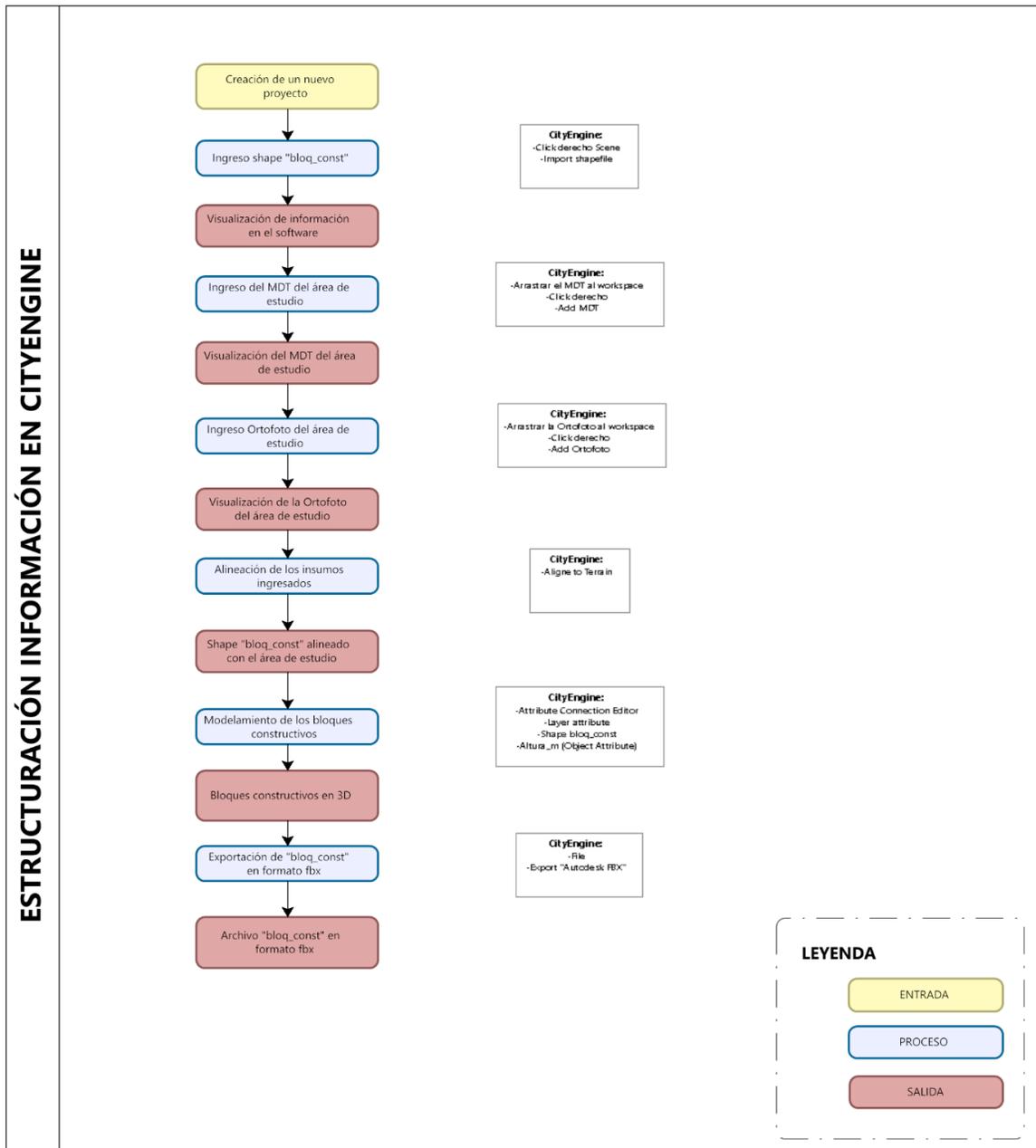
Nota. La profundidad de la inundación está expresada en metros.

Estructuración de la información

Para la realización del modelo en las diferentes plataformas y su posterior visualización en realidad virtual y aumentada se siguió el siguiente procedimiento (ver figura 56):

Figura 56.

Esquema de la metodología para la estructuración de información en CityEngine



Primero fue necesario investigar con que formatos de información trabajan las plataformas de Blender y Unity, a fin de poder escoger un software adecuado que permita estructurar la información y guardarla en un formato que sea compatible para el posterior procesamiento en estas plataformas.

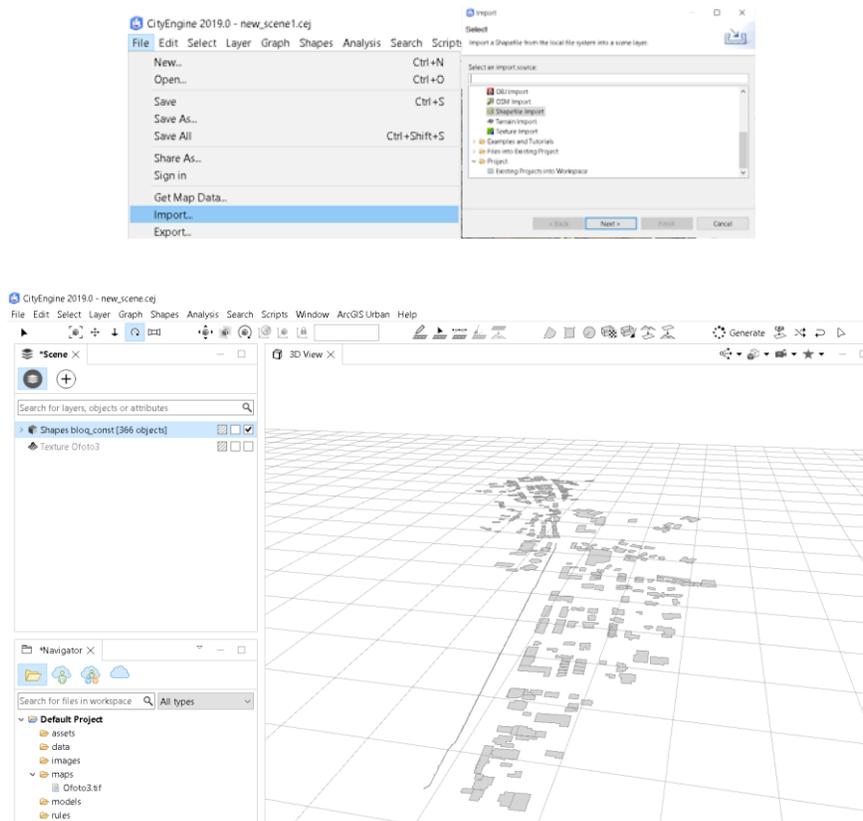
En este caso se escogió el software CityEngine para la estructuración de la información, debido a que permite exportar la información en formato .FBX, el cual es compatible con las plataformas mencionadas anteriormente y se siguió el siguiente procedimiento:

Estructuración de información en Cityengine

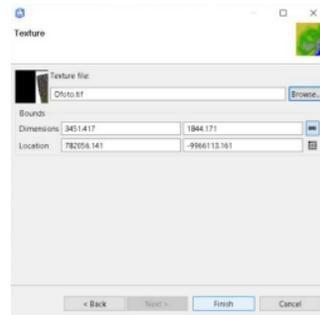
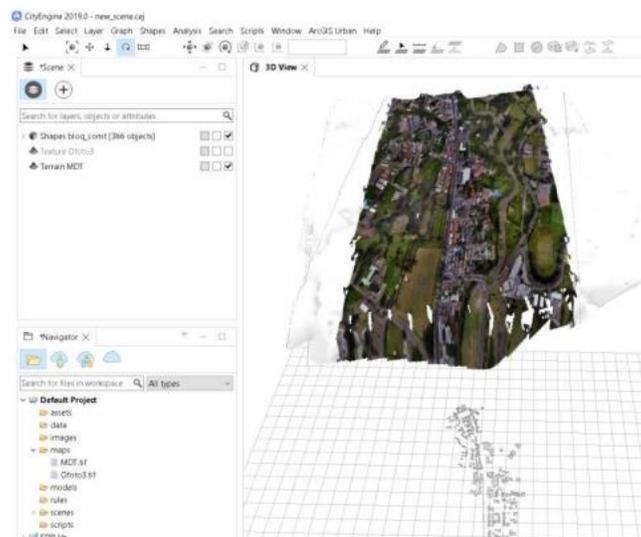
Dentro de este software se estructuró los insumos de los bloques constructivos, para lo cual primero se importó esta información en formato shape (ver figura 57).

Figura 57.

Importación de los bloques constructivos en formato shape



Luego se importó el modelo digital de terreno y la ortofoto (ver figura 58), esto se realizó para obtener el área de estudio con el relieve original del terreno (ver figura 59).

Figura 58.*Importación de la ortofoto***Figura 59.***Área de estudio con la forma real del terreno*

Seguidamente se alinearon los bloques constructivos con el terreno con la herramienta “Align Shapes” (ver figura 60).

Figura 60.*Herramienta para alinear los bloques constructivos con el terreno*

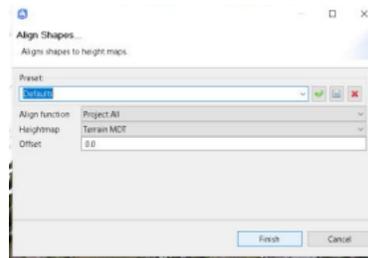
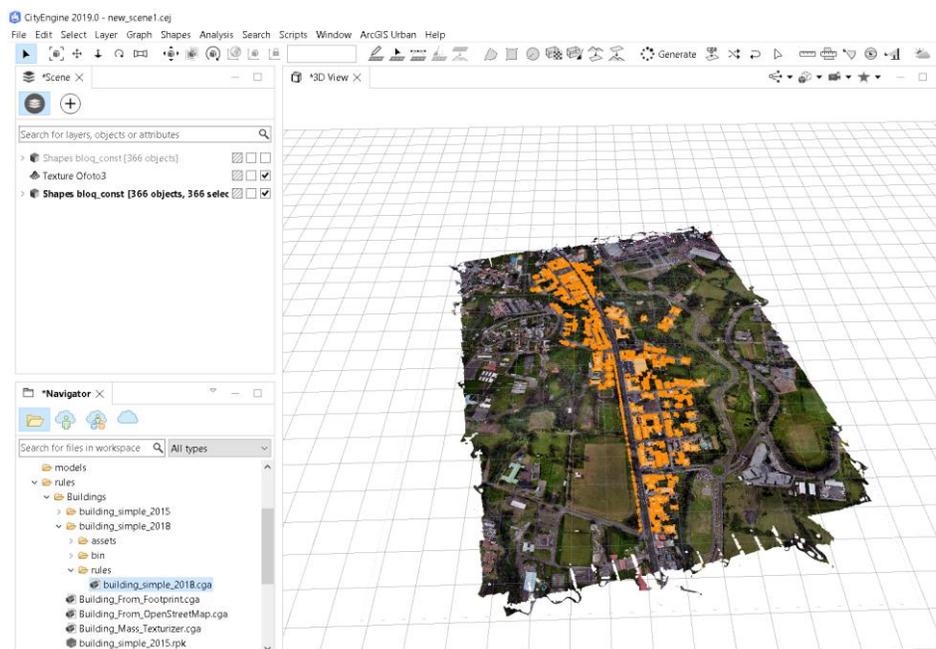


Figura 61.

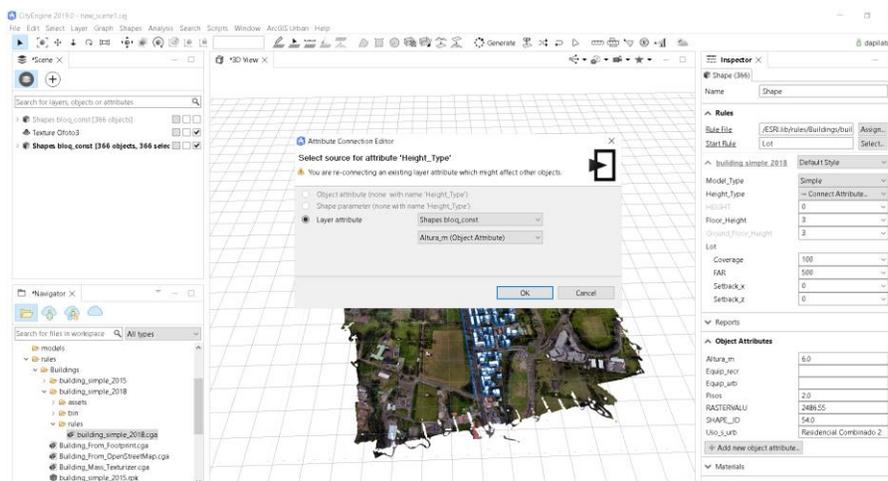
Bloques constructivos alineados con el terreno



Luego se procedió a generar los modelos en 3D de los bloques constructivos mediante la herramienta “building simple” (ver figura 62).

Figura 62.

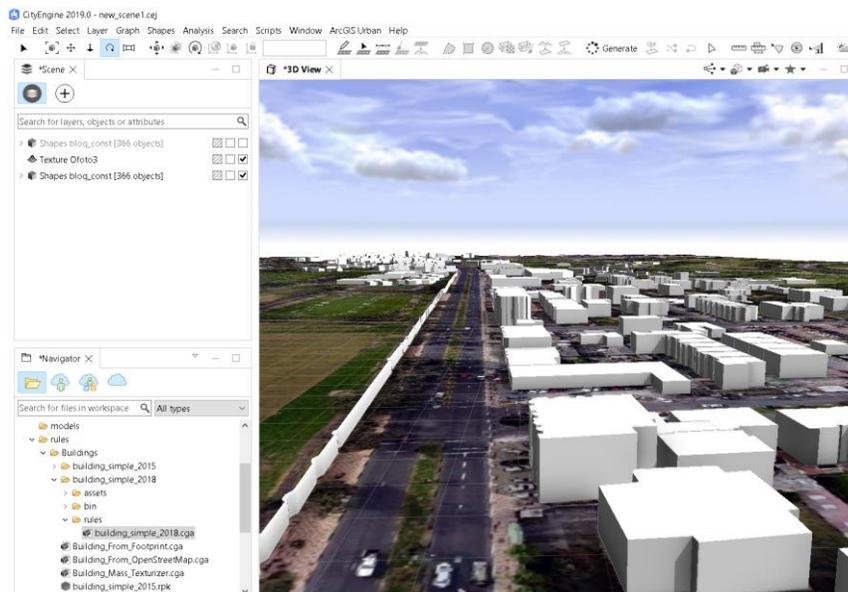
Herramienta “Building simple” para añadir el atributo de la altura



Para colocar la altura dentro de los atributos de los bloques constructivos, primero se revisó la ordenanza municipal del cantón Rumiñahui, en donde indicaba que la altura para edificaciones de un piso era de 3 metros y así sucesivamente según el número de pisos (GADMUR, 2018) (ver figura 63)

Figura 63.

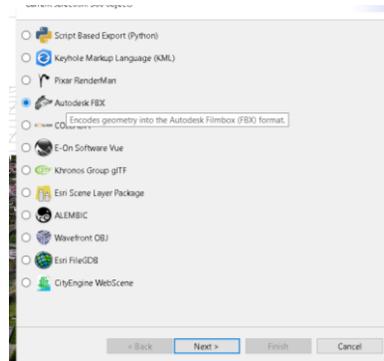
Bloques constructivos generados en 3D con la altura correspondiente



Finalmente se exportó la información en formato FBX para poder seguir trabajando en los siguientes softwares (ver figura 64).

Figura 64.

Exportación de los bloques constructivos en formato FBX



Modelamiento en la plataforma Blender

Figura 65.

Esquema de la metodología para la elaboración del Modelamiento en la plataforma Blender

MODELAMIENTO EN BLENDER



Blender:
 -GIS
 -Import
 - Georeferenced raster (MDT)

Blender:
 -Edit Mode
 -Extraction

Blender:
 -GIS
 -Import
 - Georeferenced raster (Ortofoto)

Blender:
 -GIS
 -Mode: Basemap on new plane

Blender:
 -Edit Mode
 -Delete vertices

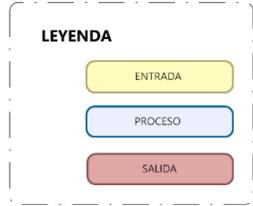
Blender:
 -GIS
 -Import
 -Shapfile (.shp)

Blender:
 -Tools
 -Material
 -Surface

Blender:
 -File
 -Import FBX "bloq_const"

Blender:
 -Edit Mode
 -Modelamiento

Blender:
 -File
 -Export FBX



Blender

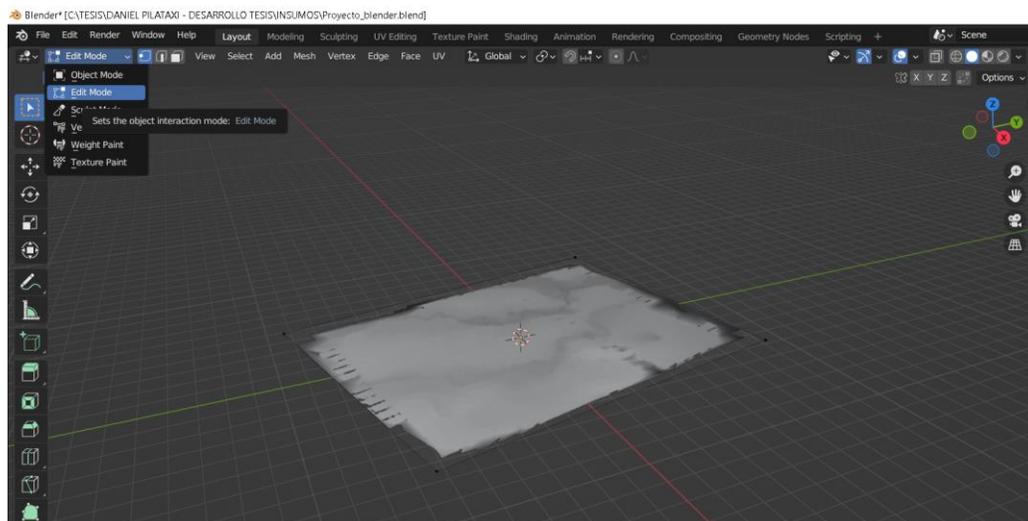
Se utilizó la versión 3.5

El presente software se utilizó para recrear en 3D el modelo de inundación que se generó inicialmente en el software Hec-RAS, para lo cual se realizó el siguiente procedimiento:

Primero se importó el modelo digital del terreno (MDT).

Figura 66.

Importación del modelo digital de terreno



Seguidamente se realizó una extrucción desde la opción “Edit Mode” (ver figura 67)

Figura 67.

Modo de edición para extruir el modelo

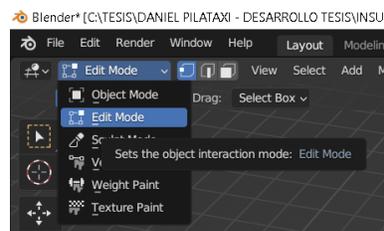
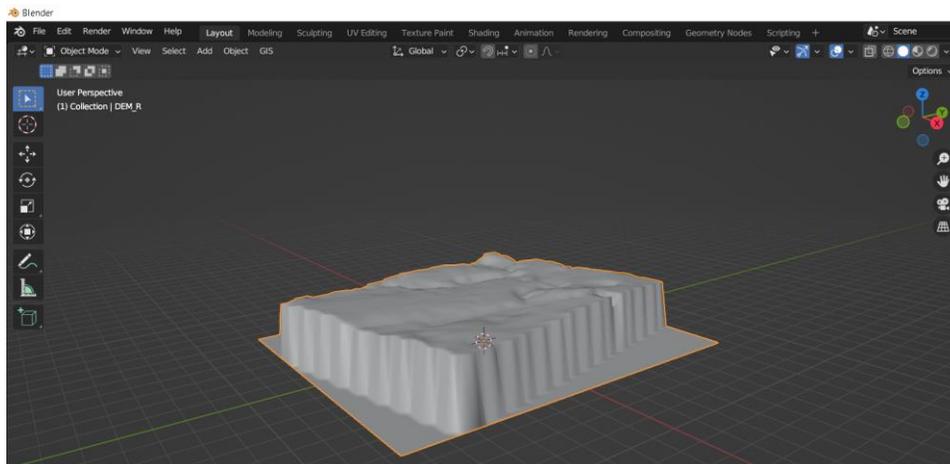


Figura 68.

Modelo digital del terreno extruido



Luego se importó la ortofoto sobre el modelo digital del terreno (ver figura 70).

Figura 69.

Proceso para importar la ortofoto

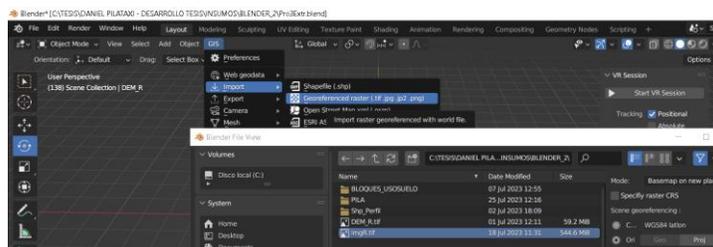
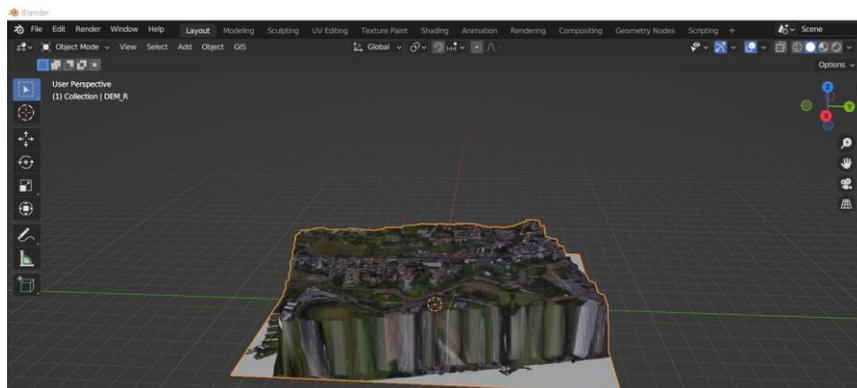


Figura 70.

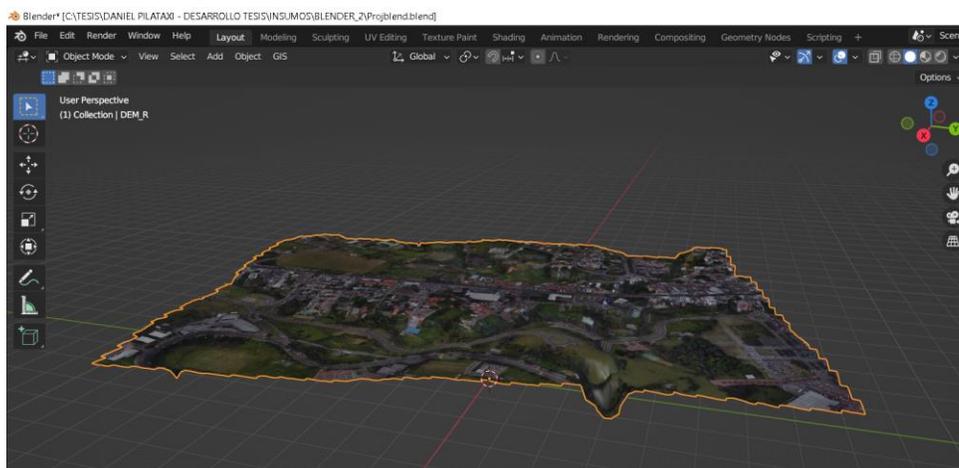
Ortofoto importada sobre el modelo digital del terreno



Posteriormente se editó eliminando los vértices que se generaron por defecto (ver figura 71)

Figura 71.

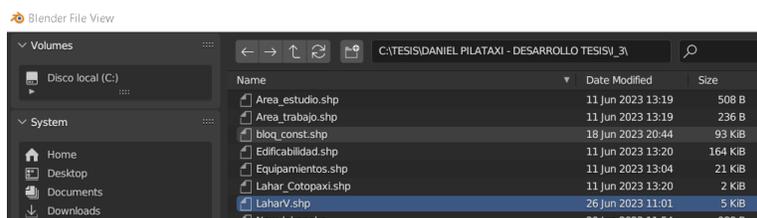
Modelo Digital del Terreno del área de estudio



Luego se importó la capa del lahar en formato shape (ver figura 72)

Figura 72.

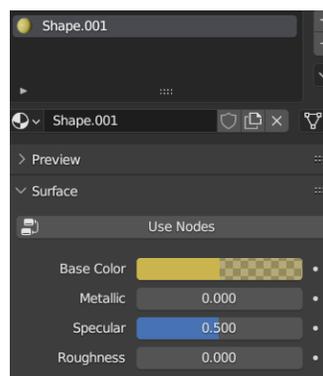
Proceso para importar la capa del lahar



Se le aplicó un material para que tenga una mejor visualización el modelo (ver figura 73).

Figura 73.

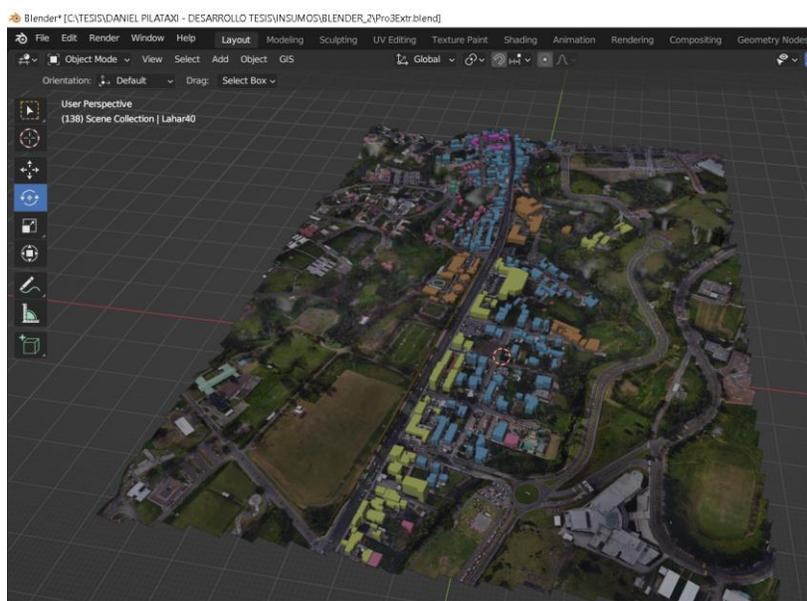
Aplicación de color y textura a la capa del lahar



Se importaron los bloques constructivos (ver figura 74).

Figura 74.

Bloques constructivos en 3D y estructurados por su uso principal de suelo

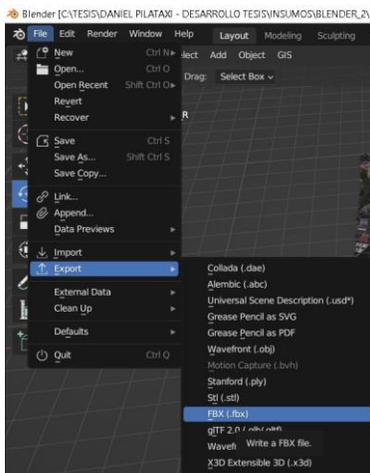


Luego se realizó el modelo ajustandose a las características de tiempo y zonas de recorrido de lahar en base a las diferentes edificaciones existentes en el área de estudio.

Finalmente se exportó el modelo en formato fbx (ver figura 75).

Figura 75.

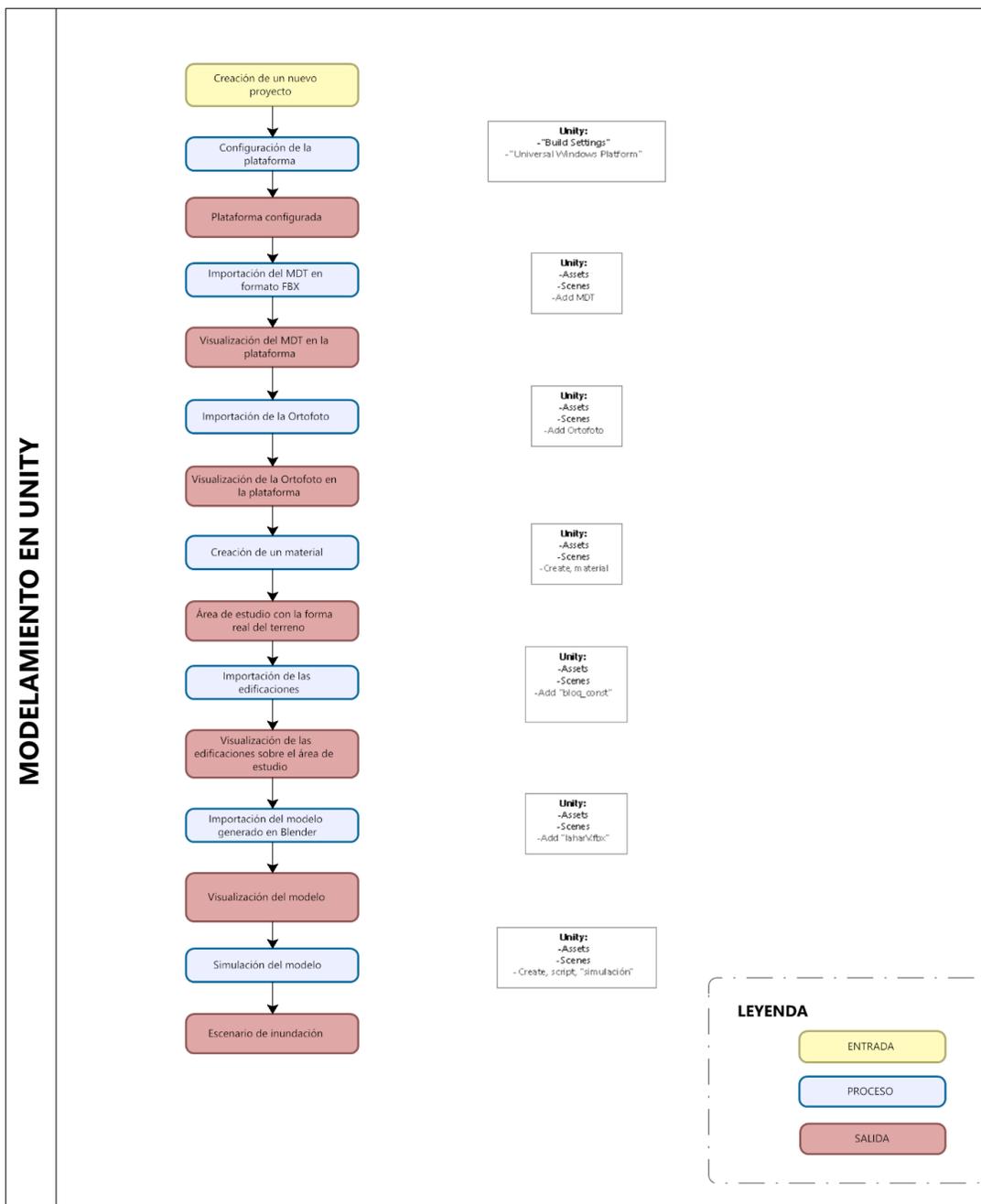
Exportación del modelo en formato FBX



Modelamiento en la plataforma Unity

Figura 76.

Esquema de la metodología para la elaboración del Modelamiento en Unity



Unity

Este software permitió estructurar y representar el modelo de recorrido de lahar gracias a las herramientas que posee, una de ellas es trabajar con Visual Studio 2019 el cual es

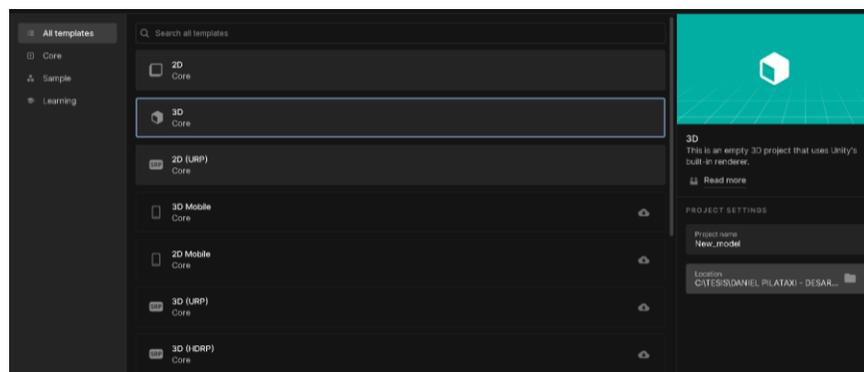
compatible con lenguajes de programación, en este caso C#, además es compatible con múltiples plataformas las cuales permitieron representar el modelo en realidad aumentada.

La versión del software con la que se trabajó fue la 2021.3.3

Primero se creó un proyecto (ver figura 77).

Figura 77.

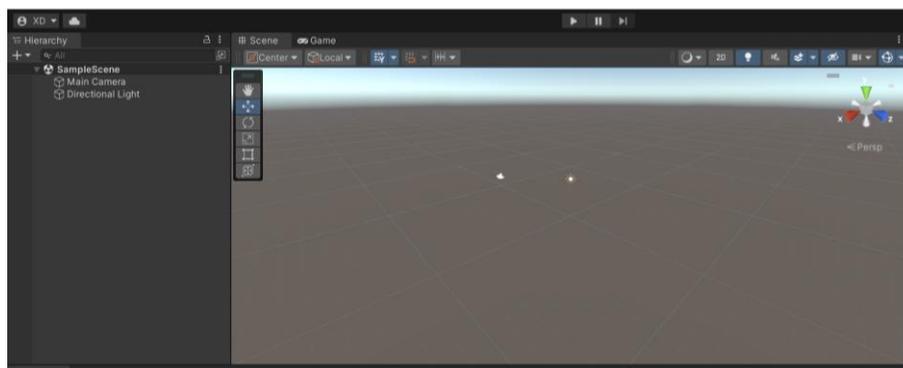
Creación del Proyecto



Seguidamente se abrió el proyecto y a primera vista se observa la interfaz del proyecto (ver figura 78).

Figura 78.

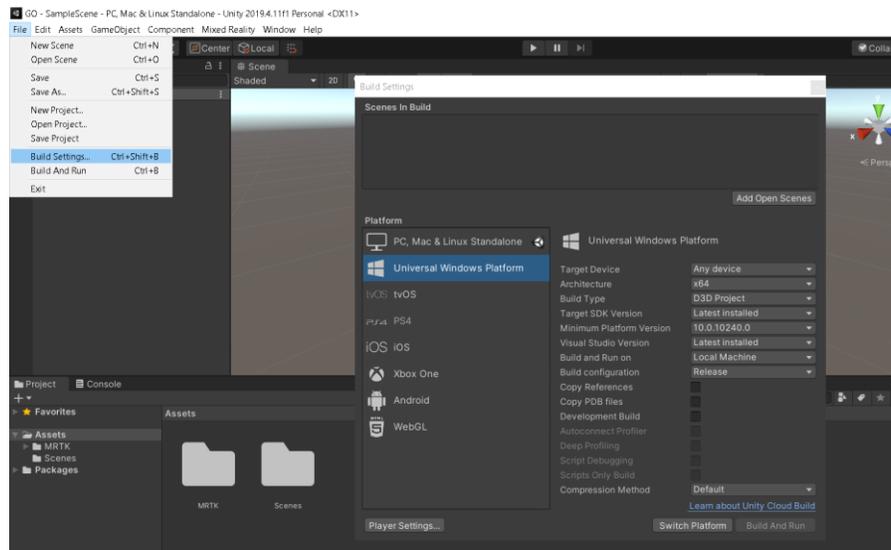
Escena Principal de trabajo



Luego desde la herramienta “Build Settings” se debe configurar plataforma en la que se va a trabajar antes de empezar a realizar el proyecto (ver figura 79).

Figura 79.

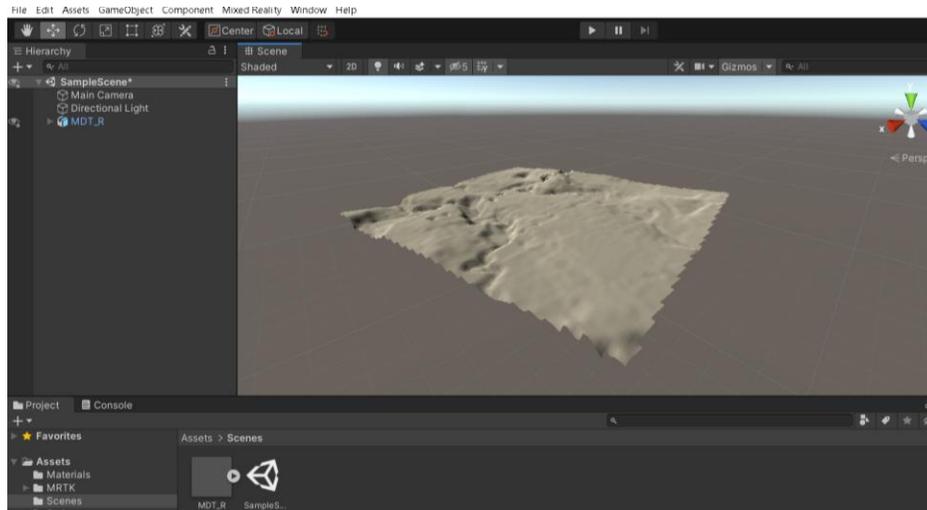
Configuración de la plataforma de trabajo



Una vez configurada la plataforma se procede a importar los insumos, en este caso primero se cargó el modelo digital de terreno (MDT) (ver figura 80)

Figura 80.

Modelo Digital del Terreno importado en formato FBX



Luego se importó la ortofoto, a la cual se le creó un material que sirvió para colocar en el modelo digital del terreno (ver figura 82)

Figura 81.

Creación del material para el Modelo Digital del Terreno

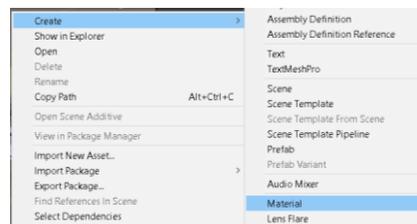


Figura 82.

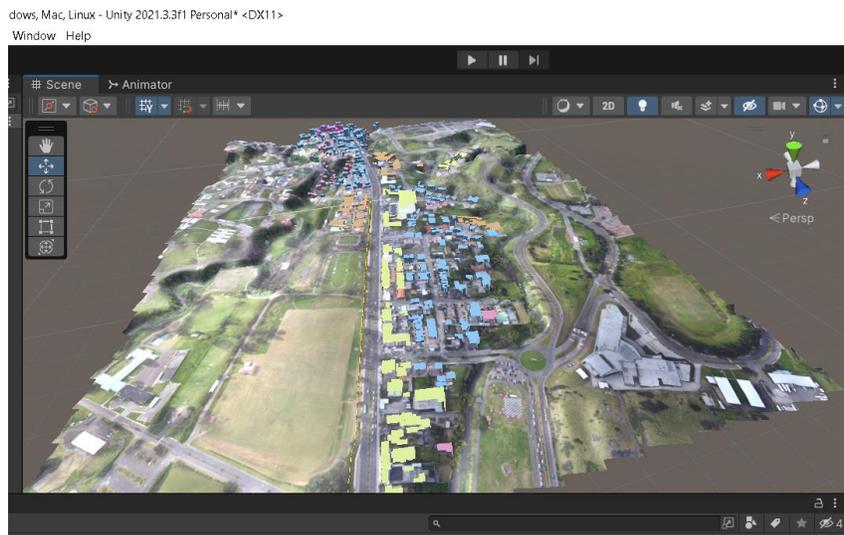
Modelo Digital del Terreno con el material creado



Posterior a ello se importó los bloques constructivos (ver figura 83).

Figura 83.

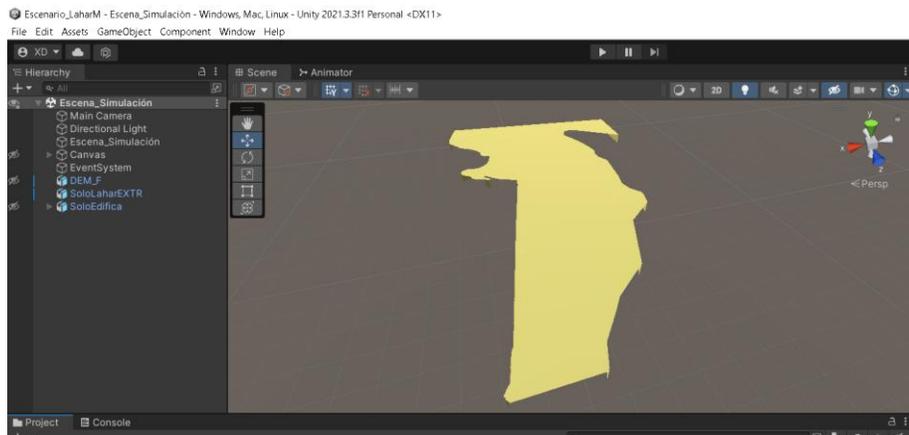
Importación de los bloques constructivos



Luego se importó el modelo de inundación generado en Blender (ver figura 84)

Figura 84.

Importación del modelo de lahar en formato FBX



Posterior a ello se realizó la simulación del modelo importado, para lo cual se creó un script el cual genere la animación (ver figura 85).

Figura 85.

Creación del script para la simulación del escenario

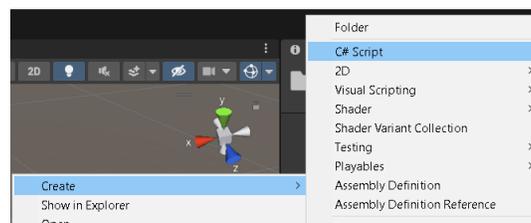
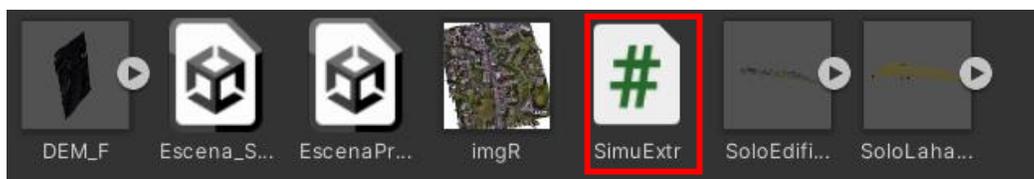


Figura 86.

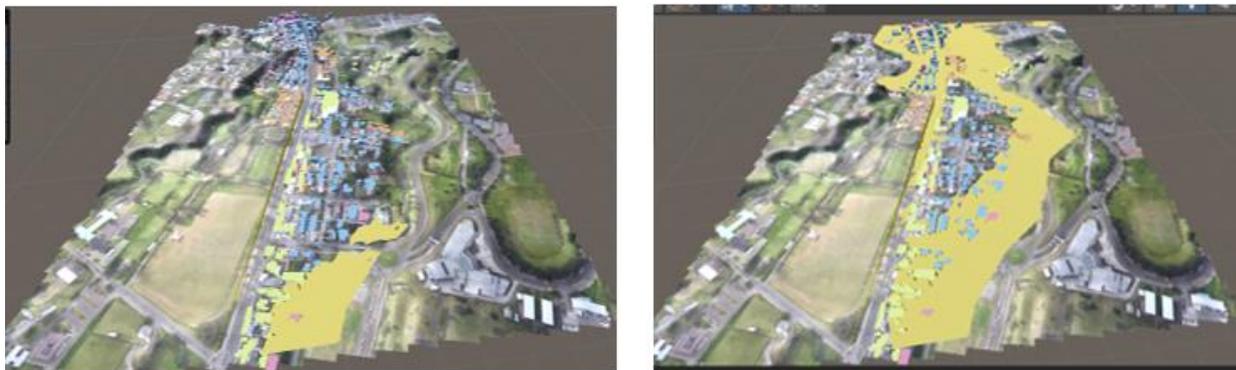
Script de simulación creada



Nota: El script permitió recrear la animación del modelo de recorrido de lahar (ver figura 87)

Figura 87.

Escenario generado



Nota: Se muestra el escenario en diferentes tiempos

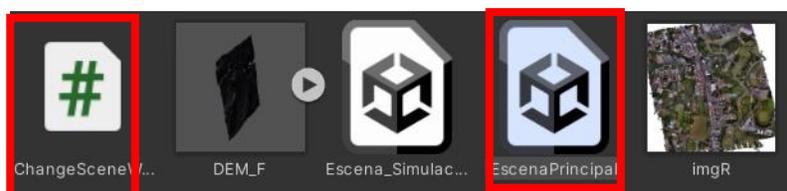
Creación de escenas

Para la creación de las escenas se siguió el siguiente procedimiento:

Primero se creó un “Game Object” a la cual se la denominó “EscenaPrincipal” y un script (ver figura 88).

Figura 88.

Creación del Game Object y el script de cambio de escena

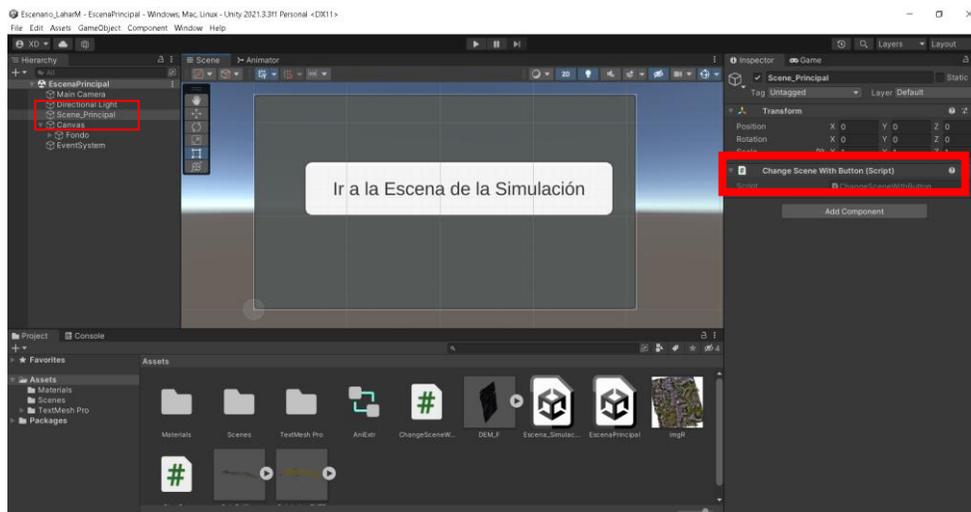


Nota: El script se creó para darle una función al Game Object

Luego se le asignó el script creado a la escena (ver figura 89)

Figura 89.

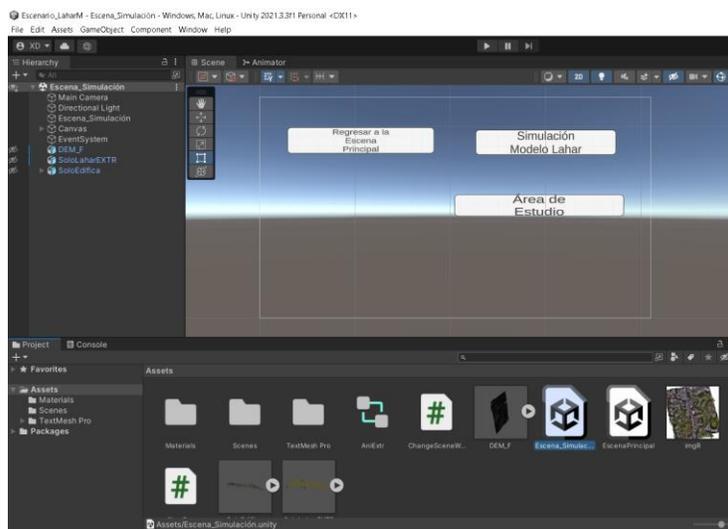
Asignación del script a la escena



Seguidamente se creó otra escena con el nombre de “Escena_Simulación”, en esta se crearon los botones para cada uno de los insumos que se importaron (ver figura 90).

Figura 90.

Escena de Simulación con los botones para activar los diferentes productos

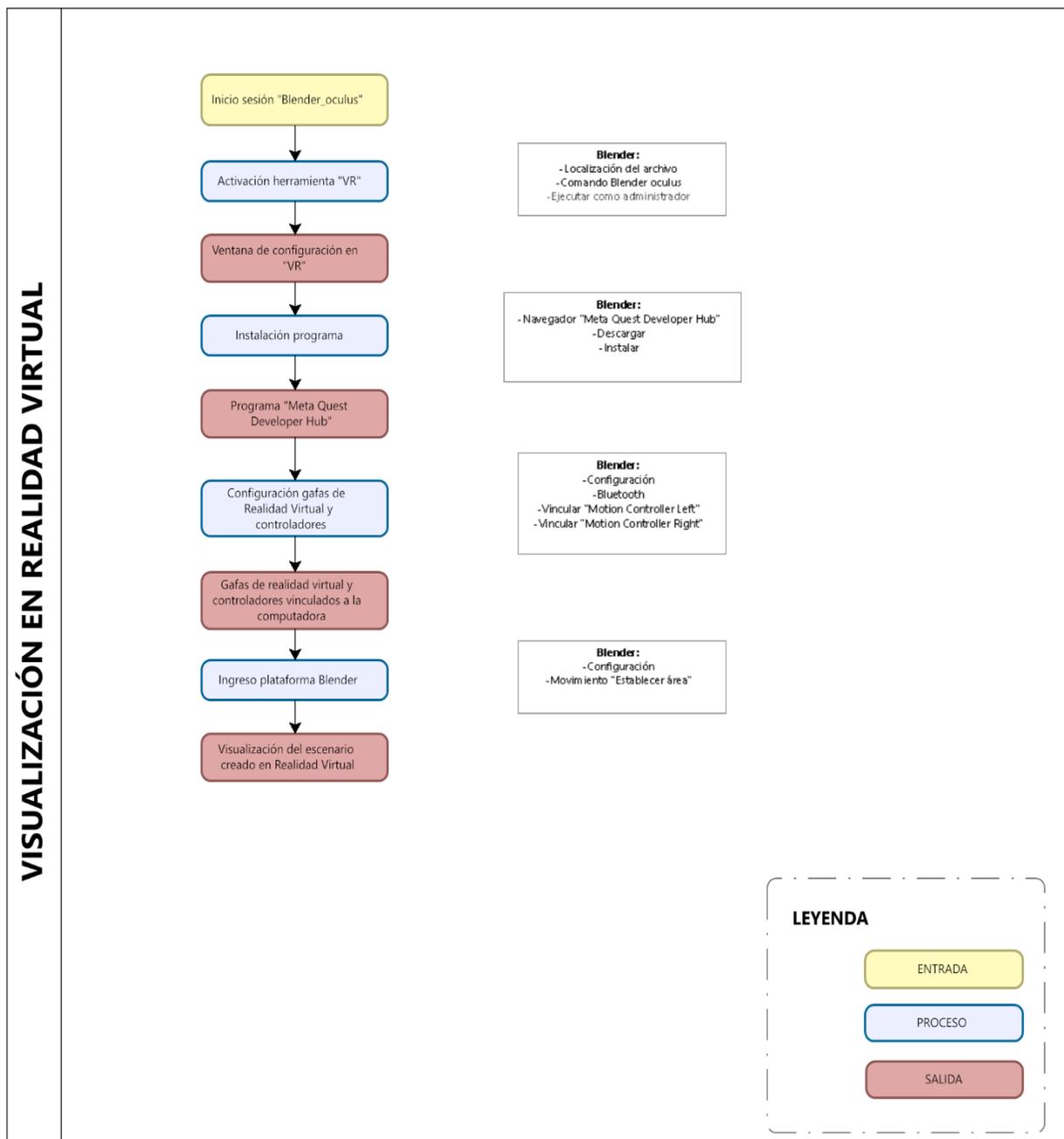


Nota: Para la visualización en realidad aumentada se crearon escenas y botones que permitan la visualización de las mismas.

Visualización en Realidad Virtual

Figura 91.

Esquema de la metodología para la visualización del Modelo en Realidad Virtual



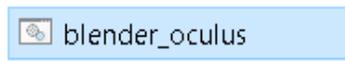
Realidad Virtual

Para la visualización en realidad virtual del modelo actual de inundación, se realizó en la plataforma de Blender de la siguiente manera:

Primero se inició sesión ejecutando el comando “blender_oculus” (ver figura 92)

Figura 92.

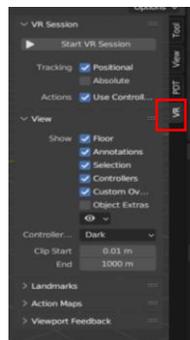
Ejecución del comando Blender_oculus



Luego se activa la herramienta de realidad virtual en la plataforma (ver figura 93).

Figura 93.

Herramienta de realidad virtual



Nota. En esta opción se hizo la configuración previa a la visualización en realidad aumentada

Luego se instaló el programa requerido para la utilización de las gafas de realidad virtual y los controladores (ver figura 94).

Figura 94.

Programa utilizado para la visualización en realidad virtual



Nota. Este software es compatible las gafas de realidad virtual y la plataforma utilizada

Luego se procedió a utilizar las gafas de realidad virtual para realizar la respectiva configuración con el programa y la computadora.

Las gafas de realidad virtual que se utilizaron fueron de la marca “Acer” (ver figura 95)

Figura 95.

Gafas de realidad virtual



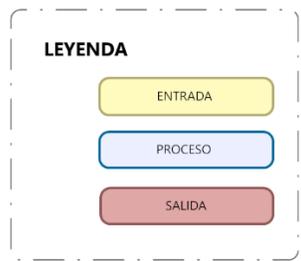
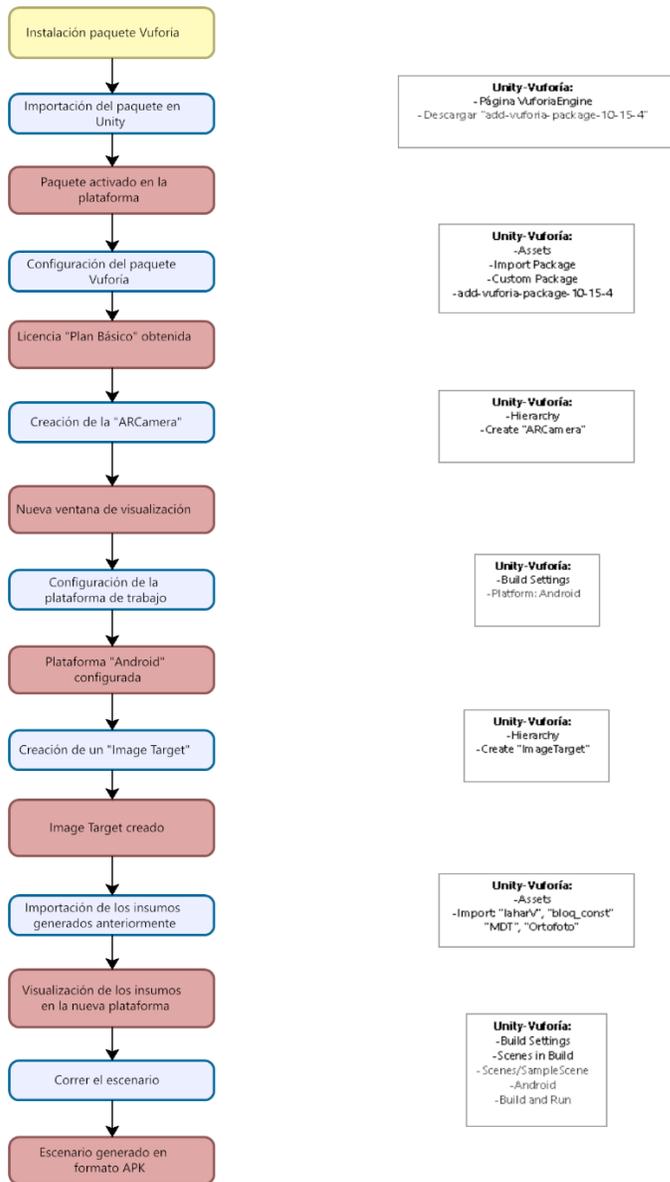
Una vez realizado las configuraciones necesarias se procedió a la visualización en realidad virtual del modelo generado en Blender.

Visualización en Realidad Aumentada

Figura 96.

Esquema de la metodología para la visualización del Modelo en Realidad Aumentada

VISUALIZACIÓN EN REALIDAD AUMENTADA



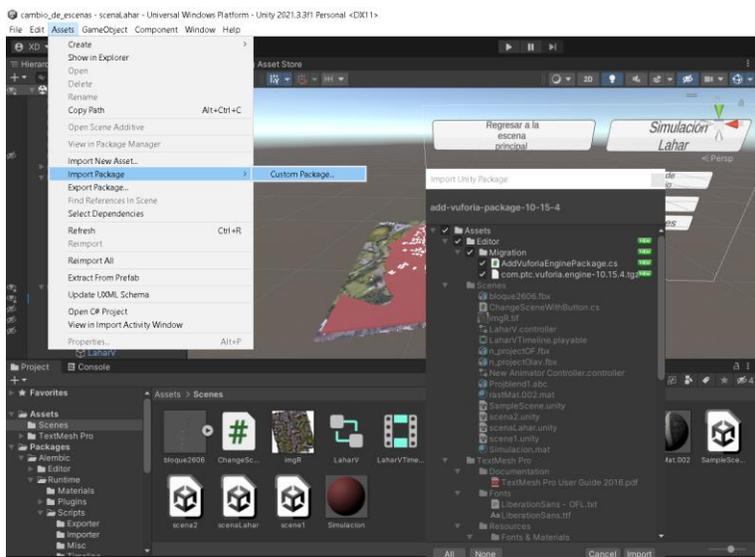
Realidad Aumentada (Vuforia)

Para la visualización en realidad aumentada se realizó en siguiente procedimiento:

Primero se instaló el paquete de Vuforia y seguidamente se importó en la plataforma de Unity (ver figura 97).

Figura 97.

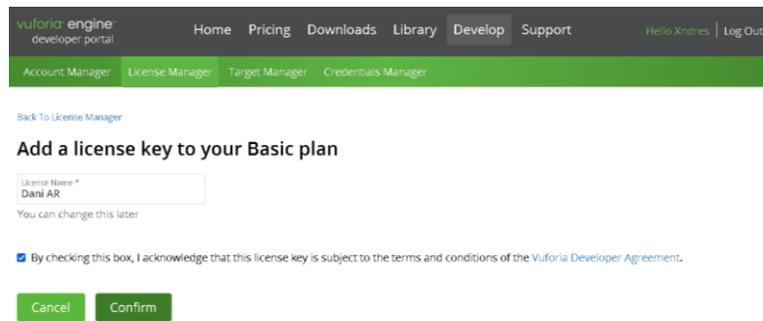
Configuración del paquete de Vuforia



Luego se adquirió una licencia de “plan básico” la misma que se utilizó para configurar la plataforma en la que se trabajó (ver figura 98).

Figura 98.

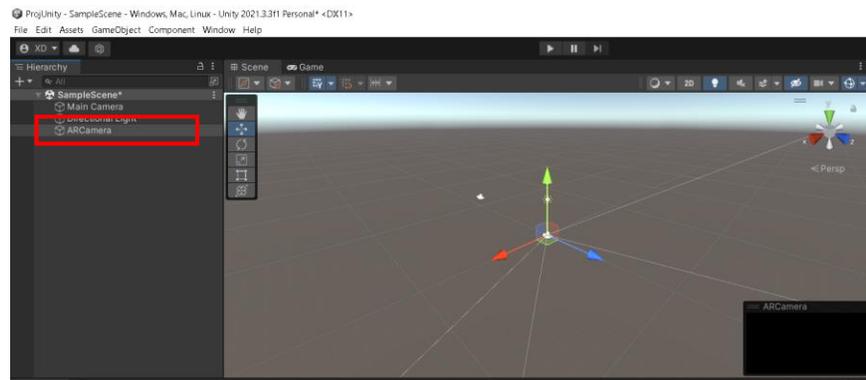
Creación de la licencia en la página de Vuforia engine



Luego se configuró la “ARCamera” desde la opción de VuforiaEngine (ver figura 99).

Figura 99.

Creación de la AR Camera

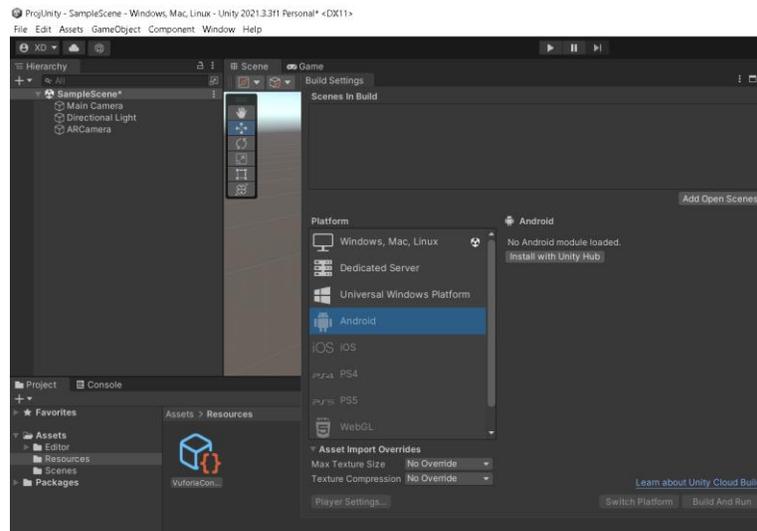


Nota. Todo lo que se coloque o realice se verá a través de esta cámara.

Luego desde el inspector se añadió la licencia que se creó previamente en la página de Vuforia Engine y seguidamente se seleccionó y se configuró la plataforma en la que se trabajó, en este caso se escogió la plataforma de Android (ver figura 100).

Figura 100.

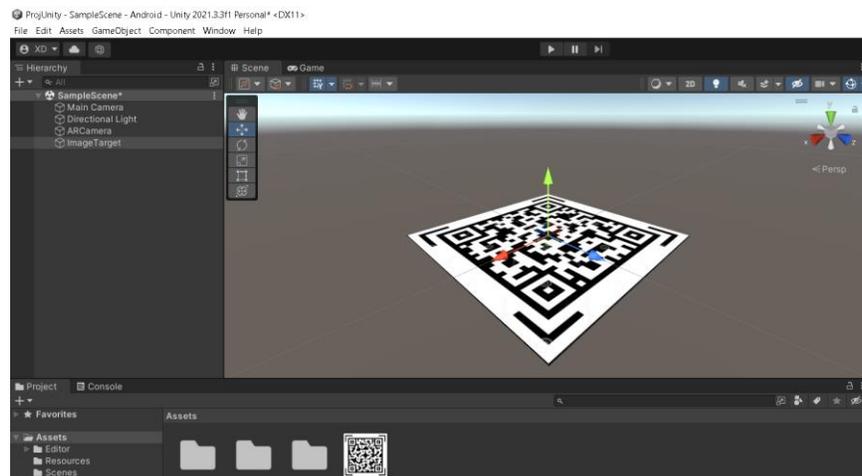
Configuración de la plataforma de trabajo



Ya configurada la plataforma, se procedió a crear un “Image Target” (ver figura 101).

Figura 101.

Creación de Image Target

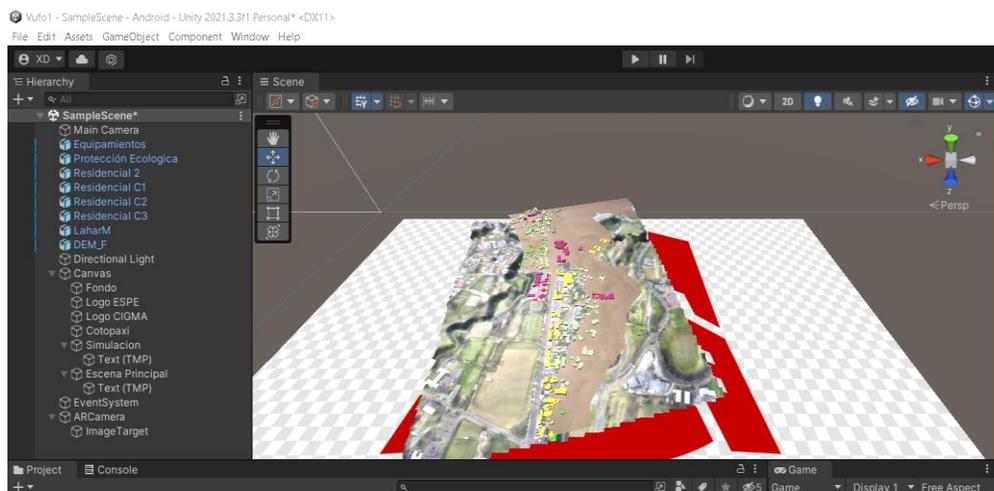


Nota. Se puede seleccionar cualquier imagen en la que se desee proyectar el resultado final.

Luego se importó todos los insumos creados previamente (ver figura 102)

Figura 102.

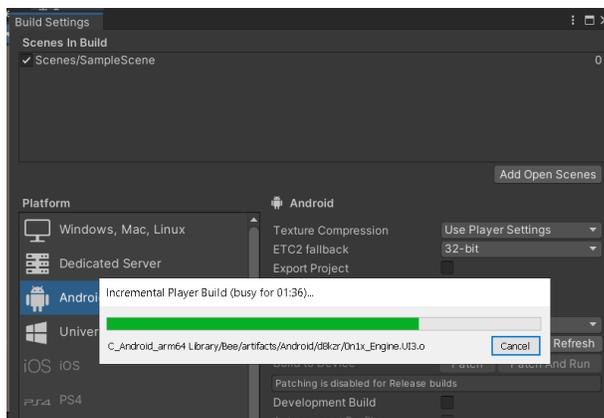
Insumos importados sobre el Image Target



Luego desde “Build Settings” se corre el escenario generado en la plataforma seleccionada (ver figura 103).

Figura 103.

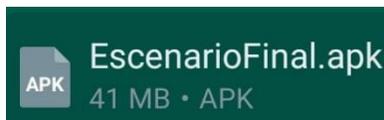
Generación del escenario en la plataforma de Android



Nota. Al finalizar el proceso se crea un archivo en formato apk el cual contiene el escenario generado (ver figura 104).

Figura 104.

Archivo del escenario en APK



Análisis de la amenaza

Para el análisis de la amenaza y sus componentes se siguió el siguiente procedimiento:

Area de Influencia

El área de influencia se determinó en función del modelo de inundación generado en el software Hec-RAS (ver figura 123).

Intensidad de la Amenaza

La intensidad de la amenaza se determinó en función del nivel de inundación (ver tabla 2), esta información se tomó del modelo de inundación generado en el software Hec-RAS.

Tabla 2

Nivel de Inundación

Intensidad de la amenaza	Nivel de inundación (m)
Alta	$> 3 \text{ y } \leq 6$
Media	$> 1 \text{ y } \leq 3$
Baja	≤ 1

Tiempo de duración

El tiempo de duración del evento se lo puede apreciar de mejor manera visualizándolo en las diferentes plataformas utilizadas (Blender y Unity), tanto en realidad virtual como en realidad aumentada.

Valoración Económica de los bienes inmuebles afectados

Como parte del análisis de la amenaza se realizó una valoración económica de los bienes inmuebles que se encuentran dentro del área de influencia, a fin de tener información que permita conocer cuál sería la pérdida económica en esta zona ante este evento natural, de tal manera que se sirva de apoyo para implementar medidas de mitigación a fin de reducir su pérdida, para lo cual se realizó el siguiente procedimiento:

Para realizar el avalúo de un bien inmueble dentro de una zona urbana, es necesario buscar mecanismos que ayuden a reducir costos y tiempo, también es importante conocer la base legal del GAD en donde se está trabajando debido a que cada municipalidad mediante una ordenanza establece diferentes parámetros para realizar el avalúo de un predio, por tal motivo, previo a la realización del trabajo se revisó (GADMUR, 2018) (GADMUR, 2022) a fin de aplicar lo estipulado en esta.

Según (COOTAD, 2019) en su Art.495 menciona que, para establecer el valor de una propiedad, es necesario conocer el precio unitario del suelo, en este caso suelo urbano, factores de aumento o reducción del valor y el área del terreno (ver figura 105).

Figura 105.

Fórmula para el avalúo de la propiedad

$$\text{Avalúo de la propiedad} = \left(\text{Valor unitario de la tierra} \right) \times \left(\text{Factores de aumento o reducción del valor} \right) \times \left(\text{Área del terreno} \right)$$

Primero se determinó zonas homogéneas en el área de estudio (ver figura 106) y dentro de cada una se seleccionó un lote tipo que siga un patrón en función de sus características de forma y tamaño (ver tabla 3), esta información se utilizó como referencia para realizar los cálculos del avalúo de la propiedad.

Figura 106.

Zonas homogéneas

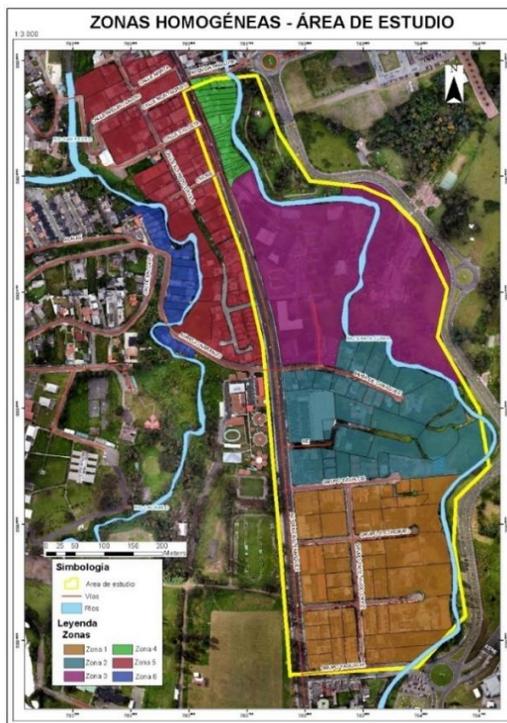


Tabla 3

Dimensiones de los lotes tipo de cada zona

Zona	Lote Tipo		
	Frente tipo (m)	Fondo tipo (m)	Área tipo (m ²)
1	21,89	51,61	1129,64
2	29,67	31,60	937,59
3	317,92	145,51	46261 ,24
4	10,77	27,87	300,17
5	19,18	44,20	847,84
6	13,11	49,80	652,87

Se planificó en gabinete los sitios a visitar y el tipo de información a levantar, este procedimiento se llevó a cabo de la siguiente manera: se visitó ciertos predios establecidos que cumplieran con características geométricas de lote tipo (ver figura 107).

Figura 107.

Lote tipo de la zona 1



Luego se recopiló información (área de construcción, tipo de acabados, adicionales constructivos, precio de venta) (ver figura 111).

Figura 108.

Visita de campo lote de la zona 1



El levantamiento de información en campo se hizo en función de los parámetros establecidos en la normativa (ver figura 109) (ver figura 110), los cuales sirvieron para realizar los cálculos respectivos del avalúo de la propiedad.

Figura 109.

Factor estado de conservación y mantenimiento

ESTADO	FACTOR DE CONSERVACIÓN
OBSOLETO	0,15
MALO	0.30
REGULAR	0.60
BUENO	0.80
MUY BUENO	1.00

Fuente: (GADMUR, 2022)

Figura 110.

Factor de uso de la unidad arquitectónica

USO DE LA UNIDAD ARQUITECTÓNICA	FACTOR TOTAL DE MAYORACIÓN
Residencial	1,00
Gestión municipal y provincial	1,05
Centros educativos (mayor a 2 piso)	1,15
Cuerpo de bomberos, policías y similares	1,20
Complejos recreativos	1,20
Distribuidoras de vehículos	1,20
Fuerte militar	1,20
Centros comerciales	1,25
Centros de salud (hospitales)	1,25
Hoteles y Hosterías	1,25
Gasolineras	1,25
Bancos	1,30
Instalaciones Industriales	1,30

Fuente: (GADMUR, 2022)

Figura 111.

Tabla de Información recopilada en campo

VALORACIÓN DE LA PROPIEDAD							
Bloques	Estado	Acabados	Condición de la propiedad	Costo Unitario (\$)	Area m2	Factor	N° Pisos
Adicionales Constructivos							

Para calcular el avalúo de la propiedad se utilizó información (cálculos del lote tipo, factor frente, factor fondo, factor proporción) (ver figura 112), este procedimiento se realizó para todos los lotes.

Figura 112.

Cálculos del Lote Tipo

Factor Frente (Ff)		
Frente Tipo (Ft)		(m)
Valor Maximo (2*Frente Tipo)		(m)
Valor Minimo (Frente Tipo / 2)		(m)
Factor Maximo		
Factor Minimo		
Factor Fondo (Ffo)		
Fondo Tipo (Ffo)		(m)
Valor Maximo (2*Fondo Tipo)		(m)
Valor Minimo (Fondo Tipo / 2)		(m)
Factor Minimo		
Factor Maximo		
Factor Tamaño (Fta)		
Area Tipo (Ffo)		(m)
Valor Maximo (2*Area Tipo)		(m)
Valor Minimo (Area Tipo / 2)		(m)
Factor Minimo		
Factor Maximo		
Factor Proporción		
Proporción Tipo	1	

También se utilizó información adicional (factor proporción, pendiente, costo unitario, edad de vida útil, vida útil, métodos de depreciación) (ver figura 113), que permita realizar un avalúo de cada uno de los predios cercanos de la zona con características similares, a fin de poder realizar una valoración económica aproximada de las pérdidas que puedan darse en caso de una eventual erupción.

Figura 113.

Información adicional y métodos para el avalúo de una propiedad

Factor Fondo (Ffo)		Factor Proporción (Fpr)			Factor Frente Corregido (Ffec)	Factor Fondo Corregido(Ffo)
Calculado	Corregido		Criterio			

Factor Varios Frente (FVf)	Pendiente	Factor Topografía	Factor Homogeneizad	Costo Unitario (\$)	Avalúo de la propiedad (\$)

Edad de vida útil	Edad de la Construcción

LINEAL			CUADRÁTICA			MIXTA		
Depreciación	Valor depreciado	Avalúo Construcción	Depreciación	Valor depreciado	Avalúo Construcción	Depreciación mixta	Valor depreciado	Avalúo Construcción

ROSS Y HEIDECKE				FITTO Y CORVINI			
Depreciación mixta	DRH	Valor depreciado	Avalúo Construcción	X	Y%	Valor depreciado	Avalúo Construcción

Según (GADMUR, 2022), para calcular el avalúo total de la propiedad, se debe considerar el factor de inflación anual de 1,0184 para el bienio 2021-2023 (ver figura 114).

Figura 114.

Factor de inflación

Inflación Acumulada (3,5 años):	1,0184
--	--------

Luego de realizar el avalúo de cada bien inmueble del área de estudio, se clasificó cada zona en función de su valor total avaluado (ver figura 131).

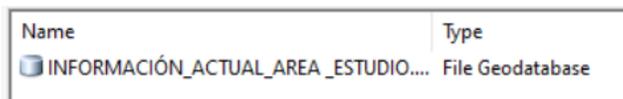
Realización de una Geodatabase

La geodatabase (gdb) se realizó una vez procesada y estructurada la información geoespacial existente en el área de estudio como: Ortofoto, modelo digital de terreno (MDT), modelo digital de superficie (MDS), edificaciones, edificabilidad, uso de suelo, lahar Cotopaxi, red hidrográfica, vías, avalúo de las construcciones.

El procedimiento que se siguió para la realización de esta fue el siguiente: Primero se creó una geodatabase con el nombre de “Informacion_actual_area_estudio”.

Figura 115.

Asignación del nombre a la GDB

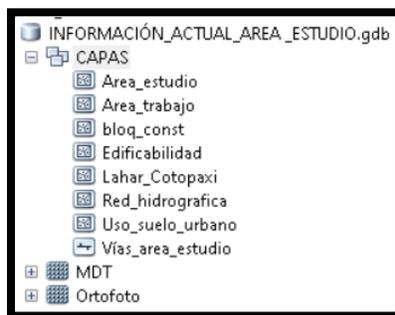


Luego dentro de esta se creó una Feature dataset con el nombre de “Capas”, a la cual se estableció un Sistema de Referencia Local, en este caso el de Rumiñahui y dentro de la cual se colocó las diferentes capas de información geoespacial.

Posterior a ello procedió a importar todas las capas y los productos fotogramétricos, a fin de tener almacenada toda la información en la geodatabase creada (ver figura 116).

Figura 116.

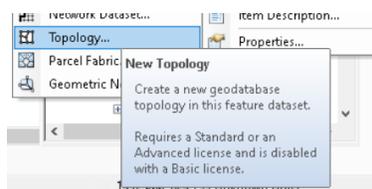
Información dentro de la geodatabase (GDB)



Finalmente se corrió la topología (ver figura 117), a fin de tener toda la información cartográfica estructurada correctamente.

Figura 117.

Corrida de la topología en la geodatabase (GDB)



Capítulo IV

Resultados

El presente capítulo da a conocer los productos obtenidos en cada uno de los procesos realizados previamente, y estos son: en la etapa de recopilación de información, se obtuvo el catastro y el uso de suelo de la zona de estudio, en el proceso fotogramétrico se obtuvo un modelo digital de superficie (MDS), un modelo digital del terreno (MDT) y una ortofoto, en la etapa de la generación del modelamiento en un software de modelador hidrológico (Hec-RAS) se obtuvo un modelo de inundaciones, también se presenta un análisis comparativo de escenarios entre un modelo generado anteriormente y el modelo actual realizado en este trabajo, donde para una mejor visualización fue replicado en las plataformas de Blender y Unity, en realidad virtual y realidad aumentada respectivamente y finalmente se realizó un análisis de la amenaza.

Recopilación de información

La recopilación de información fue la fase inicial en el desarrollo de este trabajo, los insumos obtenidos fueron procesados y depurados, a fin de realizar un mapa de edificabilidad actual y usos principales de suelo urbano en el área de estudio, el cual permite conocer el tipo de construcciones y la densidad poblacional que se encuentra dentro del área de influencia.

Figura 118.

Edificabilidad actual – Área de estudio

Proceso Fotogramétrico

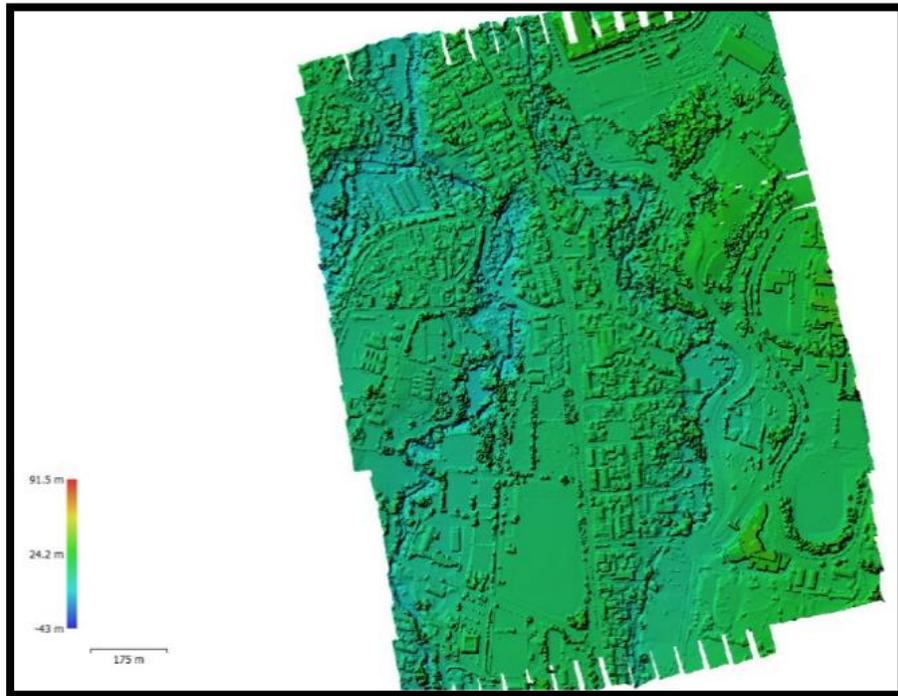
El proceso fotogramétrico fue fundamental en la realización de este trabajo, debido a que en esta etapa se levantó información en campo, la cual fue procesada y finalmente se obtuvieron los siguientes productos:

Modelo Digital de Superficie (MDS)

El modelo digital de superficie fue uno de los productos del procesamiento de las fotografías aéreas ortogonales del área de estudio, se utilizó como insumo en el modelamiento en el software Hec-RAS, debido a que en la fase inicial de este proceso era necesario importar este tipo de información, el cual gracias a las características que tiene este modelo, como es el caso de los elementos presentes en el territorio (construcciones, vegetación), el recorrido de inundación se desarrolló correctamente.

Figura 120.

*Modelo Digital de Superficie (MDS) del área de estudio generado en el software Agisoft
Metashape Professional*

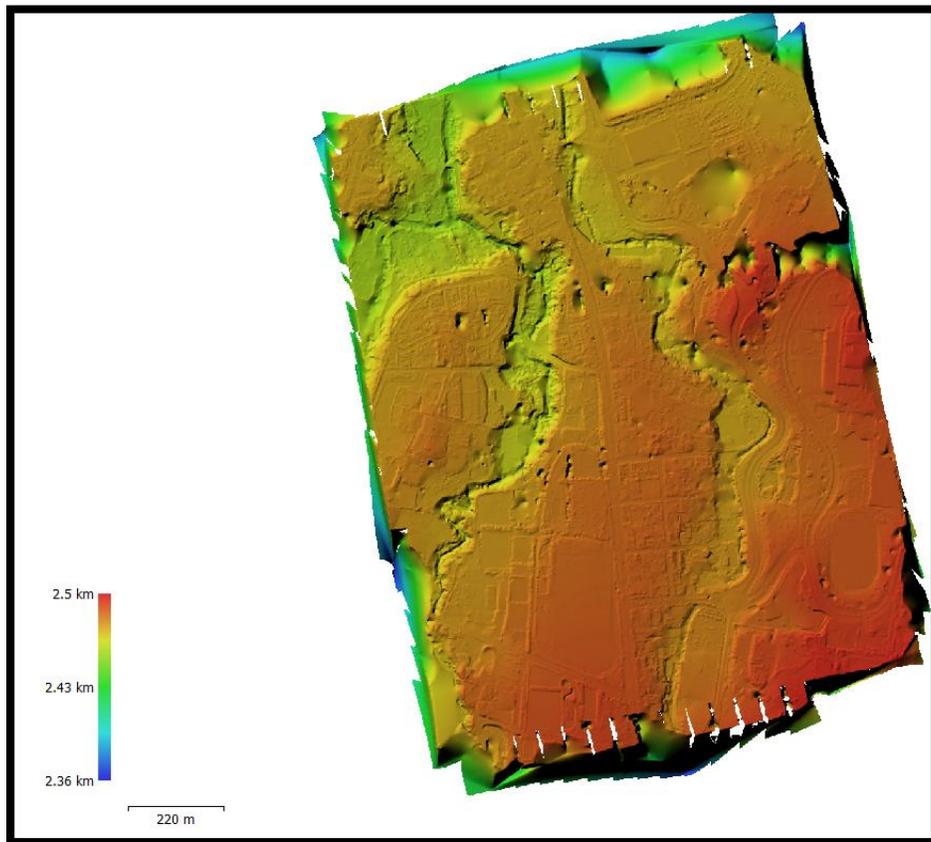


Modelo Digital del Terreno (MDT)

El modelo digital de superficie se obtuvo como producto del procesamiento de las fotografías aéreas ortogonales del área de estudio, se utilizó como insumo en las etapas de estructuración de la información en CityEngine y en la generación del modelo de inundación en las plataformas de Blender y Unity.

Figura 121.

Modelo Digital de Terreno (MDT) del área de estudio generado en el software Agisoft Metashape Professional



Ortomosaico

La ortofoto fue uno de los productos del procesamiento de las fotografías aéreas ortogonales del área de estudio, este fue un insumo muy importante debido a que en esta se encuentra información del área de estudio actual a la fecha de vuelo, se utilizó como insumo para crear los bloques constructivos, estructurar la información y generar los escenarios en las plataformas de Blender y Unity.

Figura 122.

Ortomosaico del área de estudio



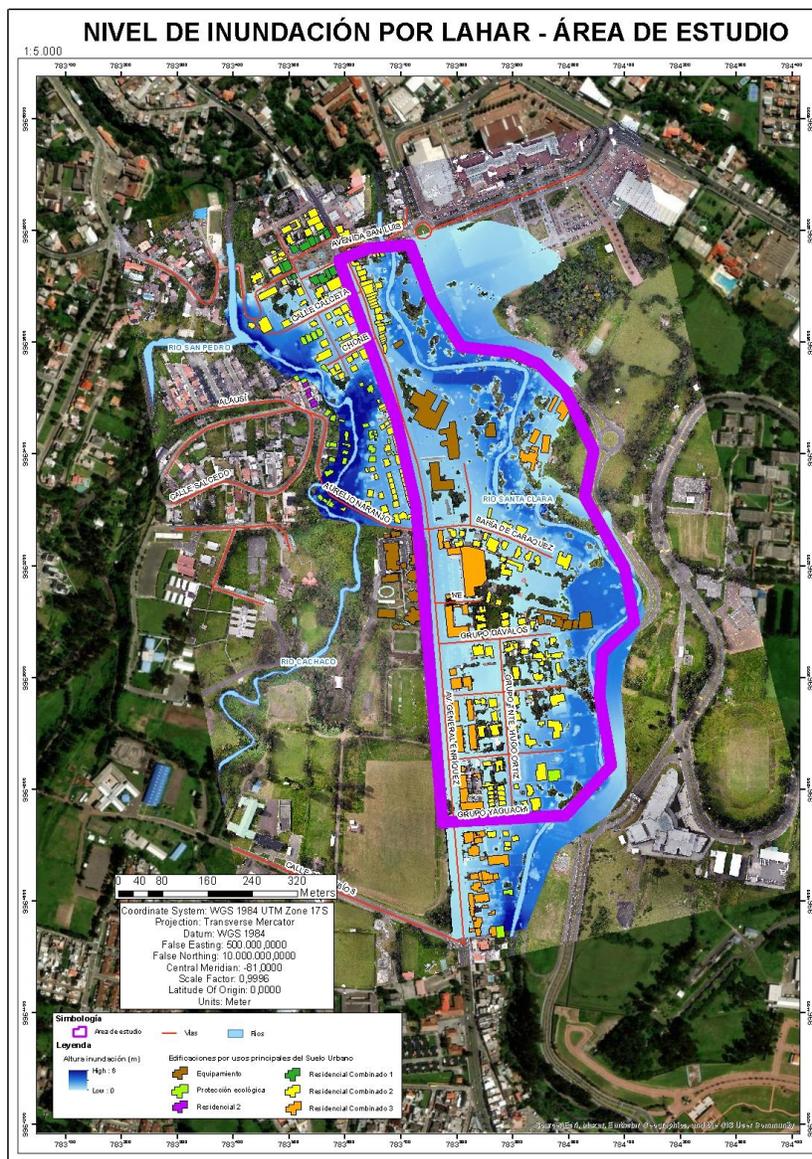
Análisis y explicación del modelo hidrológico actual

El modelo de inundación actual se lo realizó en el software Hec-RAS debido al tipo y calidad de resultados que este programa ofrece al finalizar el procesamiento de información. En este modelo se puede observar las zonas inundables y la altura alcanzada en los diferentes sitios, estos valores fueron obtenidos en base a el modelo digital de superficie (MDS), flujo de lahar (caudal) y el tiempo de duración del evento en el área de estudio.

El recorrido del modelo se debe principalmente a la presencia de construcciones, donde destaca el cerramiento ubicado en la parte suroccidental del área de estudio, el cual impide que la inundación afecte a esa zona, pero al mismo tiempo este desvía el flujo por la calle Aurelio Naranjo, la cual se convierte en una vía de tránsito de lahar, afectando las zonas que atraviesa esta calle (ver figura 123).

Figura 123.

Modelo de inundación



Comparación con el modelo Padilla y Bosque, 2014

Figura 124.

Comparación de modelos de recorrido de lahar

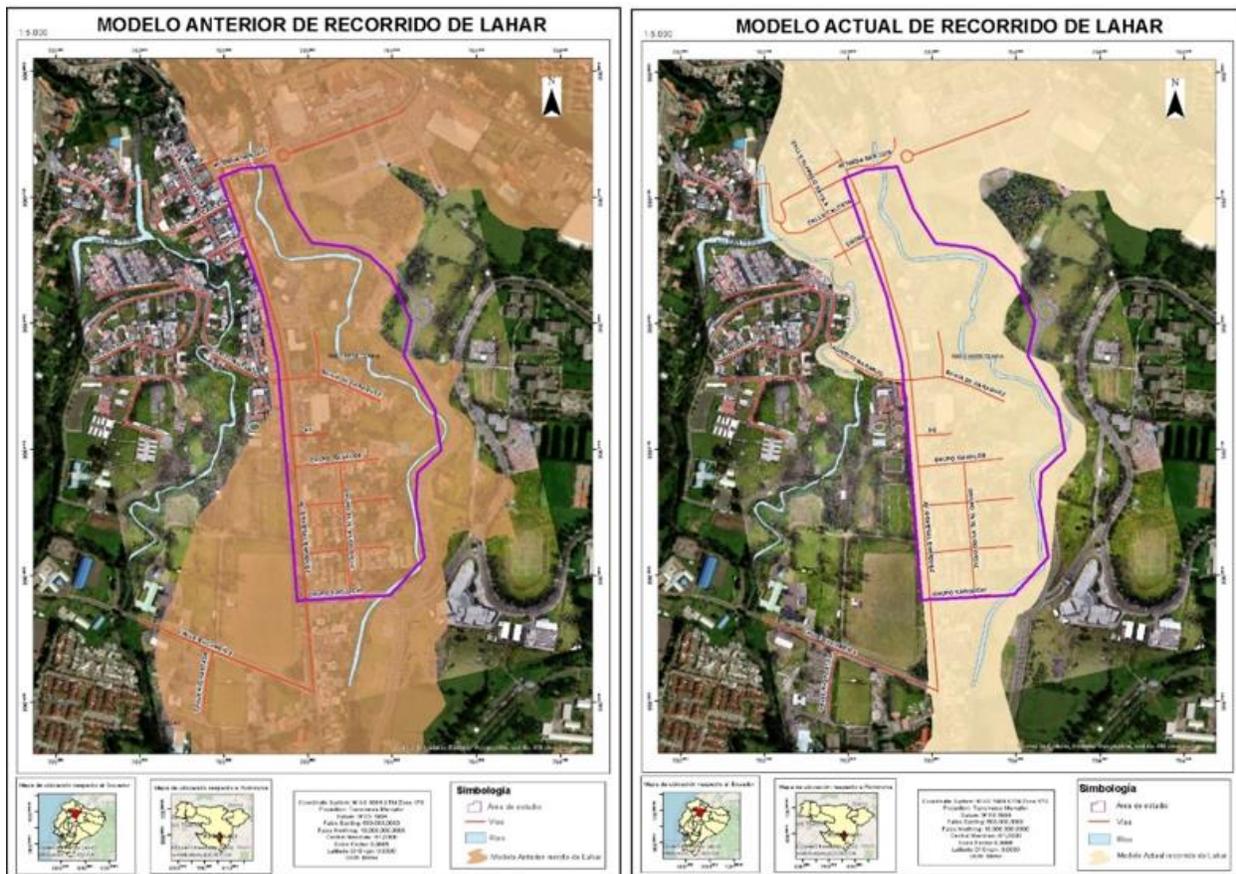


Tabla 4

Comparación de modelos de recorrido de lahar

Comparación de modelos	
Modelo anterior	Modelo generado
Cubre un área aproximada de afectación de 910590,01 m ² en relación al área de estudio	Cubre un área aproximada de afectación 562646,61 m ² en relación al área de estudio

Dentro del área de influencia no existe la construcción de un cerramiento (muro), por tal motivo la amenaza de lahar tiene este recorrido	El área actual de estudio cuenta con la construcción de un cerramiento (muro), por tal motivo el área de influencia cambia su recorrido originando nuevas zonas de amenaza.
---	---

Análisis y explicación de escenarios

En las siguientes figuras se observa dos modelos de recorrido de lahar, el primero fue realizado y utilizado en la investigación de (Padilla & Bosque, 2014) y el segundo modelo corresponde al resultado final del presente trabajo.

El nuevo modelo de inundación obtenido fue realizado en base a la cartografía actual, donde se puede observar que existe un cambio o variación en su recorrido (area de influencia) debido a las diferentes infraestructuras existentes, entre las cuales se encontró que una de estas resalta más que el resto y es el cerramiento (muro), el cual está localizado en la parte sureste del área de estudio y este fue objeto de la hipótesis del presente trabajo, la cual indica que ante una eventual erupción y producto de esta la llegada del lahar a esta zona, el tránsito de lahar cambiaría su recorrido debido a la presencia de esta construcción. Esto daría lugar a que exista la posibilidad de originar nuevas zonas de amenaza de lahar y con esto ocasionar daños a sectores que anteriormente no habían estado dentro del área de influencia.

En la actualidad el área de estudio cuenta con diferentes tipos de usos principales de suelo urbano (equipamiento, residencial combinado y protección ecológica), de los cuales unos se ven más afectados que otros, tal es el caso de suelo de protección ecológica, el cual según el modelo de inundación generado y representado en realidad virtual indica que esta zona se pierde en su totalidad, pero también existen zonas que en el modelo anterior se ven afectadas

y ahora según el modelo de inundación generado no se encuentran dentro del área de influencia de la amenaza, esta visualización se lo puede observar de mejor manera en la figura de modelo de inundación, en realidad virtual y aumentada a través de la plataforma Blender y Unity respectivamente.

Explicación del modelo actual de inundación por lahares en realidad virtual y aumentada

Modelo de recorrido de lahar en Realidad Virtual

La realización del modelo en realidad virtual, es una técnica que gracias a herramientas como gafas de realidad virtual y sus mandos, permiten transportarse de manera inmediata al escenario generado y visualizar e identificar las diferentes zonas de riesgo que produciría este evento natural.

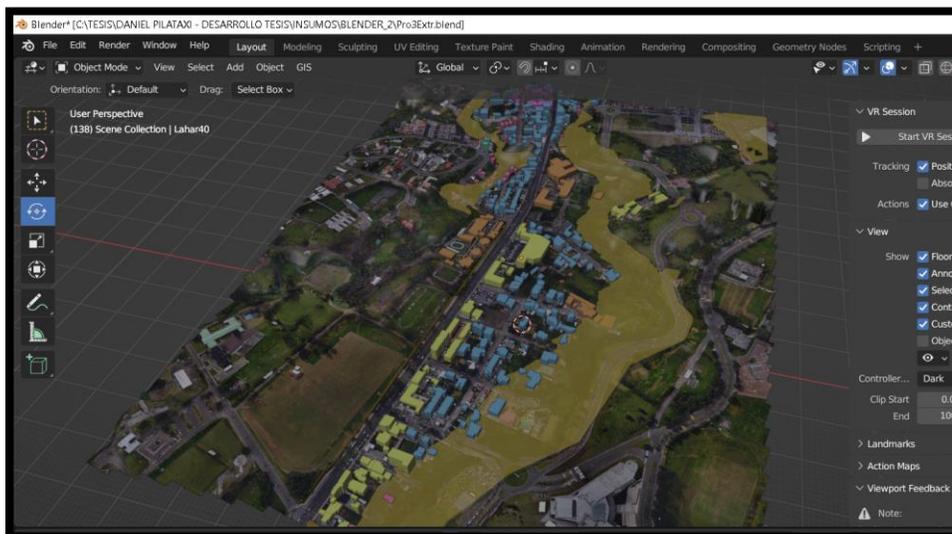
Figura 125.

Visualización en realidad virtual



Figura 126.

Modelo de inundación en la plataforma de Blender

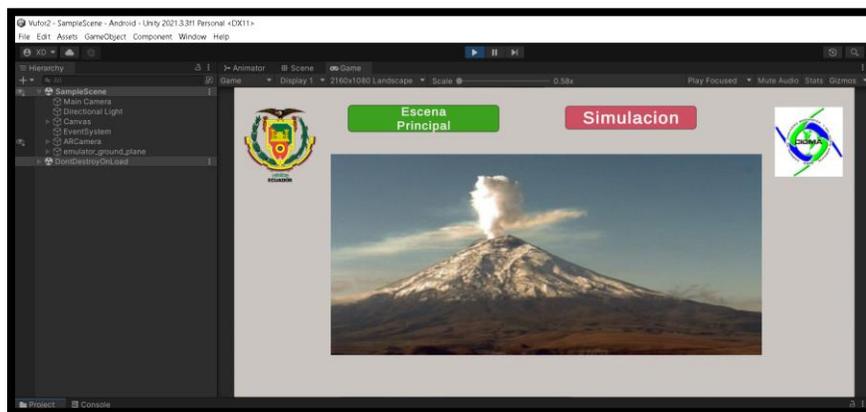


Modelo de recorrido de lahar en Realidad Aumentada

La técnica de visualización en realidad aumentada es una herramienta que da una perspectiva diferente al momento de visualizar un escenario generado, en este caso el modelo de inundación se pudo observar de manera instantánea a través de la cámara de un teléfono celular, esto gracias a que el software en el que se trabajó tiene la compatibilidad de vincularse a diferentes plataformas.

Figura 127.

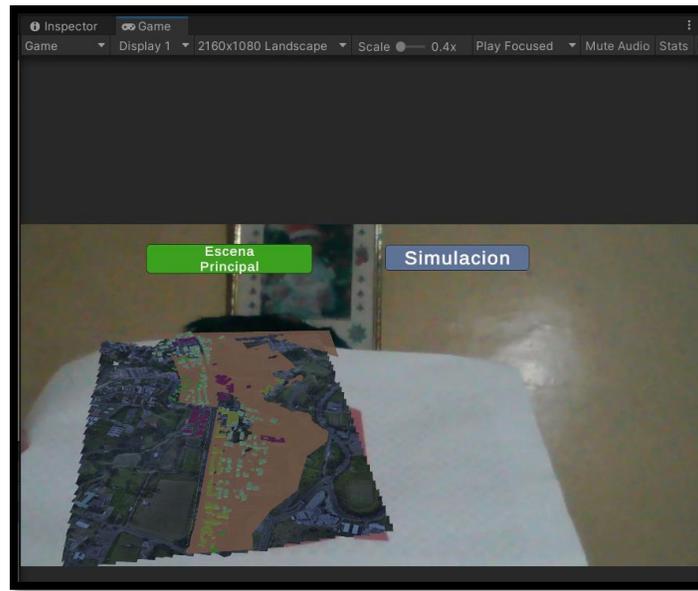
Escena principal del escenario creado en Realidad Aumentada



Nota: Para visualizar el escenario en realidad aumentada se da click en el botón “Simulación”.

Figura 128.

Escenario del modelo de inundación en realidad aumentada



Nota: Se observa el escenario en la imagen seleccionada previamente la cual proyectada en la cámara del computador.

Se realizó un mapa con el modelo de recorrido actual de lahar, los diferentes usos específicos de suelo urbano y de manera adicional el “Image Target” para su visualización en realidad aumentada del escenario (ver figura 129).

Figura 129.

Modelo actual de inundación generado

Análisis de la amenaza

El análisis se realizó en base al modelo de inundación generado en el software Hec-RAS debido a que se obtuvieron valores del nivel de inundación en las diferentes zonas del área de estudio, lo que ayudó a determinar el área de influencia y la intensidad (ver figura 130), donde el primer componente está en función de toda la zona inundada, mientras que para el segundo se estableció un rango con la altura de inundación (ver tabla 6).

Figura 130.

Intensidad de la amenaza

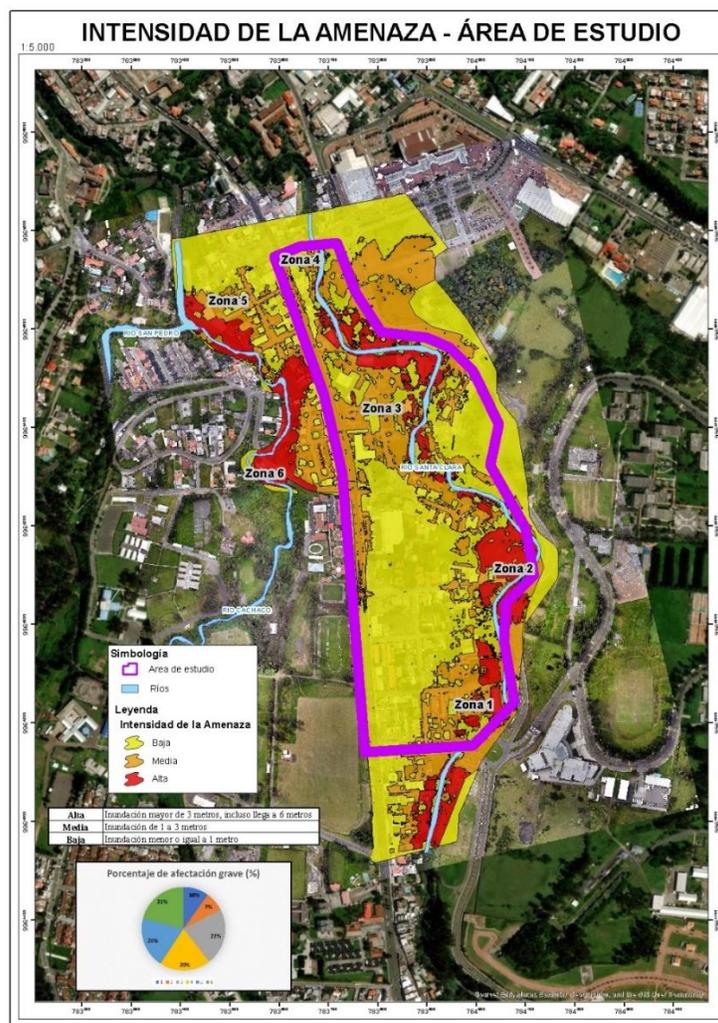


Tabla 5*Determinación de la Intensidad de la amenaza*

Intensidad de la amenaza	Nivel de inundación (m)	Descripción
Alta	$> 3 \text{ y } \leq 6$	inundado
Media	$> 1 \text{ y } \leq 3$	parcialmente inundado
Baja	≤ 1	daño leve

Valoración Económica

La valoración económica es un componente importante dentro del análisis de la amenaza, ya que permite calcular un valor aproximado de las posibles pérdidas que provocaría este fenómeno natural dentro del área de estudio, por tal motivo, se hizo un avalúo de todas las construcciones presentes en este sector y sus resultados fueron representados gráficamente, en donde se observa las zonas con mayor y menor valor económico, esto es debido al número de construcciones que tiene cada zona, donde la zona 5 posee la mayor cantidad con 130, en cambio la que menos tiene es la zona 3 con un total de 12 construcciones, y sumando todas dan un total de 310, (ver figura 131).

Figura 131.*Zonas según su valor económico*



En la siguiente figura se encuentra información acerca de el avalúo de las propiedades a fin de comprobar el valor de cada zona representado en la figura anterior, en el área de estudio de estudio existen propiedades menores a \$100.000 y mayores a los \$500.000 (ver

Capítulo V

Conclusiones y Recomendaciones

Es este capítulo se presenta las conclusiones y recomendaciones que dieron como resultado el desarrollo del trabajo, desde la recopilación y estructuración de la información, hasta la parte final que son los resultados.

Conclusiones

El empleo de varias plataformas geoinformáticas para la estructuración de la información fue de gran utilidad, debido a que sirvieron para generar los insumos y hacerlos compatibles con las plataformas que se utilizaron en el desarrollo del trabajo.

La generación del modelo de inundación en el software Hec-RAS, permitió tener buenos resultados debido a que el escenario obtenido se realizó en función de información geográfica actualizada, misma que se pudo visualizar a detalle en el modelo digital de superficie el cual indica los elementos presentes en el área de estudio como son: construcciones y vegetación, los cuales influyeron en el modelamiento.

La cantidad y el tipo de información que se utilizó en el modelamiento influyo de manera significativa en los resultados obtenidos, debido a que, si no se contaba con información bibliográfica de investigaciones anteriores, el escenario generado podría ser técnicamente incorrecto.

La creación de nuevas infraestructuras dentro de un área de influencia podría convertirse en una medida de mitigación para ciertas zonas, siempre y cuando estas sean construidas para resistir este tipo de fenómenos, este caso, el modelo de inundación generado demuestra que si el muro ubicado en la parte suroeste del área de estudio está construido para soportar el choque de este evento, podría proteger construcciones importantes como lo son un

equipamiento de seguridad y otro de carácter social, los cuales en modelos anteriores indican a estos dentro del área de influencia.

La visualización de los resultados en realidad virtual permite entender de mejor manera el escenario que produciría la amenaza, ya que gracias a las herramientas que esta posee, permite recrear posibles escenarios en un entorno actual, trasladarse hacia a ellos de manera ficticia y movilizarse dentro de ese entorno hacia los diferentes sectores de interés.

La realidad aumentada en el presente trabajo permite observar de manera directa y al instante el escenario creado, a través de un teléfono celular u otro dispositivo con una cámara, ya que el software en el que se trabajó es compatible con diferentes plataformas, una de estas es Android de los teléfonos celulares.

La aplicación de estas tecnologías fue de apoyo en el análisis de la amenaza, ya que permitió verificar y determinar de mejor manera las zonas que se encuentran más y menos expuestas a los daños que este evento generaría, debido a que el escenario se visualiza con una perspectiva diferente que cuando se analiza únicamente la información en un plano.

La valoración económica dentro del análisis de la amenaza es importante, ya que proporciona información referente a cuanto sería la pérdida en términos económicos de los bienes inmuebles que se encuentran dentro del área de influencia.

En el área de estudio se identificó cinco tipos de usos principales de suelo urbano: equipamiento, múltiple 2, protección natural, residencial 2 y residencial combinado 1,2 y 3, en donde el uso de suelo Residencial Combinado 2 se encuentra en un nivel de amenaza media y baja, que al ser una zona residencial y con usos complementarios como comercio, según el avalúo realizado es un sector con una alta valoración económica, y ante este evento natural las pérdidas económicas serían significativamente altas especialmente en los lugares de amenaza media.

Existen 4 equipamientos dentro del área de estudio dos de seguridad, uno de educación y uno de carácter social, la Academia de Guerra del Ejército y una escuela, los dos últimos, se encuentran dentro de un nivel de amenaza alta y que según el avalúo realizado, corresponden a una de las zonas con mayor valor económico, por tal motivo los daños ocasionados serían significativamente altos con respecto a su reparación.

El equipamiento de carácter social y de seguridad que se están en la parte occidental del área de estudio según el modelo realizado no se encuentran dentro del área de influencia, ya que estarían protegidos por el cerramiento, siempre y cuando esté construido para soportar el choque de este evento natural, el cual haría que el tránsito de lahar se dirija a otros sectores, creando nuevas áreas de influencia.

El uso de suelo correspondiente a Residencial Combinado 1 y 3 está en un nivel de amenaza baja, según el avalúo realizado es una zona con una valoración económica alta, posee una densidad poblacional que va desde los 180 hasta 480 Hab/ha y existen edificios, mismos que pueden ser puntos de evacuación vertical para las zonas cercanas.

El uso de suelo de Protección Natural está en nivel de amenaza alta, en esta zona existe la presencia de construcciones y en caso de la ocurrencia de este evento habría una pérdida total de estos bienes inmuebles.

La aplicación de estas tecnologías como la realidad virtual y aumentada, sería de apoyo en la gestión de riesgos, porque estas permiten generar escenarios de un evento natural e identificar las diferentes zonas de afectación.

Recomendaciones

Se recomienda recopilar y estructurar toda la información geográfica del área de estudio, a fin de no tener problemas para trabajar en los diferentes softwares, ya que cada plataforma trabaja con diferentes formatos de información.

Es necesario investigar otros modeladores hidrológicos, a fin de comprobar la calidad de resultados que puedan generar cada uno.

Es importante consultar las versiones de los softwares y los complementos con los que se va a trabajar, ya que en ciertos casos los paquetes de trabajo utilizados no son compatibles.

Se recomienda aplicar estas tecnologías en trabajos similares, pero en otras áreas de estudio, a fin de generar escenarios actuales de eventos naturales, ya que cada día aumentan el número de edificaciones en lugares que son áreas de influencia.

La implementación de estas tecnologías en la gestión de riesgos permite tener una mejor visualización de los escenarios ante eventos naturales, por tal motivo, se recomienda incorporar este tipo de herramientas para todos los tomadores de decisiones de gestión de riesgos

Bibliografía

- Adrianto, D., Hidajat, M., & Yesmaya, V. (2016). Augmented reality using Vuforia for marketing residence. *2016 1st International Conference on Game, Game Art, and Gamification (ICGGAG)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICGGAG.2016.8052642>
- AgiSoft LLC. (2021). *Intelligent photogrammetry Agisoft*.
https://www.agisoft.com/pdf/metashape_presentation.pdf
- Aguilera, E., & Toulkeridis, T. (2004). *El Volcán Cotopaxi, una amenaza que acecha*.
<https://doi.org/DOI:10.13140/RG.2.1.2355.8806>
- Almeida, S., Sierra, D., & Andrade, D. (2017). *LAHARES (FLUJOS DE LODO)*.
<https://www.igepn.edu.ec/publicaciones-para-la-comunidad/comunidad-espanol/19897-triptico-lahares-2017/file>
- ArcGIS Pro 3.0. (2020). *¿Qué es una geodatabase?* ESRI.
<https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/manage-data/geodatabases/what-is-a-geodatabase.htm>
- Benayas, R. (2016, August 19). *¿Qué es HEC-RAS?* GEOSIG. <https://www.geasig.com/que-es-hec-ras-y-para-que-sirve/>
- Berenguer, R. (2016). Documentos de Arqueología y Patrimonio Histórico. *Revista Del Máster Universitario En Arqueología Profesional y Gestión Integral Del Patrimonio*, 145. <https://doi.org/doi:10.14198/dama.2016.1.02>
- Bockholt, N. (2017). *Realidad virtual, realidad aumentada, realidad mixta. Y ¿qué significa “inmersión” realmente?*
https://www.thinkwithgoogle.com/_qs/documents/2027/c922f_15_perspectivas_realidad_virtual_que_significa_inmersion.pdf

Bolaños, J., & Rozo, A. (2023). *Modelo digital de la superficie a partir de imágenes de satélite ikonos para el análisis de áreas de inundación en Santa Marta, Colombia.*

<http://hdl.handle.net/1834/6679>

Bucheli, S. M. (2020). *Simulación de la evacuación peatonal en el Valle de los Chillos, área de influencia de lahares por erupción del volcán Cotopaxi, utilizando herramientas geoinformáticas y código abierto.*

<https://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/22522>

Caro, J. L. (2012). *Fotogrametría y modelado 3D: un caso práctico para la difusión del patrimonio y su promoción turística.* Facultad de Turismo.

<https://www.scribd.com/document/505012144/Fotogrametria-Turitec-Jlcaro-UTF8>

Carrillo, L. (2013). *SIMULACION DE LAHARES DEL VOLCÁN COTOPAXI EN SUS DRENAJES DEL LADO NORTE CON EL USO DEL PROGRAMA HEC-RAS.*

<https://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/6505?show=full>

Cerón, A., & Bedoya, P. A. (2014). *MANUAL BASICO DE UNITY 3D COMO APOYO AL DESARROLLO TURÍSTICO NACIONAL.*

<https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/d369858e-76de-40d6-a53d-75dc5657b1c6/content>

Cevallos, A., Simón, A., San Felipe, S., Rodríguez, G., Cantuña, K., & Rubio, J. (2017). *Platform with Geographic Information, to support Evacuation Plan of Latacunga, in the case of Cotopaxi Volcano eruption.*

<https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/ciencia/article/view/285/267>

Constitución de la República del Ecuador. (2008). Sección novena: Gestión del Riesgo. In *Registro Oficial* (Vol. 449, Issue 20).

- http://bivicce.corteconstitucional.gob.ec/site/image/common/libros/constituciones/Constitucion_2008_reformas.pdf
- COOTAD. (2019). *Capítulo III: Impuestos; Sección Primera: Disposiciones Generales; Art.495*. <https://www.cpcacs.gob.ec/wp-content/uploads/2020/01/cootad.pdf>
- Departamento de Desarrollo Regional y Medio Ambiente Secretaría Ejecutiva p. (1991). *Desastres, Planificación y Desarrollo: Manejo de Amenazas Naturales para Reducir los Daños*. <http://www.oas.org/usde/publications/Unit/oea57s/begin.htm>
- DGOA. (2009). *Instrumentos de apoyo para el ANÁLISIS Y LA GESTIÓN DE RIESGOS NATURALES*. <http://www.snet.gob.sv/Riesgo/GuiaMetodologica.pdf>
- Duarte, A. (2018). *GENERACIÓN PROCEDURAL DE CIUDADES*. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/20042>
- Duque, J. S. (2015). *Comparación Estadística de Métodos Interpolación Determinísticos y Estocásticos para la generación de Modelos Digitales del Terreno a partir de datos LIDAR, en la parroquia de Tumbabiro, cantón San Miguel de Urcuquí, provincia de Imbabura*. <https://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/3569/1/112296.pdf>
- EDS/ROBOTICS. (2021, August 4). *Realidad Virtual, ¿qué es y qué aplicaciones tiene?* ¿Qué Es La Realidad Virtual? <https://www.edsrobotics.com/blog/realidad-virtual-que-es/>
- Entombo, M. (2013). *Estudio de la exactitud de los modelos digitales del terreno (MDT) **. <https://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistacyf/article/view/1176>
- Erba, D. A., & Piumetto, M. (2013). *Catastro Territorial Multifinanciado*. <https://www.scribd.com/document/195644088/Catastro-Territorial-Multifinanciado>
- FAO. (2009). *Análisis de Sistemas de Gestión del Riesgo de Desastres*. <http://www.fao.org>

Felicísimo, A. (1994). *Modelos Digitales del Terreno*.

<https://www6.uniovi.es/usr/feli/pdf/libromdt.pdf>

Freeman, P. K., Martin, L. A., Linnerooth-Bayer, J., Warner, K., & Pflug, G. (2003). *Sistemas Nacionales para la Gestión Integral del Riesgo de Desastres Estrategias Financieras para la Reconstrucción en Caso de Desastres Naturales*.

<https://publications.iadb.org/es/publicacion/16715/gestion-de-riesgo-de-desastres-naturales-sistemas-nacionales-para-la-gestion>

GADMUR. (2018). Ordenanza de zonificación, uso y ocupación del suelo del cantón Rumiñahui No. 031-2017. *Registro Oficial*.

<https://www.gob.ec/sites/default/files/regulations/2021-06/Ordenanza%20de%20zonificaci%C3%B3n%20uso%20y%20ocupaci%C3%B3n%20del%20suelo%20del%20cant%C3%B3n%20Rumi%C3%B1ahui%20No.%20031-2017.pdf>

GADMUR. (2022). *ORDENANZA CATASTRAL RUMIÑAHUI 2021-2023*.

<http://intranet.ruminahui.gob.ec/wp-content/uploads/2022/04/Ord.-018-Ord-Catastral-de-Valoraci%C3%B3n-de-Bienes-Inmuebles-Urbanos-y-Rurales-para-el-Bienio-2022-2023-en-el-Cant%C3%B3n-Rumi%C3%B1ahui.pdf>

Gastón, A., & Pérez, G. (2014). *UNIVERSIDAD DEL CEMA Buenos Aires Argentina Serie*.

<https://ucema.edu.ar/publicaciones/download/documentos/551.pdf>

Global Compact corporate. (2021, July 26). *VOLCANO ACTIVE FOUNDATION*. Lahars.

<https://volcanofoundation.org/es/creando-conocimiento-de-los-riesgos/peligros/lahars/>

Harris, A. J. L. (2015). Basaltic Lava Flow Hazard. In *Volcanic Hazards, Risks and Disasters* (pp. 17–46). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396453-3.00002-2>

- Hernández, A., Domínguez, J., & Cruz, A. (2018). Arquitectura de software para el desarrollo de videojuegos sobre el motor de juego Unity 3D. *Revista de I+D Tecnológico*, 14, 54–64.
https://www.researchgate.net/publication/330453749_Arquitectura_de_software_para_el_desarrollo_de_videojuegos_sobre_el_motor_de_juego_Unity_3D
- Herzer, H., Rodriguez, M. C., Celis, A., Bartolomé, M., & Caputo, G. (2002). CONVIVIR CON EL RIESGO O LA GESTION DEL RIESGO. *ResearchGate*, 5–6.
<https://www.researchgate.net/publication/237638971>
- Hoffmann, O., & Morales Gamboa, A. (2019). *El territorio como recurso Movilidad y apropiación del espacio en México y Centroamérica*.
https://www.researchgate.net/publication/331486546_El_territorio_como_recurso_movilidad_y_apropiacion_del_espacio_en_Mexico_y_Centroamerica
- IAAO. (2013). *Glosario de Avalúo comercial y avalúo catastral de Propiedades*.
https://www.iaao.org/media/Glosario_Espa%C3%B1ol/IAAO_Spanish_Glossary_2015.pdf
- IBM Corporation. (2021, August 17). *Técnicas de modelado*.
<https://www.ibm.com/docs/es/spss-modeler/saas?topic=started-modeling-techniques>
- INDECI. (2009). *GESTION DEL RIESGO DE DESASTRES Para la planificación del desarrollo local*.
https://www.mesadeconcertacion.org.pe/sites/default/files/guia_de_gestion_de_riesgos.pdf
- Instituto Geofísico - EPN. (2014, June 24). *Volcán Cotopaxi*. Cotopaxi.
<https://www.igepn.edu.ec/tungurahua-informes/ovt/ovt-2014?limit=50&sort=title&direction=asc>

- Instituto Geofísico - EPN. (2023). *¿Qué es un volcán? ¿Qué Es Un Volcán?*
<https://www.igepn.edu.ec/component/fsf/?view=faq&catid=1&start=10>
- Jáuregui, M., Jáuregui, L., Chacón, L., & Vílchez, J. (2006). La estereo-foto digital en la elaboración de mapas temáticos. *Revista Geográfica Venezolana*, 47(1), 103–110.
<https://www.redalyc.org/pdf/3477/347730363006.pdf>
- Jiménez, G. (2015). *Tutorial Unity: El paseo del astronauta*.
https://www.academia.edu/32192062/Tutorial_Unity_El_paseo_del_astronauta_Qu%C3%A9_es_Unity
- Lavell, A. (1999). *Gestión de Riesgos Ambientales Urbanos*.
<https://www.desenredando.org/public/articulos/1999/grau/>
- Liu, X., Sohn, Y.-H., & Park, D.-W. (2018). Application Development with Augmented Reality Technique using Unity 3D and Vuforia. In *International Journal of Applied Engineering Research* (Vol. 13). https://www.ripublication.com/ijaer18/ijaerv13n21_33.pdf
- Llinares, M. de los Á., Ortiz, R., & Marreno, J. M. (2004). *RIESGO VOLCÁNICO*.
<https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/VLC-Guia-Riesgo-Volcanico.pdf>
- López, S. X. (2018). *PERCEPCIÓN DEL RIESGO SOBRE LA AMENAZA DE LAHARES DEL VOLCÁN COTOPAXI DEL CANTÓN RUMIÑAHUI, PICHINCHA-ECUADOR*.
<http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/14825>
- Melo Bohórquez, I. M., & -Colombia, B. (2018). *Tecnología, Investigación y Academia TIA Realidad aumentada y aplicaciones Augmented reality and applications*.
<https://www.reincisol.com/ojs/index.php/reincisol/article/view/35>

- Microsoft 365. (2023). *¿Qué es la realidad aumentada o AR? Entender La Realidad Aumentada*. <https://dynamics.microsoft.com/es-es/mixed-reality/guides/what-is-augmented-reality-ar/>
- MIDEPLAN. (2014). *Metodología de análisis de amenazas naturales para proyectos de inversión pública en etapa de perfil*.
https://observatorioplanificacion.cepal.org/sites/default/files/methodology/Metodologia_amenazas_analisis_proyectos_inversion.pdf
- MIDUVI. (2018). *LOOTUGS-CONCEPTOS BÁSICOS*. 44.
https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/2021/08/LOOTUGS-Conceptos-Basicos_oficial_8M.pdf
- Milanés, C., Galbán, L., & Olaya, N. (2017). *Amenazas Riesgos y Desastres*.
<https://repositorio.cuc.edu.co/bitstream/handle/11323/1156/Amenazas%20Riesgos%20y%20Desastres.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Mothes, P. A., & Vallance, J. W. (2015). Lahars at Cotopaxi and Tungurahua Volcanoes, Ecuador. In *Volcanic Hazards, Risks and Disasters* (Segunda, pp. 141–168). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396453-3.00006-X>
- NACIONES UNIDAS. (2015). *OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE. CIUDADES Y COMUNIDADES SOSTENIBLES*.
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Naranjo, D. M. (2007). *DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD ANTE UNA EVENTUAL ERUPCIÓN DEL VOLCÁN COTOPAXI*.
<https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/8438>

Navarro, D., Vallejo, I., & Navarro, M. (2020). Analysis of social vulnerability to natural risk using multivariate statistical techniques. *Investigaciones Geograficas*, 74, 29–49.

<https://doi.org/10.14198/INGEO2020.NVN>

Ojeda, G., Lacreu, H., & Sosa, G. del R. (2007). AMENAZAS NATURALES. In *ATLAS DE RECURSOS GEOAMBIENTALES* (Vol. 2, pp. 43–47).

<http://lae.unsl.edu.ar/Ediciones/III%20AMENAZAS%20NATURALES.pdf>

Ordóñez, J., Samaniego, P., Mothes, P., Schilling, S., & Geofísico -Epn, I. (2013). *LAS POTENCIALES ZONAS DE INUNDACIÓN POR LAHARES EN EL VOLCÁN COTOPAXI*. [https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/revista-](https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/revista-geoespacial/article/view/1595)

[geoespacial/article/view/1595](https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/revista-geoespacial/article/view/1595)

Padilla, A., & Bosque, J. (2014). *Determinación de puntos de evacuación vertical y horizontal*.

https://www.researchgate.net/publication/279177444_DETERMINACION_DE_PUNTOS_DE_EVACUACION_VERTICAL_Y_HORIZONTAL_EN_CASO_DE_UNA_ERUPCION_DEL_VOLCAN_COTOPAXI_EN_EL_VALLE_DE_LOS_CHILLOS_SANGOLQUI_ECUADOR

Pesantes, C., & Carrión, P. (2009). *Evaluación y Zonificación de Riesgos Geodinámicos en el Distrito Minero de Zaruma y Portovelo*.

<http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/4720>

Pucha, F., Fries, A., Canovas, F., Oñate, F., González, V., & Pucha, D. (2017). *Fundamentos de SIG* (Edilaja Cia. Ltda).

<https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=XOIsDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA6&dq=que+es+arcgis&ots=0c8OUBYHjK&sig=zEy3H--cXegvdYCb4Ezv68eLRVo#v=onepage&q=que%20es%20arcgis&f=false>

- Regalado, R. G. (2015). *Simulación de aplicación de mecanismos de reducción de riesgo para la población expuesta al riesgo volcánico: Volcán Cotopaxi, Ecuador*.
<http://www.dinamica-de-sistemas.com/revista/0316b-dinamica-de-sistemas.pdf>
- Rodriguez, F., Toulkeridis, T., Sandoval, W., Padilla, O., & Mato, F. (2017). Economic risk assessment of cotopaxi volcano, ecuador, in case of a future lahar emplacement. *Natural Hazards*, 85(1), 605–618. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11069-016-2589-1>
- Salazar, D., & D'Ercole, R. (2009). Percepción del riesgo asociado al volcán Cotopaxi y vulnerabilidad en el Valle de Los Chillos (Ecuador). *Bulletin de l'Institut Français d'études Andines*, 38 (3), 849–871. <https://doi.org/10.4000/bifea.2522>
- Secretaría General de la Comunidad Andina. (2009). INCORPORANDO LA GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES EN LA INVERSIÓN PÚBLICA. In *Proyecto Apoyo a la Prevención de Desastres en la Comunidad Andina* (Primera, p. 17).
<https://www.comunidadandina.org/StaticFiles/Temas/AtencionPrevencionDesastres/EJET4IncorporandoGestionRiesgoDesastresInversionPublica.pdf>
- Secretaria Nacional de Planificación. (2021). *Plan-de-Creación-de-Oportunidades-2021-2025*. <https://observatorionplanificacion.cepal.org/es/planes/plan-de-creacion-de-oportunidades-2021-2025-de-ecuador>
- Sieron, K. (2014). *Vulcanismo* (Vol. 1). <https://www.uv.mx/apps/vulcanismo/>
- Suau, P. (2011). *MANUAL DE MODELADO Y ANIMACIÓN CON BLENDER*.
<https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=MmwD0lwJvFQC&oi=fnd&pg=PA11&dq=qu%C3%A9+es+blender&ots=7zWAaqZNTU&sig=THazTRlgSnM0Y5alTTSnXskRfi4#v=onepage&q=qu%C3%A9%20es%20blender&f=false>

UNISDR. (2009). *Terminología sobre Reducción del Riesgo de Desastres*.

https://www.unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminologySpanish.pdf

Vargas Ulate, G. (2012). ESPACIO Y TERRITORIO EN EL ANÁLISIS GEOGRÁFICO.

Redalyc, 91, 4–9. <https://www.redalyc.org/pdf/729/72923937025.pdf>

Vera, P., Ortega, P., Casa, E., Santamaría, J., & Hidalgo, X. (2019). *Modelación Numérica y*

Mapas de Afectación por Flujo de Lahares Primarios en el Drenaje Sur del Volcán

Cotopaxi (Vol. 43, Issue 1).

http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1390-

[01292019000200061](http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1390-01292019000200061)

Villón, M. (2014). *Hec-Ras Ejemplos*.

<https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=Kf71DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA5&dq=q>

[ue+es+hec+ras&ots=CYix-](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=Kf71DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA5&dq=q)

[zdAxq&sig=TwBV4GuO3ZKnzKVKlnSwqw_FbY8#v=onepage&q=que%20es%20hec](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=Kf71DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA5&dq=q)

[%20ras&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=Kf71DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA5&dq=q)