



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y 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**

**TEMA: USO DE TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA A TRAVÉS DE SISTEMAS ESCÁNER LÁSER
APLICADA A ESTUDIOS ESPELEOLÓGICOS PARA LA
GENERACIÓN DE AMBIENTES VIRTUALES**

AUTORA

ZAMBRANO BALLESTEROS, ANDREA NATALY

DIRECTOR: DR. PADILLA ALMEIDA, OSWALDO VINICIO

SANGOLQUÍ

2017



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "USO DE TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA A TRAVÉS DE SISTEMAS ESCÁNER LÁSER APLICADA A ESTUDIOS ESPELEOLÓGICOS PARA LA GENERACIÓN DE AMBIENTES VIRTUALES" realizado por la señorita ZAMBRANO BALLESTEROS ANDREA NATALY, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar la señorita ZAMBRANO BALLESTEROS ANDREA NATALY para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 20 de julio del 2017

Atentamente,

Dr. Oswaldo Padilla

Director del Proyecto de Titulación



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, ANDREA NATALY ZAMBRANO BALLESTEROS, con cédula de identidad N° 050277017-5, declaro que este trabajo de titulación "USO DE TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA A TRAVÉS DE SISTEMAS ESCÁNER LÁSER APLICADA A ESTUDIOS ESPELEOLÓGICOS PARA LA GENERACIÓN DE AMBIENTES VIRTUALES" ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas. Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 20 de julio del 2017

Andrea Nataly Zambrano Ballesteros

CC: 050277017-5



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

AUTORIZACIÓN PARA LA PUBLICACIÓN

Yo, ANDREA NATALY ZAMBRANO BALLESTEROS, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución la presente trabajo de titulación "USO DE TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA A TRAVÉS DE SISTEMAS ESCÁNER LÁSER APLICADA A ESTUDIOS ESPELEOLÓGICOS PARA LA GENERACIÓN DE AMBIENTES VIRTUALES " cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 20 de julio del 2017

Andrea Nataly Zambrano Ballesteros

CC: 050277017-5

DEDICATORIA

Sin duda al CREADOR que me ha bendecido en todo cuanto he querido mostrándome siempre su amor, bondad, fidelidad y entrega en cada momento de la vida

A MI FAMILIA HIPPIE en especial:

A mi Susy la mejor mamá del mundo, este logro no hubiera sido posible sin su apoyo y dulzura incondicional en los buenos y malos momentos, esto es por Usted mamita.

A mi pa Ángel que es un ser humano excepcional al cual admiro fervientemente porque nunca se ha rendido en pro de buscar su libertad y sus sueños.

A mis hermanos a quienes amo infinitamente, ellos inspiran en mí la lucha por salir adelante y buscar un Ecuador mejor.

A todos los que esta investigación les pueda ser de utilidad.

AGRADECIMIENTO

Al estado ecuatoriano por permitirme acceder a estudios de tercer nivel de excelencia de manera gratuita

A la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE por el bello campus del que pude disfrutar en este proceso universitario y a los docentes pertenecientes a la Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente que me transmitieron su conocimiento, en especial al Dr. Oswaldo Padilla quien confió en mí y contribuyó activamente en el presente proyecto de titulación junto con el Dr. Theofilos Toulkeridis.

Al Instituto Espacial Ecuatoriano, de manera especial al Ing. Eduardo Ordoñez e Ing. Judith Zapata por la guía, el apoyo técnico y la amistad brindada durante el desarrollo y la culminación del proyecto.

Al maestro Eugenio Auz director del Coro ESPE por su calidad humana que vale más que cualquier cosa, por su bondad y convicciones que me hacen creer un poco más en lucha social.

A la familia y amigos que siempre están impulsando mis sueños y sobre todo locuras, en especial a Tania Paucar y Michelle Burgos por ser mi soporte en estos últimos meses, nunca las voy a olvidar chicas.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	iii
AUTORIZACIÓN PARA LA PUBLICACIÓN.....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTO.....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT	xiii
CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.0. Resumen.....	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Área de estudio.....	3
1.3. Problemática.....	5
1.4. Justificación.....	6
1.5. Objetivos	6
1.6. Metas	7
CAPÍTULO II	8
2. MARCO TEÓRICO	8
2.0. Resumen.....	8
2.1. Las Cavidades subterráneas	8
2.2. El escaneo láser	10

2.3. Sistemas láser escaner	14
2.4. Ambientes virtuales.....	18
CAPÍTULO III.....	0
3. METODOLOGÍA.....	0
3.0. Resumen.....	0
3.1. Esquema de trabajo y Recopilación de información.....	0
3.2. Estudio de planificación	1
3.2.1. Determinar los Objetivos del escaneo	1
3.2.2. Análisis del área a levantar.....	2
3.2.3. Determinar las técnicas de medición y el equipamiento	2
3.2.4. Gestión y almacenamiento de los datos.....	3
3.3. Trabajo de campo	3
3.4. Preparación y registro de los datos.....	4
3.5. Procesamiento de los datos	4
3.6. Control de calidad	8
3.7. Generación del ambiente virtual	11
CAPITULO IV.....	36
4. Resultados y discusiones	36
4.1. Comparación de medidas reales vs. software.....	70
CAPITULO V	58
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	59
5.1. Conclusiones	59
5.2. Recomendaciones.....	62
BIBLIOGRAFÍA.....	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: El espectro electromagnético	11
Tabla 2: Ventajas y desventajas del equipo Trimble TXD 3D Láser Scanner.....	17
Tabla 3: Aplicaciones de realidad virtual.....	19
Tabla 4: Datos de Escaneo por Caverna.....	1
Tabla 5: Coordenadas de Ubicación por Caverna.....	2
Tabla 6: Datos de Escaneo por Caverna.....	3
Tabla 7: Datos de Escaneo por Caverna.....	12
Tabla 8: Cálculo de variación de error en las cavidades subterráneas	54
Tabla 9: Estadístico calculado para las cavidades subterráneas en estudio	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de Ubicación de Napo Ecuador	3
Figura 2: Ubicación de Cavernas de Jumandi	4
Figura 3: Ubicación de Cavernas de Elviandi	4
Figura 4: Ubicación de Cavernas de Castillo	5
Figura 5: Ubicación de La Gruta de la Virgen	5
Figura 6: Aplicaciones del láser escáner	10
Figura 7: El espectro electromagnético	11
Figura 8: Rayo Láser	12
Figura 9: Esquema de funcionamiento basado en pulso	13
Figura 10: Esquema de funcionamiento basado en fase.....	14
Figura 11: Vista rápida de una escena de la caverna Jumandi	15
Figura 12: Láser	16
Figura 13: Características de Trimble TXD 3D Láser Scanner	17
Figura 14: Esquema de realidad Virtual.....	19
Figura 15: Esquema de Trabajo	0
Figura 16: Colocación de las esferas en cueva.....	3
Figura 17: Flujo de trabajo para el procesamiento de los datos	5
Figura 18: Tipos de vista de la nube de puntos en SCENE 5.1.....	6
Figura 19: Vista en el Programa Real Trimble Works 8.0.....	7
Figura 20: Distribución Ji- cuadrado.....	9
Figura 21: Tabla de distribución de probabilidad de X^2	11
Figura 22: Hipótesis con Chi Cuadrado	11
Figura 23: Vista de renderizado	12
Figura 24: Datos crudos resultantes del escaneo.....	36

Figura 25: Flujo de programas utilizados en el proyecto	36
Figura 26: Escenas de escaneo unido de Cavernas Jumandi.....	37
Figura 27: Escenas de escaneo unido de Cueva Elviandi	38
Figura 28: Escenas de escaneo unido de Cueva Castillo	39
Figura 29: Escenas de escaneo unido de Gruta de la Virgen Santísima.....	40
Figura 30: Mallado de Cavernas Jumandi.....	41
Figura 31: Mallado de Cueva Elviandi	42
Figura 32: Mallado de Cueva Castillo.....	43
Figura 33: Mallado de Gruta de la Virgen Santísima.....	44
Figura 34: Modelado de Cavernas Jumandi	45
Figura 35: Modelado de Cueva Elviandi.....	46
Figura 36: Modelado de Cueva Castillo.....	47
Figura 37: Modelado de Gruta de la Virgen Santísima.....	48
Figura 38: Render de Cavernas Jumandi.....	49
Figura 39: Render de Elviandi	50
Figura 40: Render de Cueva Castillo	50
Figura 41: Render de Gruta de la Virgen Santísima	51
Figura 42: Muestreo Jumandi (a) en campo – (b) programa Scene 5.1	52
Figura 43: Muestreo Elviandi (a) en campo – (b) programa Scene 5.1	53
Figura 44: Muestreo Elviandi (a) en campo – (b) programa Scene 5.1	53
Figura 45: Histogramas y diagrama de caja de muestreo en las cavidades subterráneas	55
Figura 46: Regresión lineal del muestreo.....	56
Figura 47: Estadístico ji-cuadrado para cavidades subterráneas:	57

RESUMEN

El presente proyecto de titulación pretende virtualizar las cavidades subterráneas de Jumandi, Elviandi, Castillo y la Gruta de la Virgen Santísima ubicadas en la provincia del Napo – Ecuador, este proceso traslada un elemento de la realidad a un entorno virtual. Se empleará el láser escáner terrestre marca Trimble TXD 3D a través de una serie de técnicas, software y hardware permitirán obtener la geometría y reconstrucción de las cavernas. Este proceso incluye la obtención de nubes de puntos, depuración, generación de mallas, texturización, depurado de excesos, animaciones y video. La generación de ambientes virtuales permite proyectar mucho más la belleza escénica del país impulsando el turismo espeleológico y la conservación de estos frágiles ambientes que al ser accesibles desde la comodidad de un computador pueden despertar el interés tanto para la ciencia como para el público en general.

PALABRAS CLAVES:

- **VIRTUALIZAR**
- **CAVIDADES SUBTERRÁNEAS**
- **NUBES DE PUNTOS**
- **GENERACIÓN DE MALLAS**

ABSTRACT

The present research seeks to virtualize the underground cavities of Jumandi, Elviandi, Castillo and Gruta de la Virgen Santísima, located in the province of Napo-Ecuador, transferring an element of reality to a virtual environment. The topography was lifted using a Trimble TXD 3D laser scanner, subsequent this was modeling through a series of techniques, software and hardware. This process includes obtaining point clouds, debugging, mesh generation, texturing, debugging of excesses, animations and video. The virtual environments highlight the scenic beauty of the country by promoting speleological tourism and the conservation of these fragile environments that, when accessible from the comfort of a computer, can catch the interest of scientists and general public.

KEYWORDS:

- **VIRTUALIZE**
- **CAVES**
- **POINT CLOUDS**
- **MESH GENERATION**

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.0. RESUMEN

El presente estudio se desarrolla en las cavernas Elviandi, la Gruta de la Virgen Santísima, Castillo y Jumandi ubicadas en los cantones de Archidona y Tena en la provincia del Napo- Ecuador, su objetivo es integrar el uso de las tecnologías de información (TIC) a ambientes frágiles como lo son las cavernas a través del escaneo láser, mismo que permite reconstruir y apreciar de manera tridimensional dichos espacios, en donde se generan nubes de millones de puntos por escena que una vez importadas en programas especializados son unidas, posteriormente depuradas, modeladas y animadas dando como resultado un ambiente virtual inmersivo.

El ambiente virtual de las cavernas genera varios beneficios tanto desde el punto de vista científico como turístico apalancando futuras investigaciones y fomentando el turismo espeleológico, ya que permite a la comunidad en general apreciar espacios de difícil acceso desde la comodidad de su computador.

1.1. ANTECEDENTES

Dentro del manejo de los datos geoespaciales se integran todos los métodos que permiten la captura, análisis, interpretación, almacenamiento y generación de la información geográfica y cartográfica. Para (Fernández, 2017) la necesidad del hombre por comprender de mejor manera los espacios y su ubicación han permitido, que en la actualidad, se desarrollen tecnologías que lleven a avanzar desde los sistemas CAD (Diseño Asistido por Computadora) a los SIG (Sistemas de Información Geográfica).

La tecnología LÍDAR (Láser Imaging Detection and Ranging) permite generar modelos 3D de superficies, de terreno y de edificaciones con gran precisión por lo que se utiliza desde los años sesenta poco después de la creación del láser; en un

inicio se utilizó en estudios de meteorología, pero en la actualidad abarca múltiples aplicaciones como ingeniería civil, arquitectura, estudios forestales, análisis de escenas del crimen, conservación de patrimonio, espeleología, entre otros. (Salamanca & José, 2008) (Guerrero y Velastegui, 2013).

La tecnología láser esta siendo aprovechada en varios estudios gracias a que el láser permite amplificar la luz de manera coherente a lo largo de la trayectoria requerida, en la actualidad su mayor desventaja se basa en los costos que presenta, sin embargo muestra excelentes resultados en la reconstrucción de ambientes de manera precisa y en un tiempo relativamente corto.

La utilización de esta tecnología permite conocer la morfología de las cavidades naturales del subsuelo y además, tener un inventario claro de estos frágiles ambientes, al conocer su ubicación exacta y características (Marín D. , 2014); siendo el Ecuador poseedor de una infinita riqueza espeleológica en su territorio, contar con información de la realidad de las cuevas a través de los ambientes virtuales le beneficiará de manera invaluable.

La provincia del Napo es una de los lugares con mayor biodiversidad tanto por su ubicación, origen geológico y topografía lo que hace que se proyecte como una de las zonas con mayor potencial turístico dentro del Ecuador (Ministerio de Turismo, 2014); además cuenta con una serie de cavernas que son parte de su patrimonio inexplorado entre ellas están: Elviandi, la Gruta de la Santísima Virgen, Jumandi y Castillo, entre otras.

Para (García S. , 2010): se ha demostrado que las nuevas modalidades de turismo que tienen al medio ambiente como protagonista pueden servir como un catalizador para el desarrollo sostenible; en tal virtud el desarrollo de este proyecto es de importancia para conservar y crear expectativa que motive al público en general a conocer el ambiente en el que se envuelven las cavernas del país.

En el marco de la espeleología ecuatoriana se han venido implementando soluciones para su conservación, así como el modelamiento 3D de las mismas (Guerrero y Velastegui, 2013), sin embargo al ser estudios de carácter exploratorio se requiere emplear mejores métodos de captura y procesamiento para obtener un inventario más completo de estos ambientes.

1.2. ÁREA DE ESTUDIO

El presente proyecto se realizó en las cuevas en estudio que son Jumandi, Elviandi, Castillo y la Gruta de la Virgen Santísima; que están ubicadas en la provincia de Napo-Ecuador cerca de su capital Tena como se muestra en la **Figura 1**

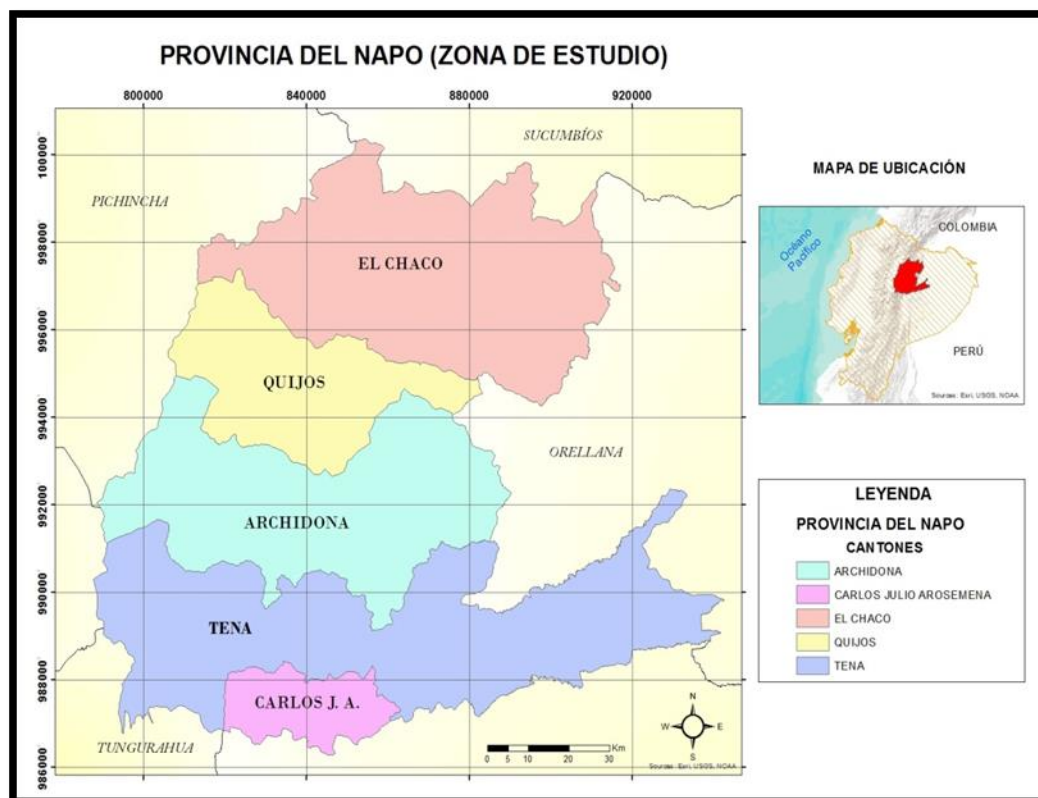


Figura 1: Mapa de Ubicación de Napo Ecuador

Cueva Jumandi: Está ubicada en las coordenadas geográficas WGS84, $[0^{\circ}52'29.19''S; 77^{\circ}47'24.27''O]$, como se muestra en la **Figura 2**; a 4 Km al norte de la ciudad de Archidona en la provincia de Napo-Ecuador; es la más conocida por los turistas que visitan el sector y alrededor de la caverna se ha construido una variada infraestructura con la finalidad de aprovechar este recurso natural y generar ingresos a la comunidad local. (Ministerio de Turismo, 2014). Tiene una formación natural de rocas calcáreas permeables, que datan del Pleistoceno y en la misma se pueden encontrar varias especies de invertebrados como arañas, peces como el bagre; murciélagos entre otros y que a través del tiempo han contorneado formas muy especiales, en una sorprendente distribución, (Peck, 1984).

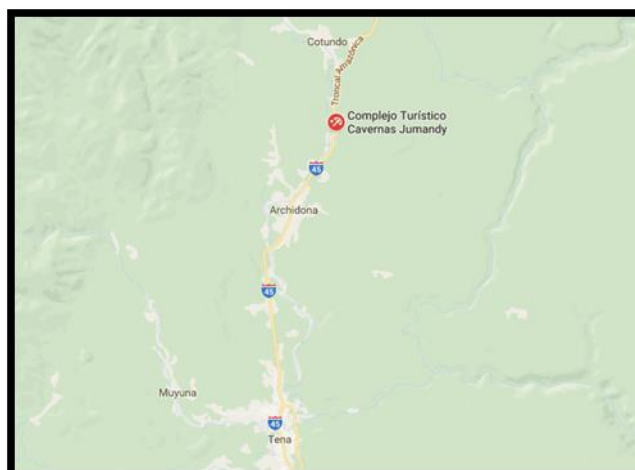


Figura 2: Ubicación de Cavernas de Jumandi

Fuente: (GoogleMaps, 2017)

Cueva Elviandi: Está ubicada en las coordenadas geográficas WGS84 [$1^{\circ}02'15.76''S$; $77^{\circ}48'05.52''O$], como se muestra en la **Figura 3**; muy cerca de la capital el Tena, en la provincia de Napo-Ecuador; está caracterizada por su acceso, ya que requiere un descenso de alrededor de 7 m. Tiene una estructura variada, con una longitud de alrededor de 200m y una hermosa galería casi al final de la caverna, en donde se pueden apreciar varias estalactitas y estalagmitas



Figura 3: Ubicación de Cavernas de Elviandi

Fuente: (GoogleMaps, 2017)

Cueva Castillo: Está ubicada en las coordenadas geográficas WGS84 [$1^{\circ} 1.41' S$, $77^{\circ} 48' 1.2'' O$], como se muestra en la **Figura 4** presenta formaciones calcáreas de estalactitas y estalagmitas está ubicada en 5 Km de la ciudad de Tena (Guerrero y Velastegui, 2013) son las zonas más atractivas para el turismo de espeleología.



Figura 4: Ubicación de Cavernas de Castillo

Fuente: (GoogleMaps, 2017)

Cueva La Gruta de la Virgen Santísima: Está ubicada en las coordenadas geográficas WGS 84 [$1^{\circ} 1' 43.52''S$, $77^{\circ} 48' 3.05''O$], como se muestra en la **Figura 5**, es una estrecha formación geológica, que circunda en los 100 m de longitud dividida en varias galerías.



Figura 5: Ubicación de La Gruta de la Virgen

Fuente: (GoogleMaps, 2017)

1.3. PROBLEMÁTICA

En la actualidad Ecuador no cuenta con un registro adecuado de las cavidades subterráneas que posee y esto se debe tanto al desconocimiento de la ubicación de las mismas como de la dificultad en el acceso hacia ellas, es por ello que existe una gran ausencia de información espacial en el campo espeleológico, existen estudios incipientes en esta rama como el realizado por (Guerrero y Velastegui, 2013), pero se debe ahondar mucho más; dicha ausencia de información se puede disminuir a través de la utilización de las Tecnologías de Información Geográfica (TIG) para de esta forma avanzar en la investigación de las potencialidades tanto geológicas, científicas y de belleza escénica de las cuevas, a través de la generación de los ambientes

virtuales de las mismas; es por ello que si Ecuador no cuenta con un inventario de las cavidades subterráneas que posee se perderá esta enorme riqueza natural.

1.4. JUSTIFICACIÓN

Para realizar un registro y levantamiento 3D se plantea utilizar tecnología láser a través del equipo Trimble TXD 3D Láser Scanner que es una innovadora herramienta para escanear y digitalizar espacios de difícil acceso como lo son las cuevas subterráneas del Napo-Ecuador; lo hace a través de la integración de datos en forma rápida, precisa, veraz, completa y en un costo relativamente bajo.

La utilización de esta herramienta permite proyectar mucho más la belleza escénica del país, impulsando la excursión a estos sitios a través del turismo espeleológico, que está enfocado en la visita, exploración o descensos en grutas, cuevas y cavernas donde se pueden apreciar estructuras geológicas como estalactitas y estalagmitas acompañadas de especies de flora y fauna adaptadas a este tipo de hábitats (Allemand, 2005). Adicional a esto al permitir que los científicos tengan acceso a los espacios que se integran dentro de estas cavidades se les permitirá ahondar mucho más en sus investigaciones.

Los modelos 3D que se crean con sistemas escáner láser de los ambientes virtuales de las cavernas del país generan conocimiento tanto para la academia (Avance en Investigaciones), el Estado (Inventario de Cuevas) y el público general (Turismo Espeleológico). Para (Aguilera, 2012) la topografía modela con fidelidad geométrica el entorno y tamaño de las cavidades subterráneas.

1.5. OBJETIVOS

- **Objetivo General**

Utilizar la Tecnología de Información Geográfica (TIG) a través del Sistema Escáner Láser, aplicado a estudios espeleológicos para la generación de ambientes virtuales en las Cuevas Jumandi, Elviandi, Castillo, Gruta de la Santísima Virgen en la Provincia de Napo - Ecuador.

- **Objetivos Específicos**

- Planificar el escaneo tomando en cuenta la longitud y el acceso para determinar correctamente los tiempos y resoluciones en los que se trabajará de acuerdo a las capacidades del equipo.
- Levantar la ubicación de las cuevas en estudio.
- Realizar los escaneos de las cuevas utilizando el equipo Trimble TXD 3D Láser Scanner.
- Procesar de los datos crudos para unir los escaneos y depurar la información.
- Realizar el control de calidad de los escaneos.
- Generar el entorno virtual 3D de las Cuevas Jumandi, Elviandi, Castillo y Gruta de la Santísima Virgen.

1.6. METAS

- Un Manual de captura, procesamiento y generación de los ambientes virtuales.
- Un Listado de coordenadas estandarizadas de las cuevas en estudio.
- Un cuadro de control de calidad.
- Cuatro Modelos tridimensionales virtuales de las cuevas en estudio.
- Un artículo científico publicable

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.0. RESUMEN

El presente capítulo aborda las definiciones de cavidades subterráneas, sistemas de escaneo láser y la generación de ambientes virtuales a todo esto se suma la incorporación de las tecnologías de información (TIC) para dar apoyo al conocimiento y revaloración de la belleza espeleológica con la que cuenta el país. La luz láser posee una propiedad llamada coherencia temporal que le permite propagarse sin perder intensidad, utiliza tecnología de cambio de fase en donde la luz infrarroja se proyecta hacia la superficie y al entrar en contacto con el objeto se refleja de nuevo al escáner; ahora bien los ambientes virtuales generados por computadora son una tendencia que permite acceder a lugares reales o imaginarios que le producen al usuario la sensación de estar en sitios inaccesibles o con riesgo inclusive desde la comodidad de su hogar; es pues por ello de gran utilidad en áreas de difícil acceso como las cavernas ya que permite reconstruir de manera tridimensional sus espacios; mostrando una realidad casi imperceptible para la comunidad en general.

2.1. LAS CAVIDADES SUBTERRÁNEAS

Al inicio de la historia de la humanidad estaba poco explorado el lenguaje oral sin embargo los seres primitivos tenían a su alcance herramientas y técnicas que les permitían comunicar de forma escrita las situaciones que vivían. (Marín B. , 2012)

Al extraordinario mundo de las cuevas se pueden acceder a través de la exploración de las mismas por parte de científicos y aventureros que al descubrir estos bellos parajes concientizan al público en general haciendo conocer la fragilidad en la que están estos ambientes y la riqueza escénica que aportan al país, proveyendo de ejemplares a ser considerados como patrimonios naturales de Ecuador y del mundo; las cavernas esconden especies de animales y plantas, aún desconocidas para la ciencia. (Toulkeridis et al., 2015)

Las cavernas son un patrimonio cultural, natural y científico que debe ser estudiado y conservado debido a la fragilidad en la que se hallan estos entornos; para la (UNESCO, 1972) son consideradas patrimonio cultural debido a que proveen información desde el punto de vista de la historia o de la ciencia; las cavidades subterráneas aportan un testimonio único y excepcional, sobre una tradición cultural de una civilización viva o desaparecida es por ello rescatable la elaboración de lo que podría ser un inventario de las cavidades subterráneas del país.

Los estudios cartográficos en las cavernas del país son muy escasos debido en gran manera al desconocimiento de la Amazonía, la falta de recursos, el desaprovechamiento de ciertos saberes ancestrales que han mermado la posibilidad de difundir la riqueza escénica que nos ofrece este recurso. (Guerrero y Velastegui, 2013) (García S. , 2010). Las cavernas son hábitats de estadía, hibernación y descanso para varias especies de animales y bacterias como murciélagos, roedores, marsupiales, búhos, serpientes, peces y reptiles; poseen también comunidades vegetales únicas y reducidas que permiten la subsistencia de estas especies. Durante el día las cavernas retienen calor y en las noches lo emiten, situación que atrae a invertebrados, aves y reptiles. (Marcot et al., 2000)

Según (Ycaza e Ycaza, 2009): las formación de las cavernas dura millones de años y se originan por la acción del agua, CO₂, y el suelo que al filtrarse lo va erosionando y generan estas asombrosas cavidades. Dentro de las cavernas existe gran parte de la historia geológica que ha atravesado el país, además de una enorme cantidad de especies de animales que se han adaptado a estos ambientes mismos que son dignos de estudio gracias a su belleza y complejidad. Las cavidades subterráneas se clasifican dependiendo del tipo de cavidad a la que obedecen, según (Ycaza e Ycaza, 2009) de donde:

- Grutas: las que poseen un salón subterráneo
- Cueva: es una cavidad con varios salones más o menos extensa y no sobrepasa 1 Km de longitud.
- Cavernas: es una cavidad con varios salones y galerías con longitudes superiores a 1 Km e inferiores a 10 Km.

El Ecuador busca convertirse en un país recocado por aprovechar su potencial turístico, las cuevas en estudio Jumandi, Elviandi, Castillo y la Gruta de la Virgen Santísima ubicadas en la provincia del Napo permiten acceder a información bien documentada acerca del entorno en el que se encuentran; para ingresar a ellas se requiere adquirir el equipo necesario y prepararse para convertir la experiencia en un atractivo de carácter internacional. (Ministerio de Turismo, 2014) (Espinel, 2014)

2.2. EL ESCANEEO LÁSER

2.2.1. Definición

Es un método mediante el cual una superficie se digitaliza obteniendo información sobre la forma, apariencia y profundidad de los objetos en un entorno real usando tecnología láser; los datos capturados pueden generar una gran variedad de aplicaciones en planos y modelos tridimensionales, son de tipo estático (escáner fijo) y dinámico (escáner sobre una plataforma). (Guerrero y Velastegui, 2013)

2.2.2. Aplicaciones del Escáner Láser

El escáner láser de corto alcance se utilizó en el diseño asistido por computador (CAD) para la producción en masa de productos de consumo, como se muestra en la **Figura 6**

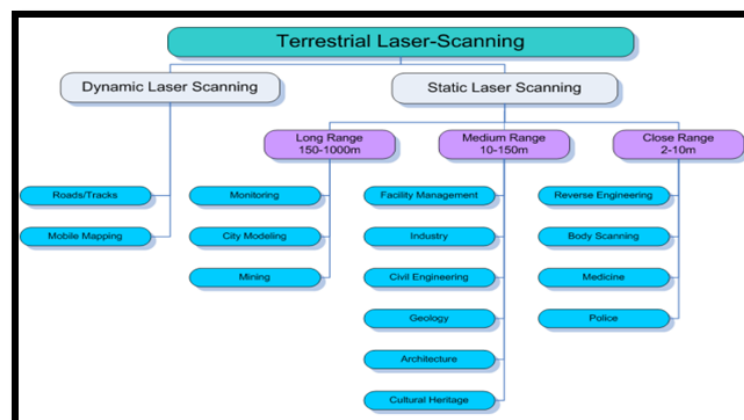


Figura 6: Aplicaciones del láser escáner

Fuente: 3D Risk Mapping (VLAAMS , 2008)

El escáner de medio alcance se desarrolló más en la industria petroquímica y actualmente es utilizado en muchas otras aplicaciones entre ellas las del campo geológico ya que gracias a la captura completa en tres dimensiones se obtiene información veraz, de alta precisión y en corto tiempo. (VLAAMS , 2008)

2.2.3. El espectro electromagnético y la luz

La luz y otras radiaciones son manifestaciones de energía que viajan por el universo a máxima velocidad y forman parte de un rango extremadamente amplio que no tiene límite superior ni inferior conocido como espectro electromagnético. (Fontal, 2005). Para comprender la percepción remota es necesario conocer la interacción de la luz con la superficie de la Tierra, la energía puede ser transferida de un cuerpo a otro mediante conducción, conexión y radiación. La radiación es un continuo de ondas que se caracterizan respecto a su longitud de la onda y su frecuencia. (Bautista y Delgado, 2004), como se muestra en la **Figura 7**.

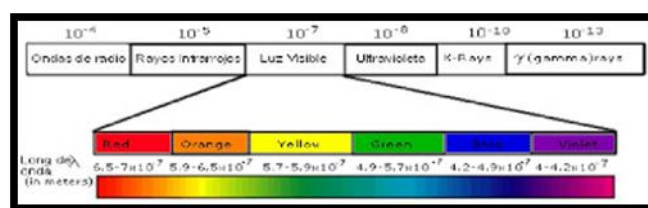


Figura 7: El espectro electromagnético

Fuente: (Rojas, 2009)

El espectro electromagnético cubre una amplia gama de longitudes de ondas y pueden clasificarse según su principal fuente de producción pero no tiene límites definidos tal y como se muestra en la **Tabla 1** a continuación:

Tabla 1:
El espectro electromagnético

Región del espectro	Intervalo de frecuencias (Hz)
Radio-microondas	$0-3.0 \cdot 10^{12}$
Infrarrojo	$3.0 \cdot 10^{12}-4.6 \cdot 10^{14}$
Luz visible	$4.6 \cdot 10^{14}-7.5 \cdot 10^{14}$
Ultravioleta	$7.5 \cdot 10^{14}-6.0 \cdot 10^{16}$
Rayos X	$6.0 \cdot 10^{16}-1.0 \cdot 10^{20}$
Radiación gamma	$1.0 \cdot 10^{20}-\dots$

Fuente: Frecuencias del espectro (Leonberger, 2002)

2.2.4. Láser

La palabra láser es el acrónimo en inglés de amplificación de la luz por emisión inducida de radiación (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). (RAE, 2014). Es un instrumento capaz de generar ondas de luz usando una estrecha banda del espectro llamada láser, mismo que es un estrecho y poco divergente haz de longitud de onda, como se muestra en la **Figura 8** La luz láser posee una propiedad llamada coherencia temporal o espacial que le permite propagarse largas distancias sin perder intensidad y con escasa dispersión hacia una dirección espacial altamente definida; adicional a ello su velocidad de propagación es constante por lo que lo convierte en un buen método para mediciones de objetos. (Cabrejas, 2015)



Figura 8: Rayo Láser

Fuente: (Illuminet, 2015)

2.2.5. Mediciones utilizando la luz láser

Existen dos grandes grupos de medición con luz láser mismos que difieren en la necesidad o ausencia de radiación y son:

- **Sistema de medición pasivo**

No emiten radiación alguna sino utilizan la del entorno para realizar la medición, se basan en el principio de la visión humana: la superposición de imágenes tomadas desde dos puntos de vista separados que permiten observar las correspondencias que existen en los modelos es por ello que da lugar a posibles errores. (Cabrejas, 2015)

- **Sistema de medición activo**

Son equipos capaces de emitir radiación y detectar su reflexión, son más complicados que los pasivos pero con mayores ventajas tales como: no requieren luz

natural y pueden registrar cualquier superficie sin necesidad que contenga un patrón en menos tiempo. (Cabrejas, 2015)

2.2.6. Características Metrológicas

Los sistemas de medición activos se clasifican en dos subgrupos que son basado en triangulación y en base de tiempo, en el caso de este proyecto se utilizó un sistema de medición activo en base de tiempo por lo que se describirá detalladamente a continuación:

- **Medición basada en tiempo**

Miden un intervalo de tiempo entre dos sucesos y se subdividen en tiempo de vuelo o pulsos y cambio de fase.

Basados en Pulso: este tipo de escáneres miden la distancia recorrida por el haz de luz en función del tiempo que se demora en regresar el impulso; teniendo en cuenta que será la mitad del espacio recorrido, su principal ventaja es la concentración de energía transmitida que alcanza un rango de hasta 2 Km por lo que permiten mediciones a largas distancias, con una precisión de 4 mm a 3 cm, sin embargo dependen de la frecuencia del pulso que puede estar entre los 2 MHz y 100MHz, (Cabrejas, 2015) como se muestra en la **Figura 9**

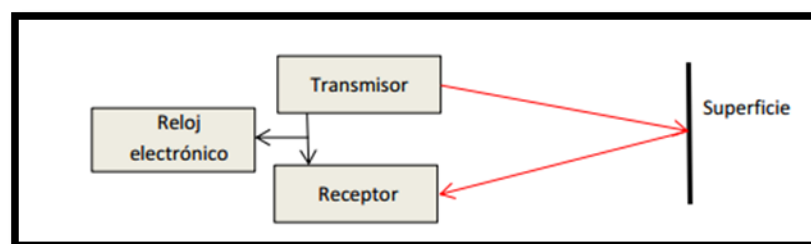


Figura 9: Esquema de funcionamiento basado en pulso

Fuente: Control Dimensional de Aeronaves con Sistemas Láser Escáner. (Cabrejas, 2015)

Cambio de Fase: este método trabaja modulando la amplitud (AMCW) o la frecuencia (FMCW) de la luz emitida antes de enviarla al objeto a escanear, elimina los relojes internos de alta precisión evitando los errores que de allí se desprenden, por lo que mide la demora o la diferencia de fase entre las ondas entrante y saliente. (Cabrejas, 2015), como se muestra en la **Figura 10**

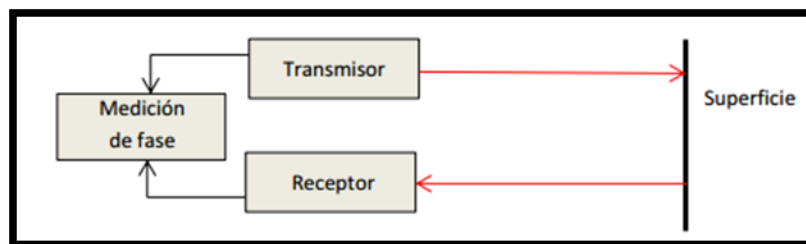


Figura 10: Esquema de funcionamiento basado en fase

Fuente: Control Dimensional de Aeronaves con Sistemas Láser Escáner. (Cabrejas, 2015)

Este sistema escanea a frecuencias muy elevadas de alrededor de 1000MHz, por lo que se reduce el tiempo de toma haciendo registros de hasta 1'200.000 puntos/s, sin embargo se limita a distancias más pequeñas y su precisión depende de la duración del pulso. (Cabrejas, 2015)

La reconstrucción de figuras se ha convertido en los últimos años en una tendencia creciente; ya que existen dos tipos de tecnologías de sensores que generan la geometría 3D de superficies estos son los datos ópticos como la imagen y vídeo y el escaneo láser que es una tecnología de toma de datos utilizada en ingeniería inversa para la reconstrucción de modelos 3D digitales, el motivo del presente estudio recoge el uso de última técnica para solventar la ausencia de información en algunas de las cavidades subterráneas del país.

2.3. SISTEMAS LÁSER ESCANER

A principios del siglo XXI los sistemas escáner láser 3D revolucionaron la toma de nubes de puntos de gran tamaño, permitiendo su adquisición de forma sistemática, en un tiempo relativamente corto, a altas frecuencias y junto con valores de intensidad o color asociados. (Bohler, 2006)

Son instrumentos que realizan un barrido de superficies a través del haz de láser, funcionan emitiendo un haz de luz a los puntos en la superficie a escanear y obtiene la distancia a partir de la reflexión del mismo obteniendo coordenadas tridimensionales que dependiendo la densidad del escaneo ofrecen una nube de puntos muy similar a la realidad; sin embargo al recoger la primera superficie que alcance el haz, genera sombras y zonas de poca densidad de escaneo, por lo que se requiere hacer diversos escaneados en diversas bases para obtener una nube de puntos más completa del conjunto. (Cabrejas, 2015)

Los sistemas láser son sensores activos y funcionan en varios entornos sean sencillos o complejos utilizando los diversos principios de medición basados en el tiempo, bien sea mediante pulsos (tiempo de vuelo) o mediante diferencia de fase; métodos que permiten escanear espacios que oscilan en distancias de metros a kilómetros. (Lerma y Van Genechten, 2008)

Actualmente, existe una gran cantidad de sistemas escáner láser en el mercado, las características de los equipos son diversas, los costos son elevados pero van disminuyendo al igual que las dimensiones y el peso; sin embargo la rentabilidad de los equipos depende del uso. En el presente estudio su uso está justificado para en levantamiento y captura en donde las dimensiones son grandes y con geometría compleja. La **Figura 11** muestra una vista rápida del resultado del escaneo de estalactitas en una de las cuevas en estudio; que según (Cabrelles et al., 2010) basado en estudios anteriores es una alternativa equivalente a multi-imágenes tanto en precisión como en calidad; por lo que es un excelente método para representar modelos 3D.



Figura 11: Vista rápida de una escena de la caverna Jumandi

Los sistemas de escaneo láser permiten modular los estilos de escaneo dependiendo de las necesidades del proyecto en ajustes que van desde el ángulo toma de puntos, la resolución, el tiempo, la calidad, el color para hacer que el modelo se vea mucho más natural, a partir de la nube de puntos obtenida se debe reconstruir la

superficie de dichos puntos por lo que se requiere un tratamiento posterior en programas que generen modelos 3D. (Corso, 2011)

2.3.1. Trimble TXD 3D Láser Scanner

El escáner láser de Trimble TX5 es versátil y revolucionario su uso está condicionado para una amplia variedad de aplicaciones de exploración; permite medir objetos y superficies complejas de forma rápida, sencilla y precisa, captura objetos a una alta velocidad de medición en un máximo de 976.000 puntos de medición por segundo

El equipo tiene un diseño ligero, una interfaz integrada y fácil de usar; controlado por una pantalla táctil pero también es posible manejarlo a través de WLAN mediante un ordenador portátil externo, así como directamente a través de una conexión de cable físico. La **Figura 12** muestra el escáner que está equipado con una cámara de color interno y las nubes y las imágenes de puntos capturados se guardan en la tarjeta de memoria SD insertada y por lo tanto se pueden transferir fácilmente a un PC. La fuente de alimentación se efectúa por medio de una batería interna o una fuente de alimentación externa. (Trimble Navigation Limited, 2012)



Figura 12: Láser

Fuente: (Trimble Navigation Limited, 2012)

2.3.2. Características

Los modelos 3D generados a partir del escaneo láser permiten mostrar estructuras mucho más realistas que las bidimensionales, tal como la **Figura 13** que muestra las características:



Figura 13: Características de Trimble TXD 3D Láser Scanner

Fuente: (Trimble Navigation Limited, 2012)

El equipo Trimble TXD 3D Láser Scanner permite generar documentos conforme a obra, realizar estudios topográficos, modelar estructuras de construcción conforme a su avance, modelar estructuras arquitectónicas y crear modelos CAD por ingeniería inversa. (Mañana et al., 2008)

Dentro de las principales ventajas y desventajas que se encontraron al desarrollar el presente proyecto se tienen las que se detallan en **Tabla 2** a continuación:

Tabla 2:

Ventajas y desventajas del equipo Trimble TXD 3D Láser Scanner

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Una tecnología rápida y fiable para capturar situaciones reales complejas	Interoperabilidad de los datos
Información tridimensional completa de las condiciones reales	Coste de Adquisición
Minimización de riesgos en proyectos cuyo acceso es difícil y con planes estrictos	Utilización de Softwares específicos con licencias pagadas

Fuente: (Trimble Navigation Limited, 2012)

El uso de sistemas escáner láser forma parte de un conjunto de avances tecnológicos para el levantamiento de datos tridimensionales (3D), que se caracteriza principalmente por capturar una gran cantidad de puntos en un período corto de

tiempo proporcionando geometrías con alta precisión y obteniendo representaciones bastantes fieles de los elementos en un formato 3D.

2.4. AMBIENTES VIRTUALES

La realidad que se percibe del mundo físico y sensorial es una reconstrucción que hace el cerebro a partir de estímulos sensoriales y la memoria, para estimular la corteza cerebral y crear nuevas condiciones; es por ello que en el año 1965 el científico Iván Sutherland se aventuró a crear varias pruebas de ambientes 3D interactivos a través del uso del computador, gafas estereoscópicas y sensores en la cabeza que servían para la orientación; luego la Universidad de Carolina del Norte con el Proyecto GROPE en el año 1967 realizaron los mismos desarrollos pero agregándole retroalimentadores de fuerza que permitían tocar físicamente objetos dentro del ambiente, posterior a eso la NASA a través de la creación del sistema VIEW en 1984 incorporó a los ambientes virtuales el reconocimiento de voz y sonido 3D, a partir de entonces se han ido modificando y haciendo cada vez más reales estos ambientes interactivos (Díaz, 2011)

2.4.1. Definición

El término realidad virtual fue acuñado por Jaron Lanier en 1986 con la creación de espacios 3D virtuales e inmersivos en donde se personifica avatares que muestran aspectos de la realidad conocida. (Díaz, 2011)

Para (Ramos, 2007): “Los ambientes virtuales inmersivos son espacios tridimensionales, reales o imaginarios, generados por computadora, con los que el usuario puede interactuar y que le producen la sensación de estar dentro de un ambiente o lugar”; ahora bien los ambientes virtuales no inmersivos carecen de la sensación de presencia pero le dan al usuario la posibilidad de acceder a espacios tridimensionales con escala real; es por ello que la mayor ventaja de los ambientes virtuales es acceder a espacios inaccesibles o con riesgo, permitiéndole al sujeto sentirse dentro del sitio de interés inclusive desde la comodidad de su hogar, lo que permite analizar y relacionar resultados desde otros puntos de vista.

Los desarrollos en esta área de investigación se han focalizado en temáticas como: diseño 3D en la industria aeronáutica, entrenamiento en maniobras militares,

operaciones en el espacio. Varios científicos entusiastas creyeron que en siglo XXI todos los hogares contarían con esta tecnología pero por cuestiones de mercado, costo y tecnología no ha podido ser así; sin embargo sus fundamentos son utilizados en mundos georeferenciados (Google View Map), pantallas 3D, realidad aumentada, computación gráfica y sonido 3D entre otros; en la actualidad los principios de la realidad virtual se encuentra dentro de muchos dispositivos que están a la mano de una enorme cantidad de población. (Díaz, 2011), como se muestra en la **Figura 14**

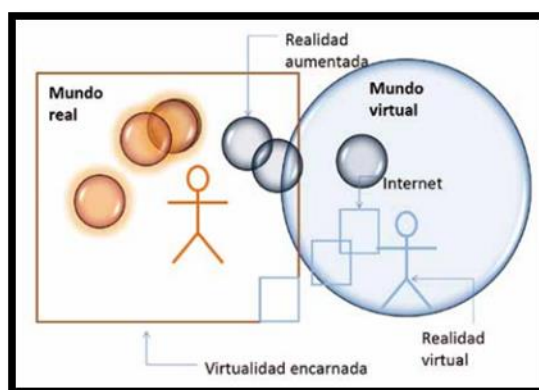


Figura 14: Esquema de realidad Virtual

Fuente: Inmersión mental y realidad virtual (Díaz, 2011)

2.4.2. Aplicaciones de la Realidad Virtual

La realidad virtual puede compararse a soñar con los ojos abiertos, permite al usuario ser transportado hacia un mundo paralelo; actualmente esta tecnología se relaciona principalmente con videojuegos pero es una de las diversas áreas en las que se utilizará, tal como se muestra en la **Tabla 3** a continuación:

Tabla 3:
Aplicaciones de realidad virtual

ÁREA	APLICACIÓN
MEDICINA	Exponer gradualmente al paciente a la situación que le genera pánico, reduce la depresión
	Animar a moverse a pacientes con discapacidades.
	Conocer con antelación los niños a las parejas cuando estos todavía se encuentran en el útero de la madre

Fuente: (Biocca, 2017) (Flores et al., 2014)

La posibilidad de reconstruir el mundo real, creando escenarios digitales tan realistas que permitan al usuario transportarse en segundos a mundos fantásticos, ha

cautivado a empresas como Samsung, Sony, HTC y Valve, quienes han desarrollado distintas gafas de realidad virtual, aunque las aplicaciones disponibles para el mercado masivo están aún desarrollándose. (Biocca, 2017)

2.4.3. Usos en espeleología

La realidad virtual potencia notablemente la experiencia espeleológica en tal virtud se ha desarrollado algunas investigaciones y animaciones que permiten a los usuarios interactuar con estos ambientes, tales como:

- **Reconstrucción en 3D de cuevas del Oriente Asturiano:** El proyecto busca poner al alcance de la población en general y de los técnicos en arqueología alrededor 20 cuevas prehistóricas que pueden ser disfrutadas en un recorrido virtual. El proyecto está liderado por el Grupo de Investigación Tecnologías de la Información para la Documentación del Patrimonio (TIDOP) de la Universidad de Salamanca (USAL), dirigido por Diego González Aguilera, doctor en el Área de Ingeniería en Cartografía, Geodesia y Fotogrametría (García A. , 2011)
- **Técnicas de virtualización en yacimientos de Caravaca y Moratalla:** El proyecto pretende virtualizar el patrimonio, para ello se emplea una serie de técnicas y software que permiten obtener la geometría real de cualquier yacimiento. Este proceso y sus postprocesados incluyen: el manejo de la cámara, la fotogrametría, ortoimágenes o planimetrías, obtención de nubes de puntos, generación de mallas, aplicaciones de texturas, texturizados fotorrealistas, animaciones, video documentales, videojuegos, para finalmente obtener la realidad virtual. (Salcedo, 2013)
- **Cuevas de Gomantong:** Proyecto financiado por la Sociedad Nacional de Geografía y dirigido por un grupo de académicos internacionales que pretende escanear en alta precisión con el FARO Focus 3D las cuevas de Gomantong en Borneo para obtener y generar el ambiente virtual de las entrañas de este complejo sistema de cavernas. (FARO Europe, 2014)
- **Cueva Altamira:** El proyecto SIGAREP pretende aplicar la creciente tecnología 3D en Altamira para encontrar nuevas pinturas rupestres en el Castillo y en otras cuevas de la meseta. El proyecto abarca tres objetivos

principales de los cuales uno es obtener un modelo en 3D de toda la cavidad a escala real. (Tristán, 2014)

- **El Monasterio de las Cuevas en 3D:** Proyecto auspiciado técnicamente con la empresa Leica Geosystems que pretende levantar el monasterio de las Cuevas de Kiev, paraje único en el mundo, mismo que se compone de un complejo de edificios religiosos erigidos en superficie y de una parte subterránea formada por cuevas. Actualmente, se está empleando el sistema de Leica Scan Station y estaciones totales para documentar este patrimonio cultural de la humanidad de la UNESCO, proceso que después del modelado obtendrá en espacio virtual. (Leica Geosystems, 2009)
- **VR Cave Flythrough:** Aplicación estilo videojuego que permite acceder al espacio de una cavidad subterránea irreal llena de sorpresas y fantasía, es descargable gratis en Playstore (Baboon Experience, 2017)

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

3.0. RESUMEN

El presente capítulo pretende explicar de manera detallada el procedimiento a seguir para realizar el escaneo, la unión, depurado y modelado de la nube de puntos, en esta investigación se aplicó el método experimental con una fase tanto de gabinete como de campo en donde se planificaron los procesos para la toma de los datos y el control del calidad que permitieron generar los resultados propuestos de los cuales se desprenden los ambientes virtuales.

3.1. ESQUEMA DE TRABAJO Y RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

La recopilación de información e insumos necesarios para la elaboración del proyecto incluye la revisión bibliográfica del estado del arte, contacto con los técnicos para la coordinación del equipo y las facilidades para acceder al software de procesamiento; la metodología a seguir se muestra a través de un diagrama de flujo en la **Figura 15** según Santana, (2008), el procedimiento con un escáner láser terrestre en resumen debe contener:

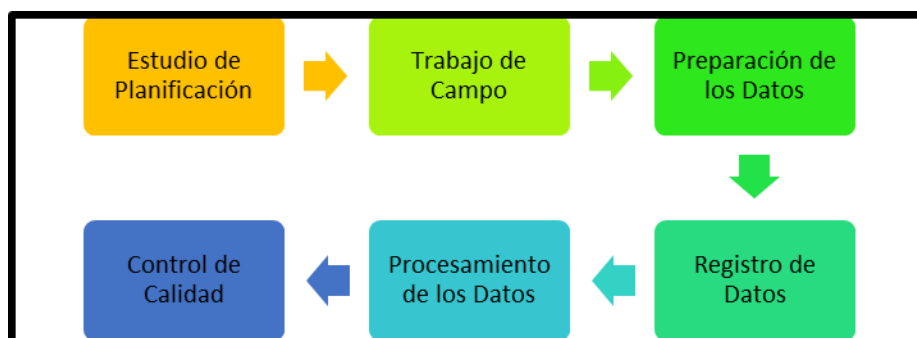


Figura 15: Esquema de Trabajo

Fuente: Teoría y práctica del escaneo láser. Material de aprendizaje en aplicaciones prácticas. (VLAAMS , 2008)

Se requiere tener conocimiento acerca del manejo del equipo tanto como del procesamiento y control de calidad; una vez procesados los datos en cuanto a la nube

de puntos se debe realizar un mallado, luego texturizar el entorno, llenar vacíos de información, eliminar posibles errores y posteriormente realizar el ambiente virtual de cada caverna ofreciendo así un producto final acorde a los propuesto, en tal virtud se utilizan diversos programas detallados a continuación.

3.2. ESTUDIO DE PLANIFICACIÓN

Según (Santana et al., 2008) para realizar este escaneo terrestre se debe cumplir como mínimo los siguientes puntos:

3.2.1. Determinar los Objetivos del escaneo

En esta etapa se deben definir dos aspectos que darán como resultado el cálculo promedio de la intensidad de captura

- Requerimientos del proyecto: Generar los ambientes virtuales de cuatro cuevas ubicadas en territorio nacional con el objetivo de dar a conocer y preservar su riqueza escénica.
- Documentos a entregar:
 - (1) Manual de captura, procesamiento y generación de los ambientes virtuales
 - (1) Listado de coordenadas estandarizadas de las cuevas en estudio
 - (1) Cuadro de control de calidad
 - (4) Modelos tridimensionales virtuales de las cuevas en estudio
 - (1) Un artículo científico publicable

Para lograr un producto final en óptimas condiciones y por el difícil acceso que existe hacia las cavernas se realizó los escaneos a diferentes intensidades de captura lo cual modificó también el tiempo de toma en cada cueva como se muestra en la

Tabla 4

**Tabla 4:
Datos de Escaneo por Caverna**

Cuevas en Estudio	Resolución de Captura	Calidad	Tiempo de Toma (MM:SS)	Puntos por Escena
Cavernas de Jumandi	1/8	6X	10:23	5120x2134
Gruta de la Virgen	1/4	4X	7:48	8192x3414
Cueva Elviandi	1/5	6X	21:33	8192x3414
Cueva El Castillo	1/4	3X	6:48	10240x4267

Fuente: Pantalla del equipo Trimble TXD 3D Láser Scanner

3.2.2. Análisis del área a levantar

En esta etapa es recomendable conocer el área de levantamiento por lo cual se realizó una visita exploratoria, es necesario destacar que al ser cavernas esta tecnología es perfecta para ser utilizada ya que es muy efectiva en estructuras complejas

- **Toma de Puntos GPS**

Una vez en la entrada a las cuevas se procedió a tomar las coordenadas de ubicación de las mismas con la ayuda de un GPS navegador como se detalla en la **Tabla 5**a continuación:

Tabla 5:
Coordenadas de Ubicación por Caverna

Cuevas en Estudio	Coordenadas Geográficas (WGS84)	
Cavernas Jumandi:	0° 52' 29.19" S	77° 47' 24.27" O
Gruta de la Virgen	1° 1' 43.52" S	77° 48' 3.05" O
Elviandi:	1° 02' 15.76" S	77°48'05.52" O
El Castillo:	1° 1' 24.6" S	77° 48' 7.2" O

Fuente: GPS navegador Magellan Triton 2000

3.2.3. Determinar las técnicas de medición y el equipamiento

Según (Guerrero y Velastegui, 2013) en esta etapa se requiere determinar de forma correcta tanto la posición del escaner como la de los puntos de referencia tal como muestra la **Figura 16** ya que de esta planificación se podrá obtener el resultado deseado si se lo hace tomando las consideraciones correctas.

Para una correcta colocación de las esferas se debe considerar que el equipo debe tener visual hacia ellas en dos sentidos tanto hacia adelante como hacia atrás; situación que facilitará y hará posible el procesamiento de las escenas, logrando un escenario completo del objeto en estudio

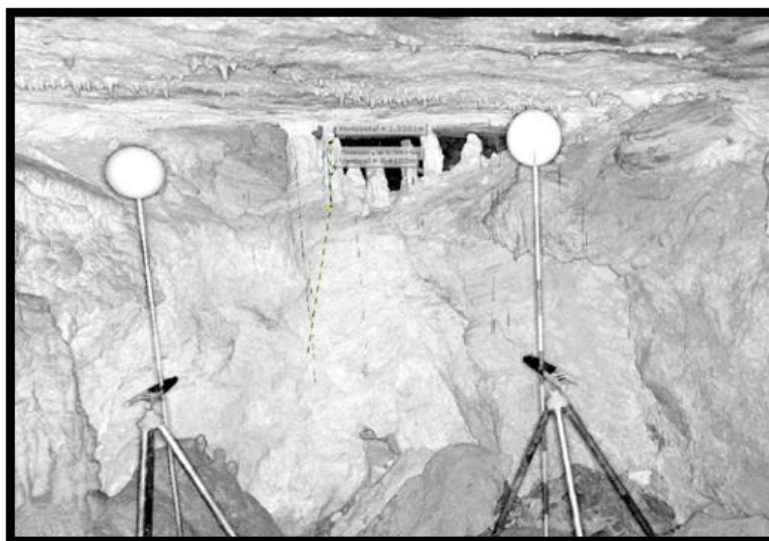


Figura 16: Colocación de las esferas en cueva

3.2.4. Gestión y almacenamiento de los datos

Este parámetro está relacionado con el almacenamiento de los datos capturados mismo que se realiza en dispositivos SD, SDXC™, SDHC™ que permiten la transferencia rápida al computador, el operador debe configurar al equipo enfocándose en la necesidad del proyecto y las características del ambiente en que se va a realizar el escaneo.

3.3. TRABAJO DE CAMPO

De esta fase se desprende la nube de puntos cruda, misma que un posterior proceso de gabinete será depurada y procesada para la obtención del producto final. Se realizó 4 visitas de campo para los escaneos de las cuevas en estudio como se indica en la **Tabla 6** a continuación:

Tabla 6:
Datos de Escaneo por Caverna

Cuevas en Estudio	Fecha	Días	Técnico
Jumandi:	12/9/2016	3	Andrea Zambrano
Gruta de la Virgen	16/3/2015	1	Juan Sani
Elviandi:	8/7/2016	1	Andrea Zambrano
El Castillo:	17/3/2015	1	Juan Sani

- **Proceso de Levantamiento:** Una vez dentro de la caverna se requiere seguir estos pasos:
 1. Posicionar el trípode colocándolo en lugar estable y extender las patas.
 2. Colocar la base nivelante sobre el trípode y ajustarla con los seguros
 3. Colocar el escáner verificando previamente que tenga la batería y la tarjeta SD, nivelar el escáner moviendo ligeramente dos de las patas del trípode hasta que la burbuja quede al interior del círculo

3.4. PREPARACIÓN Y REGISTRO DE LOS DATOS

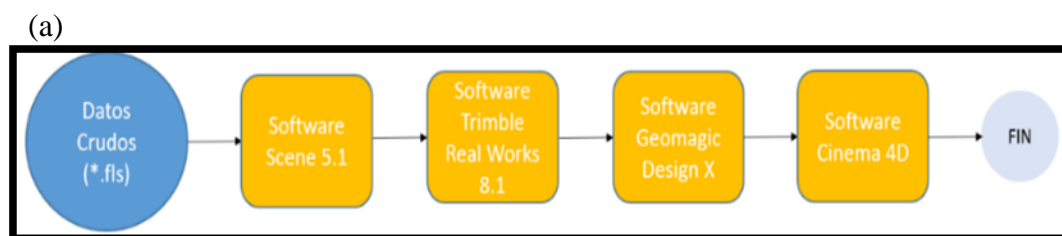
Ajustes del Escáner

En esta etapa se coloca los ajustes necesarios para empezar el escaneo tal como se detalla en el **ANEXO 6.1** El escaneo se realiza de forma automática se coloca las esferas y se toma puntos de referencia.

3.5. PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

Esta etapa propone el flujo de trabajo en concreto seguido en este proyecto que dio como resultado la generación de ambientes virtuales, tal como se muestra la **Figura 17**

El procesamiento empieza con los datos crudos resultantes del escaneo con formato .fls; a continuación se utiliza una serie de programas que se detallan en el literal (a), el proceso ampliado se detalla en el literal (b) de la figura a continuación:



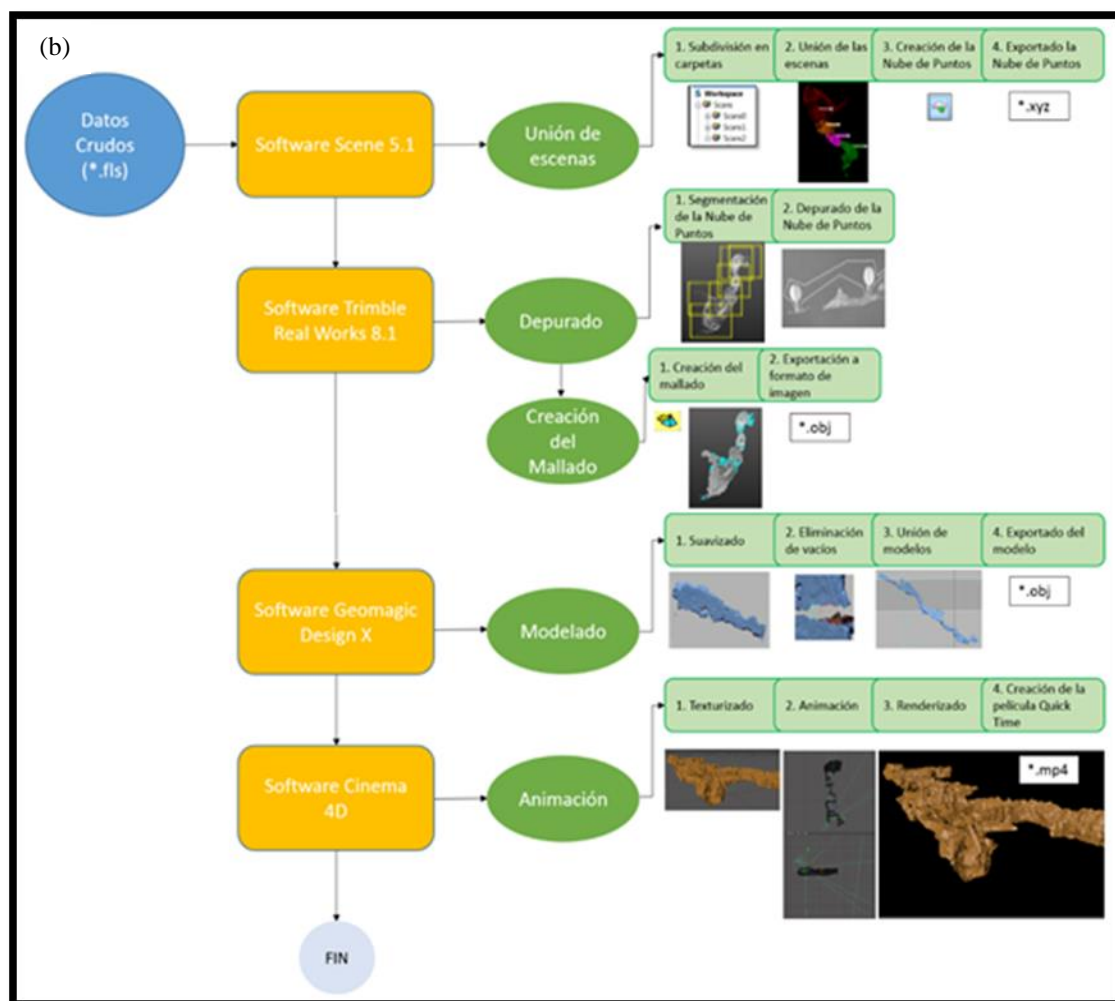


Figura 17: Flujo de trabajo para el procesamiento de los datos

Esta etapa incluye la representación de la nube de puntos, la unión de las escenas, la depuración de los datos, la creación del mallado, la exportación a los formatos requeridos y por último el modelado 3D de superficies complejas con la eliminación de vacíos, suavizado, relleno, entre otros, para como etapa final generar los vídeos del ambiente virtual obtenido.

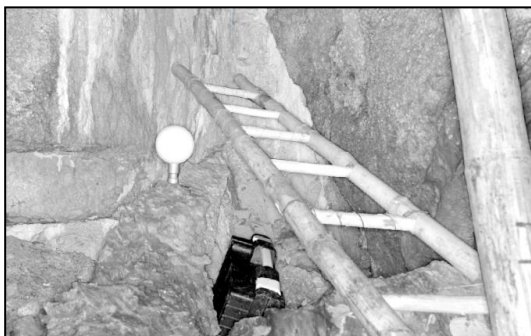
Para el procesamiento de los datos se utilizó el programa SCENE 5.1 y Trimble Real Works 8.0 ambos con licencia autorizada del Instituto Espacial Ecuatoriano.

En gabinete se deben revisar los datos de captura obtenidos, revisar los croquis y también es recomendable sacar una copia a los archivos originales para empezar el procesamiento tal y como se detalla en el **ANEXO 6.2**, a continuación se explica de forma breve el proceso a seguir en los softwares de procesamiento:

Procesamiento en el programa SCENE 5.1

El programa SCENE 5.1 permite representar la nube de puntos de cada cavidad subterránea en diversos tipos de vista tal como se muestra en la **Figura 18**:

(a) Vista Rápida



(b) Vista Planar



(c) Vista 3D



Figura 18: Tipos de vista de la nube de puntos en SCENE 5.1

El programa SCENE 5.1 permite al usuario importar los datos, unir todas las escenas de forma manual y automática y posteriormente exportarlos para su adecuado procesamiento. Los archivos escaneados poseen la extensión (*.fls) propia de Trimble, que una vez importados y cargados, se debe seguir el siguiente proceso:

- Subdivisión en carpetas
- Unión de las escenas
- Creación de la Nube de Puntos
- Exportar la Nube de Puntos

Procesamiento en el programa Trimble Real Work8.0

El programa Trimble Real Work8.0 permite al usuario manejar una gran cantidad de herramientas que para el caso de las cavidades subterráneas en estudio son la importación del formato (*.XYZ), subdivisión, depurado, muestreo, creación del mallado y exportación a formatos (*.obj) que permitan modelar los datos 3D; se debe seguir el proceso que se detalla a continuación:

Se abre el programa y se carga la nube de puntos; este proceso toma varios minutos.

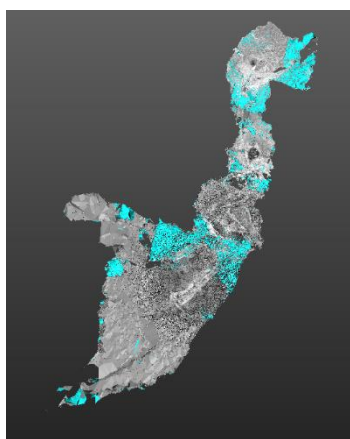
Una vez importados y cargados, se debe seguir el siguiente proceso:

- Segmentación de la Nube de Puntos

Se da clic en la herramienta “Segmentación” que va a servir para subdividir la nube en polígonos más pequeños para hacerla de esta forma más manejable al momento de editar. **Figura 19**

- Depurado de la Nube de Puntos
- Creación del mallado

Vista Superior



Vista Lateral

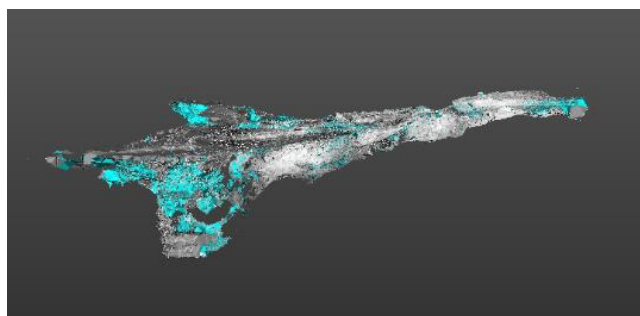


Figura 19: Vista en el Programa Real Trimble Works 8.0

- Exportación a formato (*.obj)

Nota Aclaratoria: Las imágenes visualizadas en este apartado fueron capturadas por la autora del proyecto durante el desarrollo del mismo.

3.6. CONTROL DE CALIDAD

Esta etapa cuida que los resultados obtenidos cumplan con todas las condiciones planteadas en gabinete dentro de la planificación, por ello se realizaron mediciones para comparar datos in situ con respecto a lo obtenido en el escaneo.

El muestreo se realizó de forma aleatoria con cinco repeticiones para obtener una media más cercana a la realidad, dado que un observador que haga varias veces la misma medida, no obtendrá en general el mismo resultado; según (Taylor, 1982) puede bastar con 4 o 5 mediciones; ahora bien para estimar el error generado de las mediciones obtenidas de acuerdo con la teoría de Gauss se calcula la diferencia en las medidas (Sevilla, 2017) para cada una de las observaciones con respecto a la media que está definido por: $\Delta\varepsilon = \bar{X}_p - \bar{X}_C$; donde se dice que el diferencia de error = media de las observaciones en el programa – media de las observaciones en campo.

El resultado del experimento se expresa: $(x\varepsilon) \pm \sigma\varepsilon$; mismo que permite validar la bondad del modelo generado a través del cálculo de los estadísticos.

Ahora bien adicional a la validación del modelo, se pretende contrastar los datos obtenidos por el escáner con respecto a la distribución observada en campo, para este proceso se utilizó la prueba de hipótesis ji-cuadrado que permite comparar proporciones

- **Determinar el tamaño de la muestra**

Para (Laguna, 2014) todas las pruebas de significación estadística con ji cuadrado son aproximadas, es decir, se aproximan tanto mejor a la exactitud cuanto mayor es el tamaño de la muestra, este caso aplica para elementos finitos e infinitos.

Por otro lado según (BIOTIC, 2017) para valores grandes de n, la distribución ji cuadrado se aproxima a la distribución normal, en donde la aproximación se considera aceptable para muestras de $n \geq 30$, tal como lo muestra la **Figura 3.5**

Sean n variables X_1, X_2, \dots, X_n , de donde se define la variable aleatoria X como:

$$X = X_1^2 + X_2^2 + \dots + X_n^2$$

La variable X aleatoria sigue una distribución ji cuadrado con n grados de libertad (G.L) y varianza: $Var[Xn^2] = n$

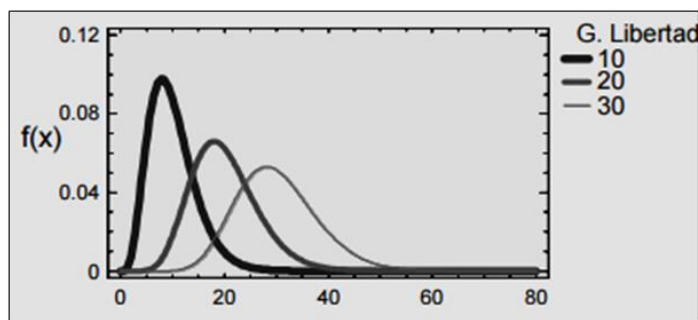


Figura 20: Distribución Ji- cuadrado

Fuente: (BIOTIC, 2017)

Es por ello que el muestreo aleatorio en cada caverna en estudio será de $n = 30$ con la intención de obtener un muestreo significativo y garantizar de esta forma la normalidad de la media que va a ser utilizada tanto para la valoración del modelo como para prueba de hipótesis ji-cuadrado.

- **Prueba de hipótesis ji- cuadrado**

La prueba de hipótesis ji-cuadrado de Pearson tiene muchas aplicaciones en inferencia estadística, busca contrastar hipótesis para la comparación de proporciones y requiere un número suficiente de observaciones para ser significativa; según (Laguna, 2014) normalmente se aplica para analizar datos y observaciones en cada categoría para variables:

- Cualitativas o categóricas
- Compara proporciones o porcentajes en grupos independientes

En el presente estudio ji cuadrado tiene como primera utilidad hacer una comparación para observar si la distribución observada en campo y software corresponde con la distribución esperada.

Según (Aimar, 2011) para aplicar este estadístico se debe seguir los siguientes pasos que aplicados al estudio son:

1. Formular una H_1 y una H_0

H_0 = La distancia lineal medida por el escáner es la misma que la distancia lineal medida en campo.

H_1 = La distancia lineal medida por el escáner no es la misma que la distancia lineal medida en campo.

Nivel de significancia (α) de 5%

2. Obtener la distribución de la muestra (análisis de los datos obtenidos)

Para los ambientes virtuales se escanearon cuatro cavidades subterráneas ubicadas en los cantones Archidona y Tena de la provincia de Napo, de donde aleatoriamente se eligió una muestra de $n = 30$, para cada elemento se realizaron 5 mediciones con la finalidad de promediar la medición de esta forma: $\bar{x} = (x_1 + x_2 + \dots + x_n)/n$

Se utilizó como referencia los datos obtenidos del escaneo en el programa de procesamiento Escene 5.1 que permite realizar mediciones gracias a su herramienta “Measure between scan points” estos datos fueron contrastados con los obtenidos en campo mismos que fueron medidos con metro láser y cinta métrica.

El muestreo en campo se realizó en tres cuevas que son: Jumandi, Castillo, la Gruta de la virgen santísima; en la cueva Elviandi no se realizó el muestro debido a cierre temporal por el invierno.

3. Calcular el estadístico X^2

La expresión para ji cuadrado es la siguiente:

$$X^2 = \sum \left(\frac{(\text{observado} - \text{esperado})^2}{\text{esperado}} \right)$$

Nota: las respectivas tablas de cálculo se muestran en resultados.

Se calculan los grados de libertad (G.L) de la tabla de contingencia

$$G.L = (\#Filas - 1) \times (\#Columnas - 1)$$

$$G.L = (2 - 1) \times (30 - 1) = 29$$

A continuación se busca en la tabla de distribución de probabilidad de X^2 para un nivel de significancia determinado y una cantidad X de G.L (Valor Crítico), como se muestra en la **Figura 21**

v/p	0,001	0,0025	0,005	0,01	0,025	0,05	0,1
1	10,8274	9,1404	7,8794	6,6349	5,0239	3,8415	2,7055
2	13,8150	11,9827	10,5965	9,2104	7,3778	5,9915	4,6052
3	16,2660	14,3202	12,8381	11,3449	9,3484	7,8147	6,2514
4	18,4662	16,4238	14,8602	13,2767	11,1433	9,4877	7,7794
5	20,5147	18,3854	16,7496	15,0863	12,8325	11,0705	9,2363
25	52,6187	49,4351	46,9280	44,3140	40,6465	37,6525	34,3816
26	54,0511	50,8291	48,2898	45,6416	41,9231	38,8851	35,5632
27	55,4751	52,2152	49,6450	46,9628	43,1945	40,1133	36,7412
28	56,8918	53,5939	50,9936	48,2782	44,4608	41,3372	37,9159
29	58,3006	54,9662	52,3355	49,5878	45,7223	42,5569	39,0875

Figura 21: Tabla de distribución de probabilidad de χ^2

Fuente: (Instituto de Física, 2016)

4. Tomar una decisión

La **Figura 22** muestra gráficamente la comparación del valor calculado con el valor crítico y si el primero excede al segundo se rechaza la hipótesis nula, ahora bien en el caso de que lo esperado y lo observado se diferencien muy poco se acepta H_0 , caso contrario se rechaza.

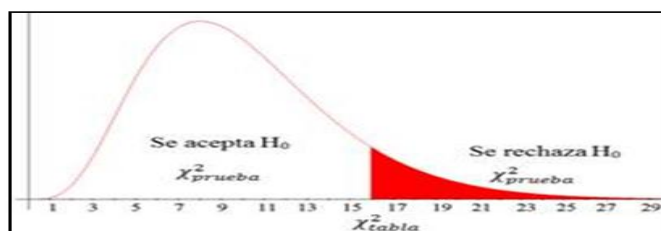


Figura 22: Hipótesis con Chi Cuadrado

Fuente: (Instituto Tecnológico de Chihuahua, 2017)

3.7. GENERACIÓN DEL AMBIENTE VIRTUAL

- **Generación de los Modelos 3D**

Una vez procesada la nube de puntos tanto en la unión de las escenas como en el proceso de depurado de las mismas el software Trimble Real Works 8.0, permite crear un mallado y exportarlo en archivos de imagen .OBJ, tal como se muestra en el **ANEXO 6.2**. Ahora bien para el modelado se utilizó el programa Geomagic Desing X con licencia gratuita de muestra por 15 días y finalmente para la generación de la animación se utilizó el software CINEMA4D disponible en internet, tal como se muestra en el **ANEXO 6.3**

Los archivos .OBJ son formatos 3D que contienen coordenadas, mapas de texturas y otra información del objeto, (Open the file, 2017) es un estándar que puede ser exportado y es aceptado por varios programas de edición, contienen las extensiones que se muestran en la **Tabla 7** a continuación:

Tabla 7:
Datos de Escaneo por Caverna

	obj	Geometría
.OBJ	bmp	Textura
	mtl	Representación

Fuente: Archivos obj (Open the file, 2017)

Procesamiento en el programa CINEMA 4D

Al abrir el programa, después de unos segundos se despliega el entorno del programa que tiene cuatro tipos de vistas que son:

- Importar archivos
- Aplicar textura y color
- Creación de la animación
- Renderizado de la animación

Este proceso **Figura 23** dura varias horas dependiendo del tamaño del archivo y finalmente se obtiene un archivo de video de esta forma:

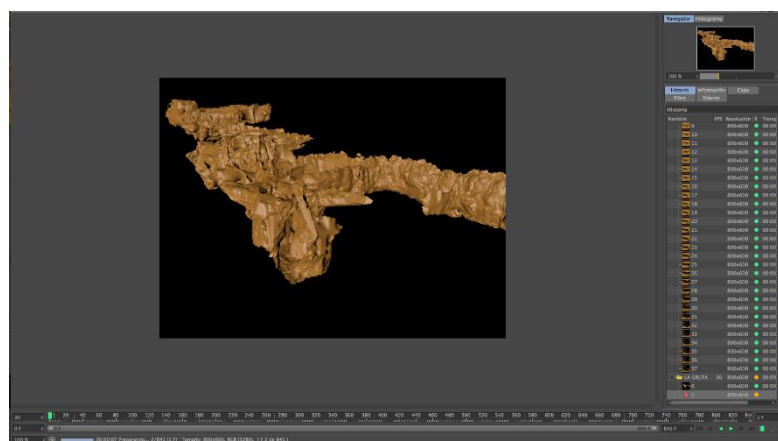


Figura 23: Vista de renderizado

Nota Aclaratoria: Las imágenes visualizadas en este apartado fueron capturadas por la autora del proyecto durante el desarrollo del mismo.

CAPITULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.0. RESUMEN

La implementación de las TIG a través del sistema escáner láser en el país genera innovadores proyectos, en lo que conlleva a estudios que hayan utilizado esta tecnología en cavernas en el oriente del Ecuador el presente estudio es el primero en donde se escanearon cuatro cuevas que son Jumandi, Elviandi, Castillo, y la Gruta de la virgen santísima, los resultados mostrados a continuación tienen como objeto dar al lector la posibilidad de visualizar y valorar los procesos seguimos hasta la obtención del ambiente virtual de las cavidades subterráneas en estudio.

4.1. RESULTADOS POR PROGRAMA UTILIZADO

Una vez realizado el escaneo como resultado se obtiene una carpeta por cada escaneo con formato *.fls de trimble para LIDAR, de los cuales se desprenden los datos crudos que se muestran en la **Figura 24** a continuación:

Nombre	Fecha de modifica...	Tipo
FARO_L54255_054.fls	08/06/2017 9:26	Carpeta de archivos
FARO_L54255_055.fls	08/06/2017 9:26	Carpeta de archivos
FARO_L54255_056.fls	08/06/2017 9:26	Carpeta de archivos
FARO_L54255_057.fls	08/06/2017 9:26	Carpeta de archivos
FARO_L54255_058.fls	08/06/2017 9:26	Carpeta de archivos

Figura 24: Datos crudos resultantes del escaneo

La generación de los ambientes virtuales en las cavidades subterráneas se logra en base a un desarrollo manual validado con respecto al escaneo, en cada una de las aplicaciones y programas utilizados; es por ello que para mostrar los resultados la **Figura 25** sirve de guía sobre el flujo de trabajo detallado a continuación:

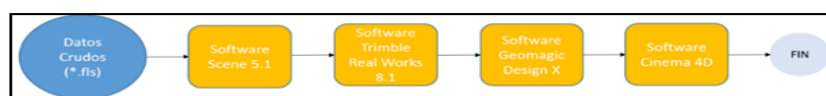


Figura 25: Flujo de programas utilizados en el proyecto

4.1.1. PROGRAMA SCENE 5.1

El resultado de este procesamiento generó la geometría de cada de una de las cavidades subterráneas unidas, de las cuales se desprenden varios formatos de visualización de la nube de puntos y para la exportación se utilizó el formato *.xyz que conserva la mayor cantidad de puntos para el modelado.

Cavernas Jumandi

Las cavernas turísticas Jumandi están ubicadas cerca de Cotundo en la provincia de Napo, posee varias galerías y pasajes de las que se logró recabar la estructura principal y el pasaje turístico, con una longitud de 1100m aproximadamente que fueron escaneados en 3 días en donde se realizaron 66 escenas (7.63Gb) mismas que para ser unificadas fueron importadas al programa Scene 5.1 dando como resultado una nube de 721'121.280 millones de puntos, exportada en formato *.xyz con un tamaño de 34.8 Gb tal como se muestra en la **Figura 26** a continuación:

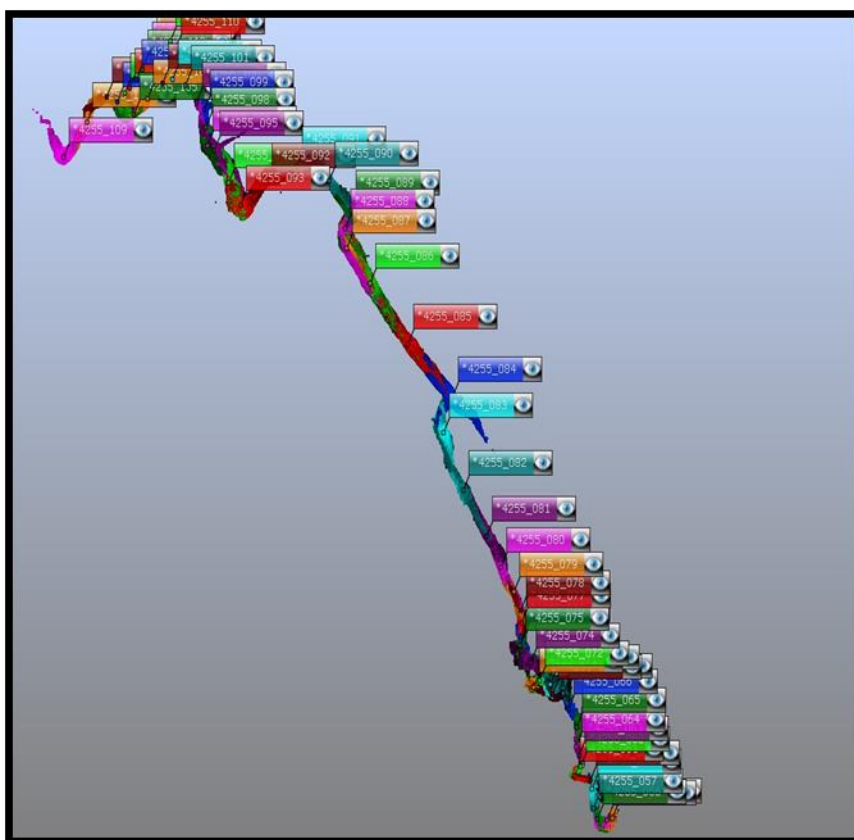


Figura 26: Escenas de escaneo unido de Cavernas Jumandi

Fuente: Pantalla de programa Scene 5.1

Elviandi

La cueva Elviandi está ubicada en el Tena en la provincia de Napo, para ingresar se debe realizar un descenso de alrededor de 7 m, tiene una altura promedio de 1,8 m por lo que es transitable en su mayoría, también cuenta con un tramo al que solo se puede acceder reptando y finalmente posee una importante galería de estalactitas y estalagmitas, tiene una longitud aproximada de 170m, fue escaneada en 1 día, de donde se recabaron 22 escenas (5.12Gb) mismas que para ser unificadas fueron importadas al programa Scene 5.1 dando como resultado una nube de 615'284.736 millones de puntos, exportada en formato *.xyz con un tamaño de 19.4Gb, tal como se muestra en la **Figura 27** a continuación:

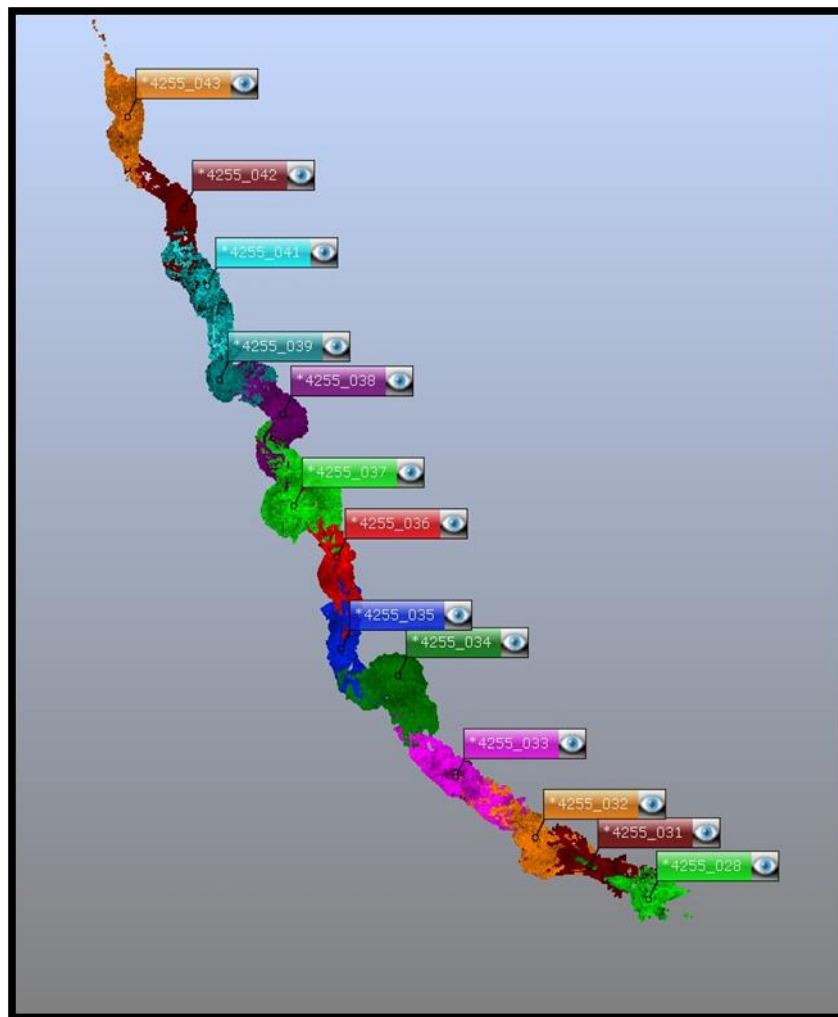


Figura 27: Escenas de escaneo unido de Cueva Elviandi

Fuente: Pantalla de programa Scene 5.1

Cueva El Castillo

Está ubicada en el cantón Tena – Napo es una magnífica cavidad subterránea de la que se escaneo una longitud de 200m aproximadamente se caracteriza por poseer una enorme cantidad de estalactitas y estalagmitas, cientos de murciélagos, arácnidos, grillos y algunas serpientes, fue escaneada en 1 día, de donde se recabaron 38 escenas (3.7Gb) mismas que para ser unificadas fueron importadas al programa Scene 5.1 dando como resultado una nube de 1660'375.040 millones de puntos, exportada en formato *.xyz con un tamaño de 28.0 Gb tal como se muestra en la **Figura 28** a continuación:

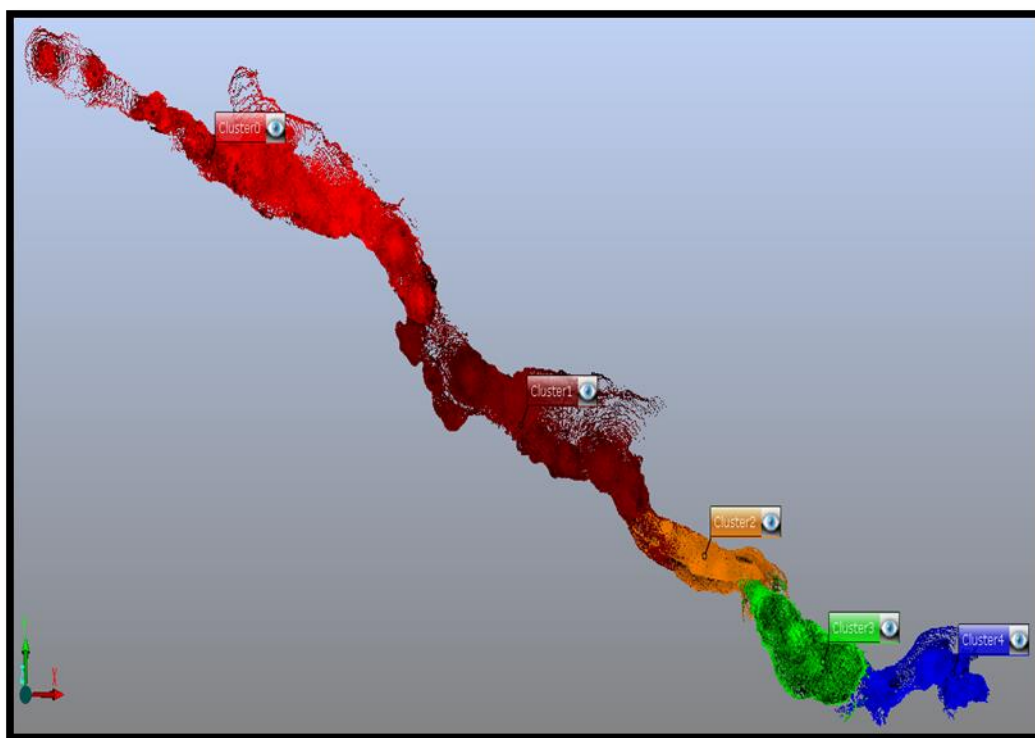


Figura 28: Escenas de escaneo unido de Cueva Castillo

Fuente: Pantalla de programa Scene 5.1

Gruta de la Virgen Santísima

La cavidad subterránea la Gruta de la Virgen se encuentra ubicada en el cantón Tena –Napo a pocos metros de la cueva Castillo, se extiende a lo largo del oriente ecuatoriano en una especie de mágico laberinto de tiene dos accesos, su longitud es de 50m aproximadamente, fue escaneada en 1 día, de donde se recabaron 17 escenas (1.55Gb) mismas que para ser unificadas fueron importadas al programa Scene 5.1

dando como resultado una nube de 475'447.296 millones de puntos, exportada en formato *.xyz con un tamaño de 20.5 Gb tal como se muestra en la **Figura 29** a continuación:

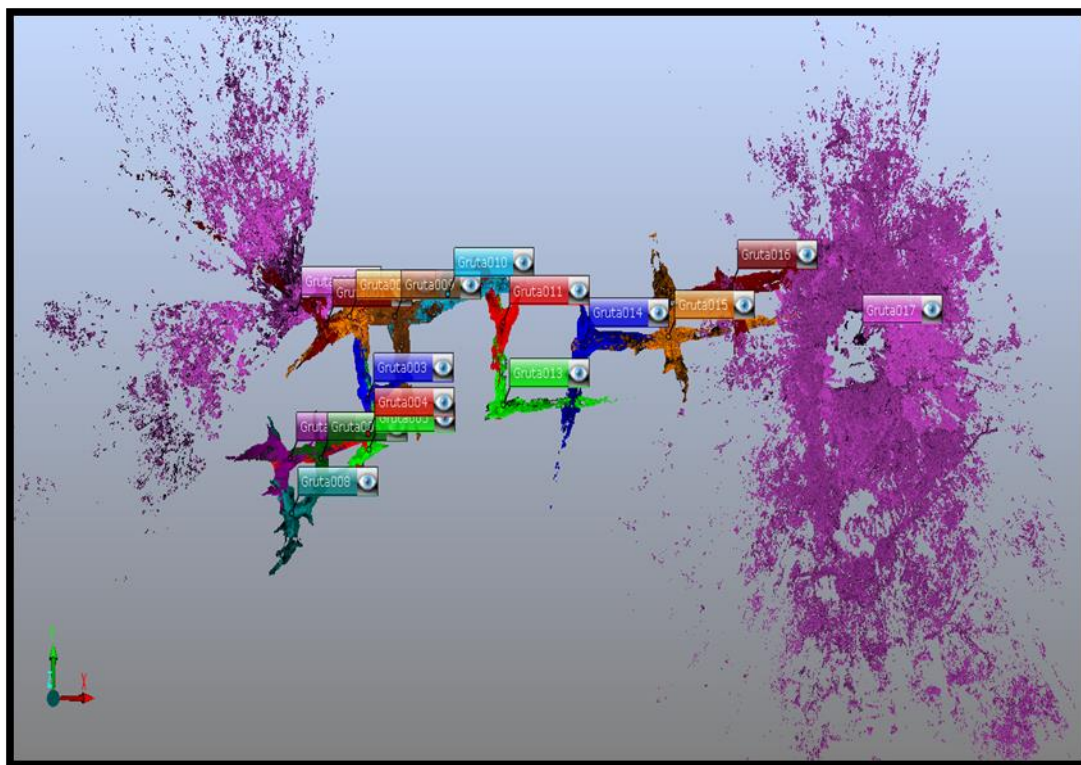


Figura 29: Escenas de escaneo unido de Gruta de la Virgen Santísima

Fuente: Pantalla de programa Scene 5.1

4.1.2. PROGRAMA TRIMBLE REAL WORKS 8.0

Los procesos que se aplican en esta etapa generan archivo en formato de imagen, se empieza subdividiendo la cueva en tramos manejables para ser depurada de los excesos tales como esferas, trípodes, entre otros, de donde resulta una nube de puntos ligeramente más liviana; a continuación se hace un mallado que dependiendo de la calidad, resolución y número de puntos genera los siguientes resultados:

Cavernas Jumandi

Esta cavidad tiene a lo largo del recorrido gran presencia de agua, situación que dificulta en gran medida al mallado, debido a que el escáner refracta el láser con valores de cero o vacío en dichos tramos, por lo que el resultado obtenido en el mallado tiene algunos huecos e imperfecciones que serán resarcidos en el modelado;

el producto obtenido de este proceso tiene un tamaño de 0.97 Gb, tal como se muestra en la **Figura 30** a continuación:

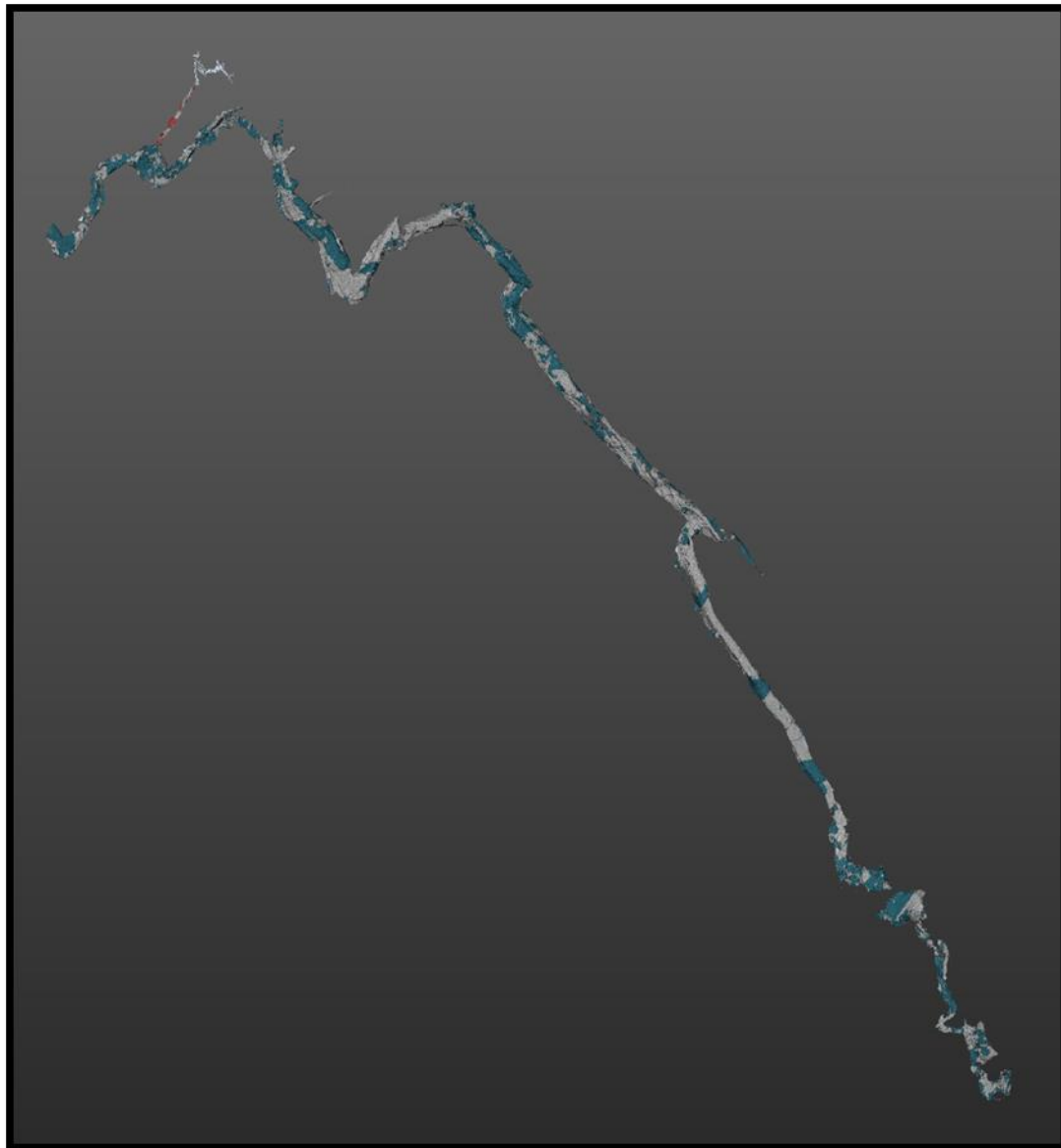


Figura 30: Mallado de Cavernas Jumandi

Fuente: Pantalla de programa Trimble real Works 8.0

Cueva Elviandi

El depurado y mallado de esta caverna da como resultado un archivo de 906 Mb, con pocos vacíos en los tramos de la cueva que se encuentran recubiertos por agua, el resultado es muy preciso y se obtuvo en un periodo relativamente corto de tiempo, tal como se muestra en la **Figura 31** a continuación:

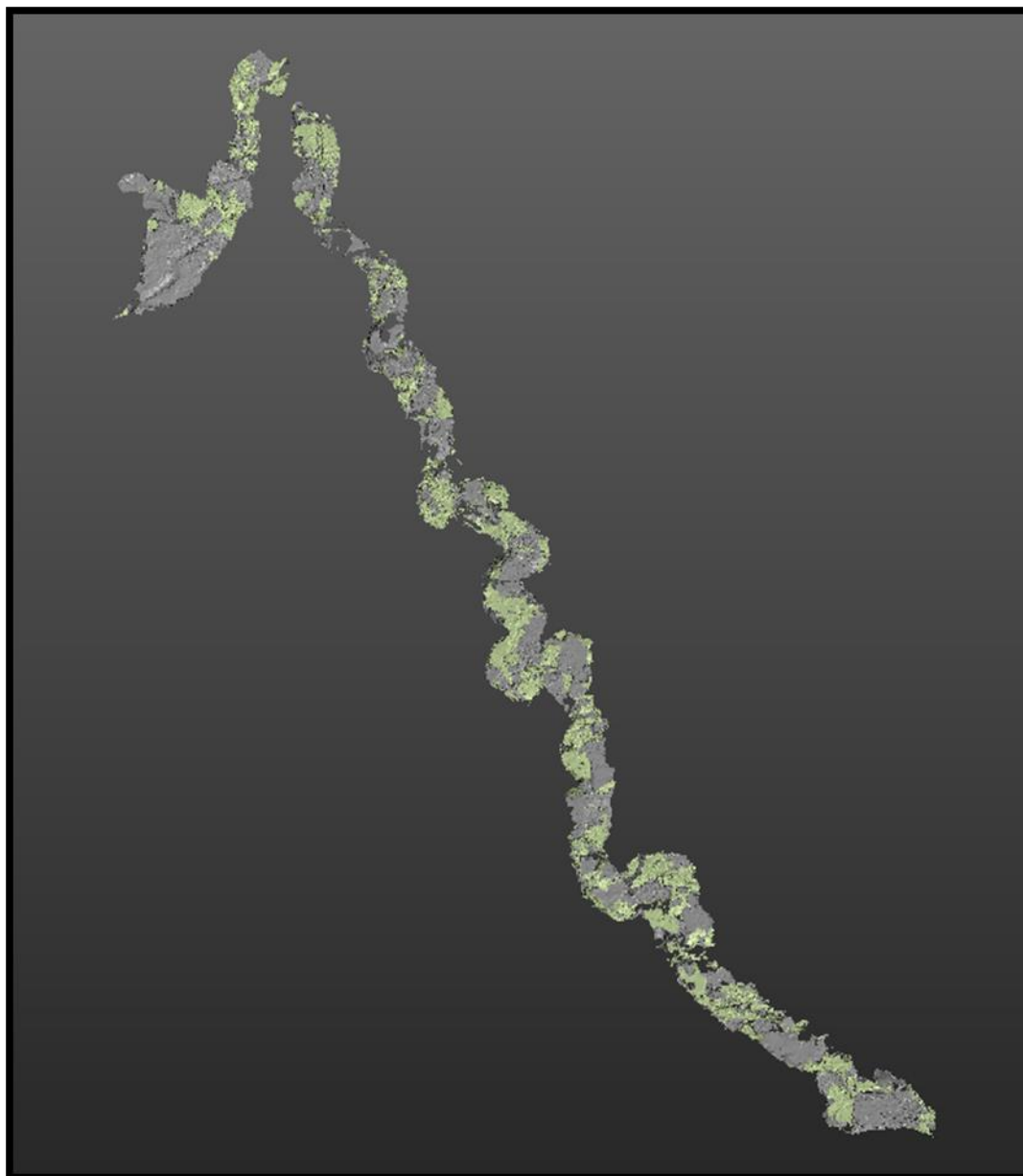


Figura 31: Mallado de Cueva Elviandi

Fuente: Pantalla de programa Trimble real Works 8.0

Cueva El Castillo

El proceso de depurado y mallado de esta cavidad subterránea dio como resultado un archivo de imagen fácilmente manejable para el modelado 3D de 116 Mb, esta cueva no presenta vacíos por refracción de agua, pero tienen algunos huecos en áreas que no fueron escaneadas, tal como se muestra en la **Figura 32** a continuación:

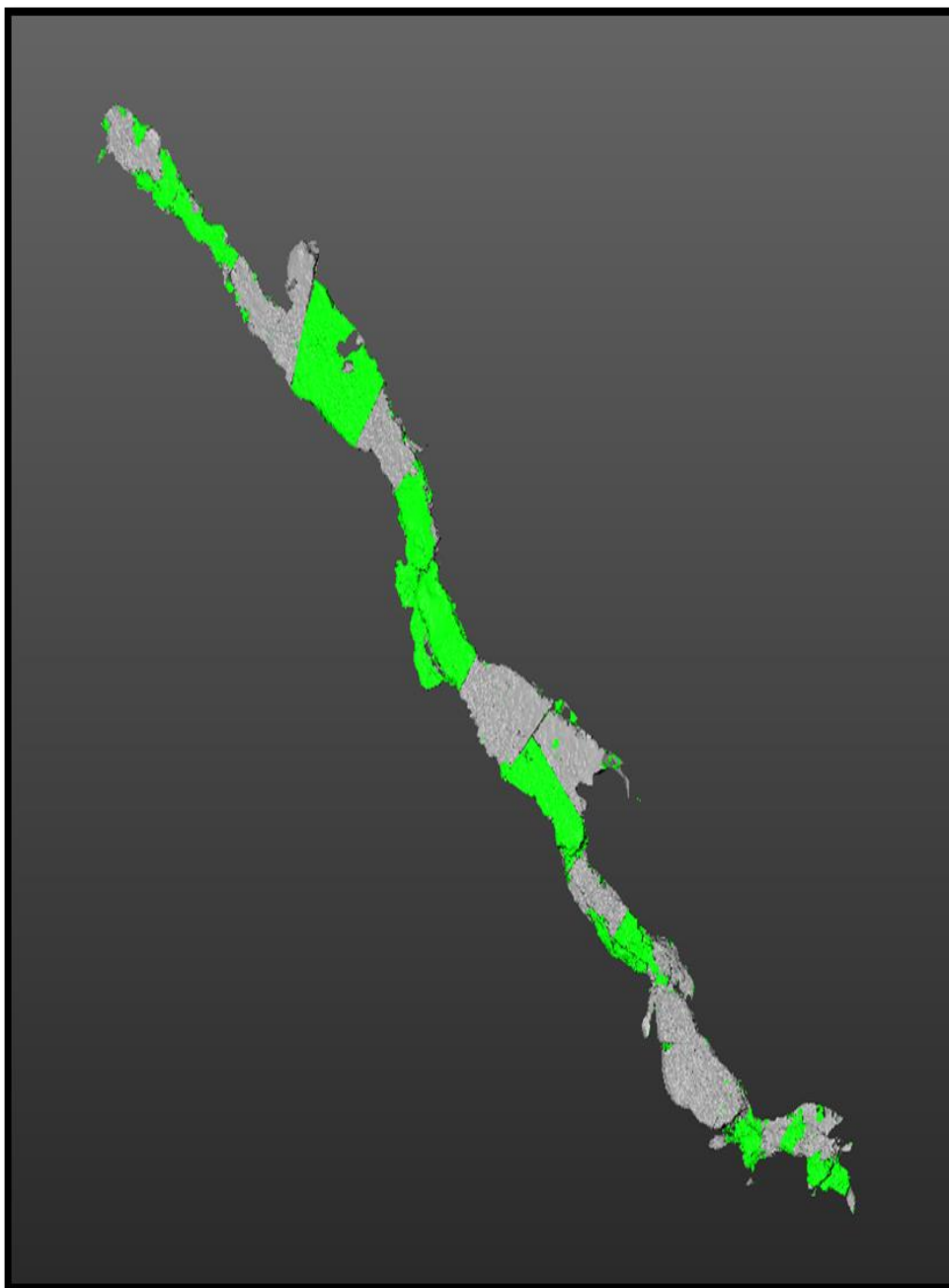


Figura 32: Mallado de Cueva Castillo
Fuente: Pantalla de programa Trimble real Works 8.0

Gruta de la Virgen Santísima

El depurado, mallado y exportación de esta cavidad dio como resultado un archivo de imagen de 125 Mb, el depurado fue tanto más complejo debido a la cantidad de elementos a eliminar, ya que al tener 2 entradas se produjeron más excesos en la nube de puntos, tal como se muestra en la **Figura 33** a continuación:

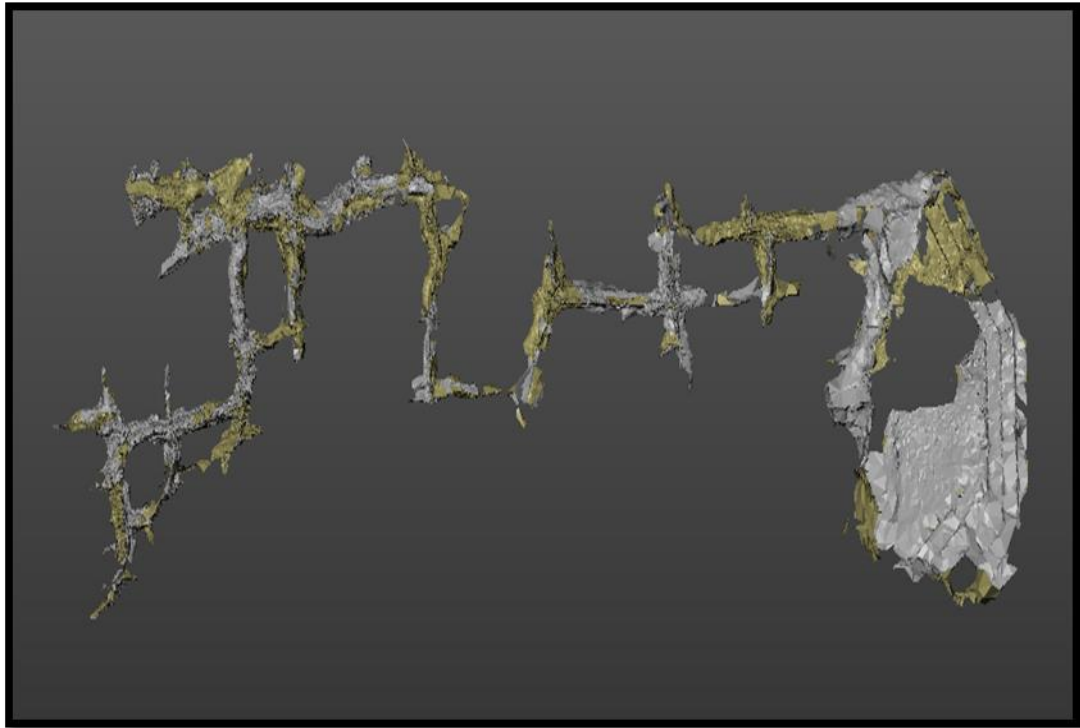


Figura 33: Mallado de Gruta de la Virgen Santísima

Fuente: Pantalla de programa Trimble real Works 8.0

4.1.3. PROGRAMA GEOMAGIC DESIGN X

El programa Geomagic Design X permite el modelado 3D de grandes cantidades de datos, sin embargo para lograr un mejor manejo de la malla debido al tamaño de algunos archivos importados se subdividió a las cavidades subterráneas.

Los archivos importados se muestran en dos colores que representan lo que para el programa son las caras interna y externa de cada archivo, para normalizar las caras se utiliza la herramienta “global remesh” y partir de ahí el proceso incluye el suavizado, eliminación de errores, relleno de vacíos, reunificado y exportado de cada cavidad en archivos de imagen:

Cavernas Jumandi

El modelado unificado de las cavernas de Jumandi da como resultado un archivo .obj de 3.95Gb, el tamaño del archivo está relacionado con la calidad de los datos obtenidos del escaneo, el relleno de espacios huecos y la longitud de la caverna, tal como se muestra en la **Figura 34** a continuación:

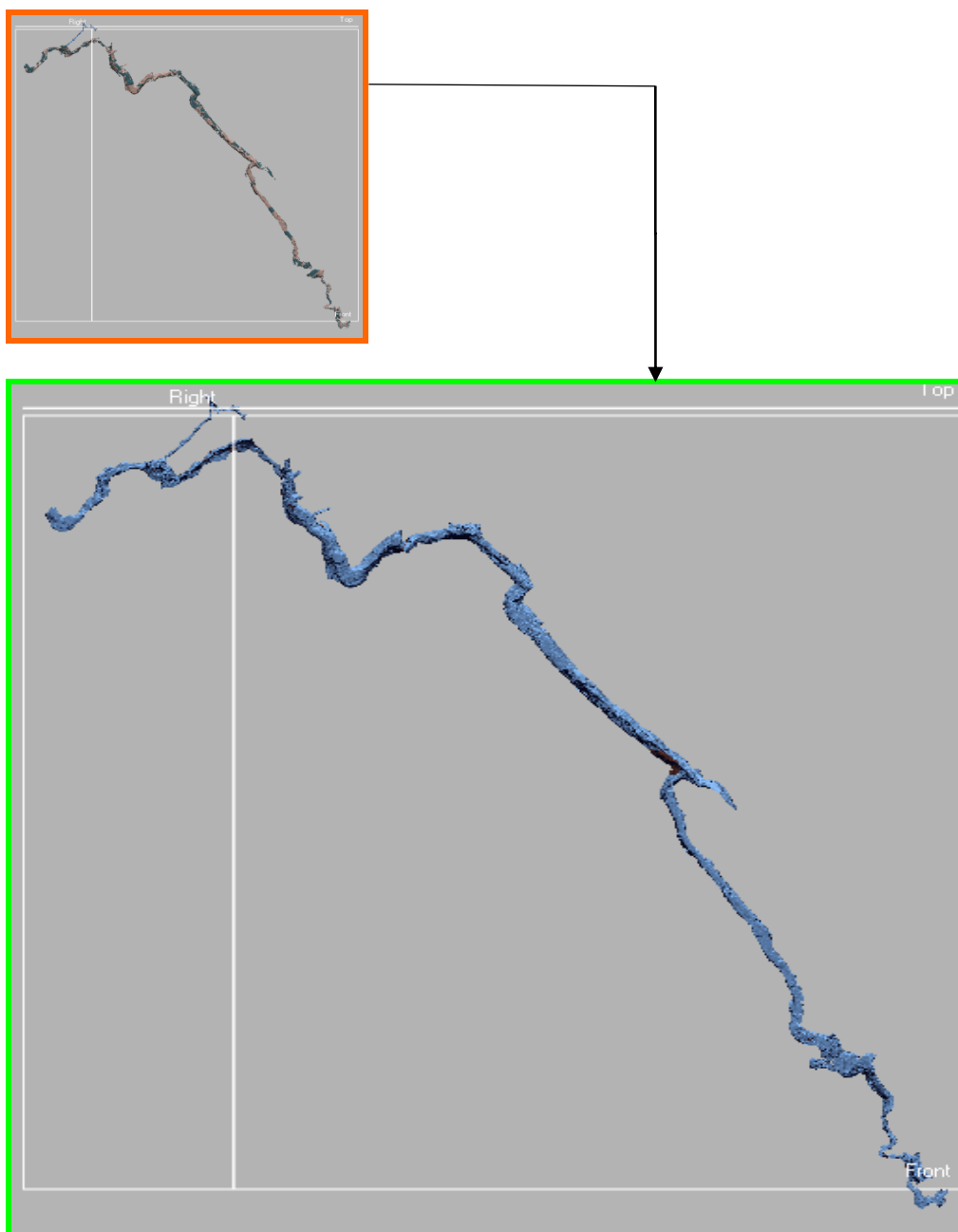


Figura 34: Modelado de Cavernas Jumandi

Fuente: Pantalla de programa Geomagic Design X

Cueva Elviandi

El modelado unificado de la cueva Elviandi dio como resultado un archivo de imagen *.obj de 2.38 Gb, el proceso de suavizado trae consigo la pérdida de detalle en las estalactitas y estalagmitas por lo que se optó por eliminarlas en algunos tramos para permitir al usuario apreciar el modelo de forma limpia y sin excesos, tal como se muestra en la **Figura 35** a continuación:

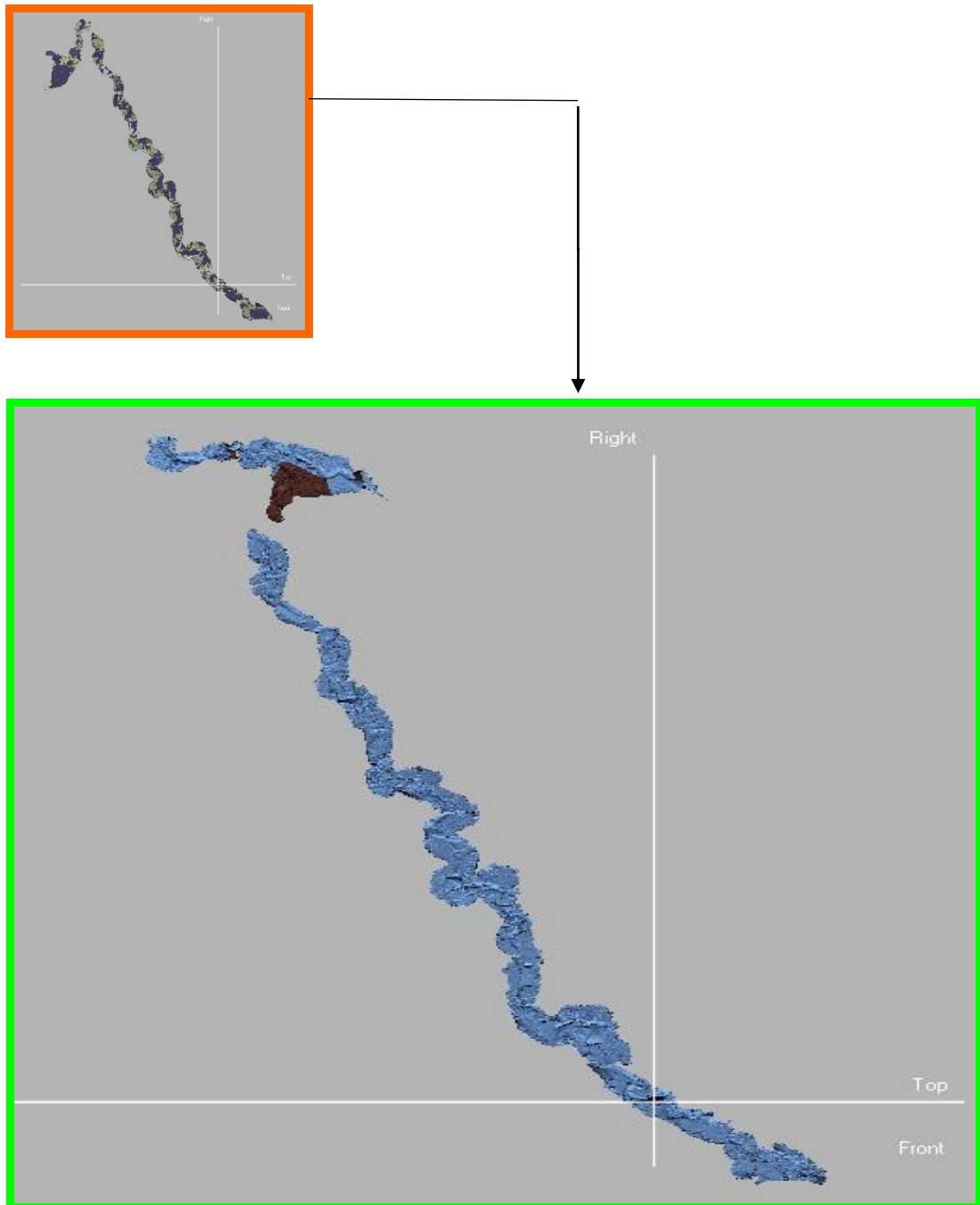


Figura 35: Modelado de Cueva Elviandi

Fuente: Pantalla de programa Geomagic Design X

Cueva El Castillo

El modelado de esta cavidad subterránea dio como resultado un archivo de imagen de 129 Mb, el mallado tiene un tamaño manejable que permite realizar un ambiente virtual dinámico y sencillo, tal como se muestra en la **Figura 36** a continuación:

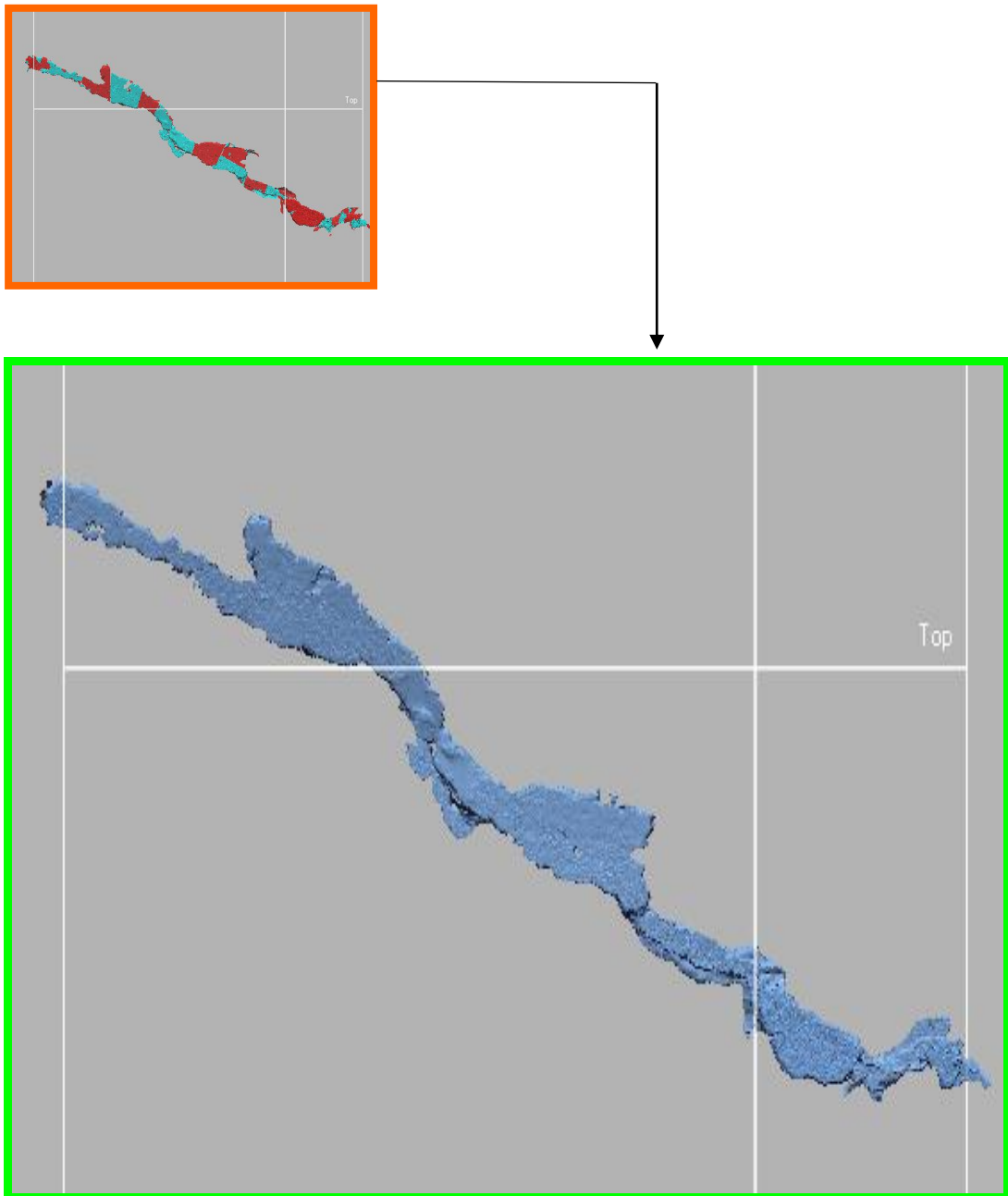


Figura 36: Modelado de Cueva Castillo
Fuente: Pantalla de programa Geomagic Design X

Gruta de la Virgen Santísima

El modelado de esta cavidad requirió el relleno varios de vacíos, mismos que una vez compensados dio como resultado un archivo de 159 Mg, tamaño manejable para la generación del ambiente virtual, tal como se muestra en la **Figura 37** a continuación:

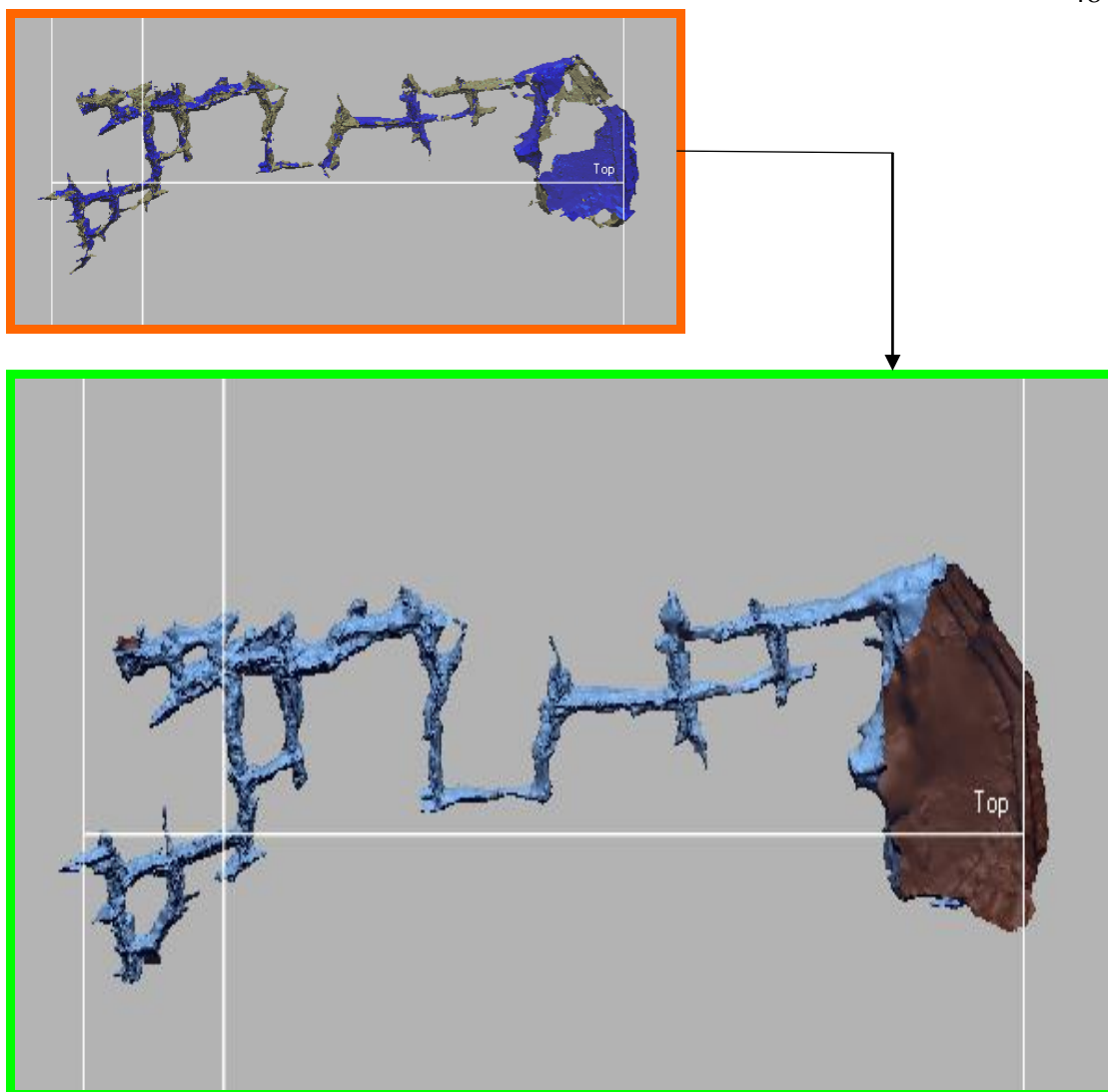


Figura 37: Modelado de Gruta de la Virgen Santísima

Fuente: Pantalla de programa Geomagic Design X

4.1.4. PROGRAMA CINEMA 4D

La importación de los archivos de las cavidades subterráneas a programas que manejan datos 3D, significó un desafío debido al tamaño de los mismos; se requirió la utilización de una estación de trabajo para realizar la animación y renderizado de las mismas.

El programa Cinema 4D presenta una interfaz de fácil manejo y es útil una vez que se han modelado los datos para generar los ambientes virtuales; que dependiendo de la cueva requirieron realizar una o varias animaciones, como se muestra a continuación:

Cavernas Jumandi

Se realizaron 6 animaciones para obtener el ambiente virtual de esta cavidad subterránea, ya que el procesador de la estación de trabajo no permitía animar los archivos *.obj debido a su complejidad, tal como se muestra en la **Figura 38** a continuación:

Tiempo del render estimado: 6 días

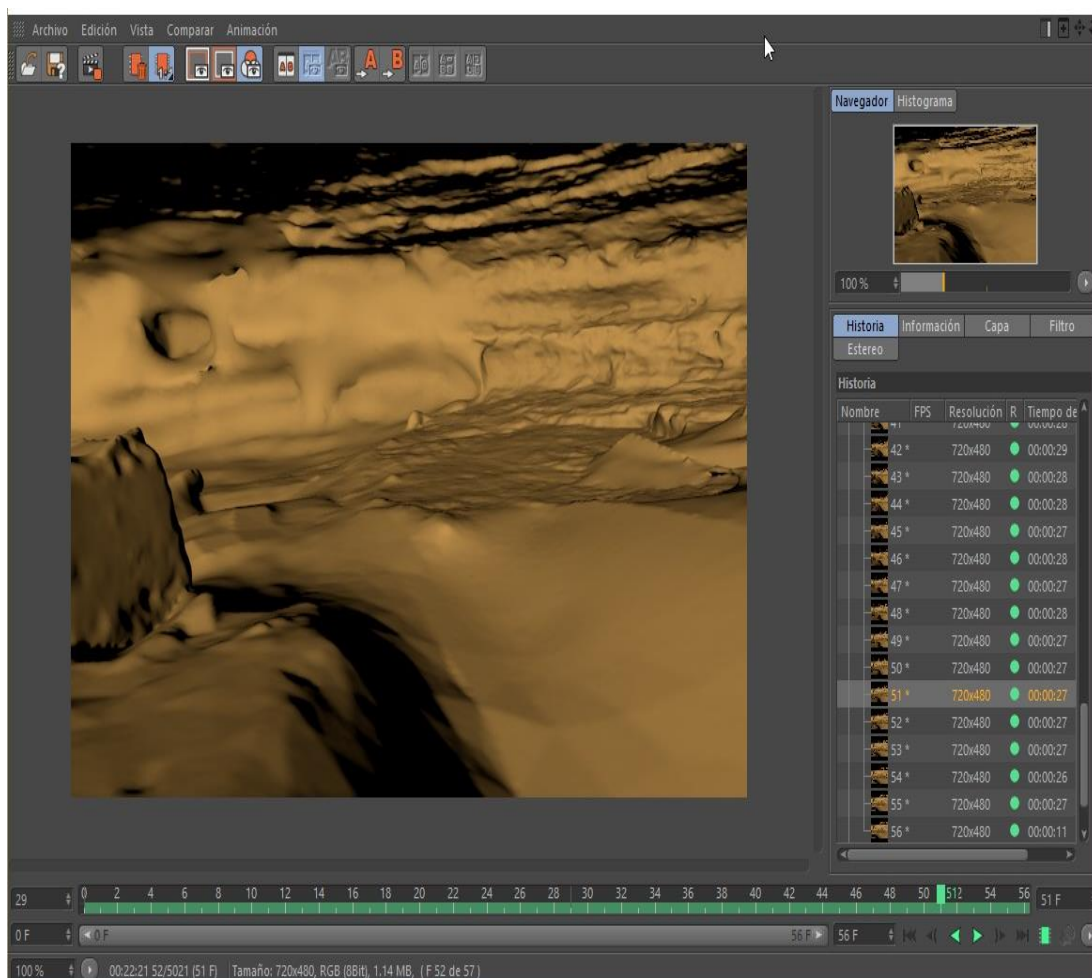


Figura 38: Render de Cavernas Jumandi

Fuente: Pantalla de programa Cinema 4D

Elviandi

Se realizaron 1 animaciones para obtener el ambiente virtual de esta cavidad subterránea, tal como se muestra en la **Figura 39** a continuación:

Tiempo del render estimado: 36 horas

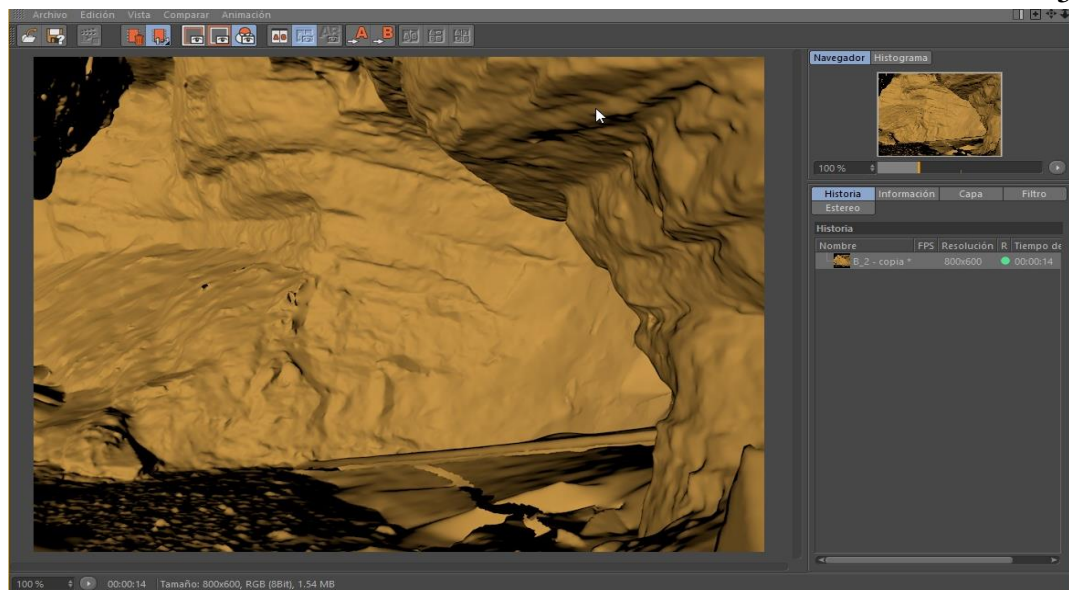


Figura 39: Render de Elviandi

Fuente: Pantalla de programa Cinema 4D

Castillo

Se realizó 1 animación para obtener el ambiente virtual de esta cavidad subterránea, tal como se muestra en la **Figura 40** a continuación:

Tiempo del render estimado: 24 horas

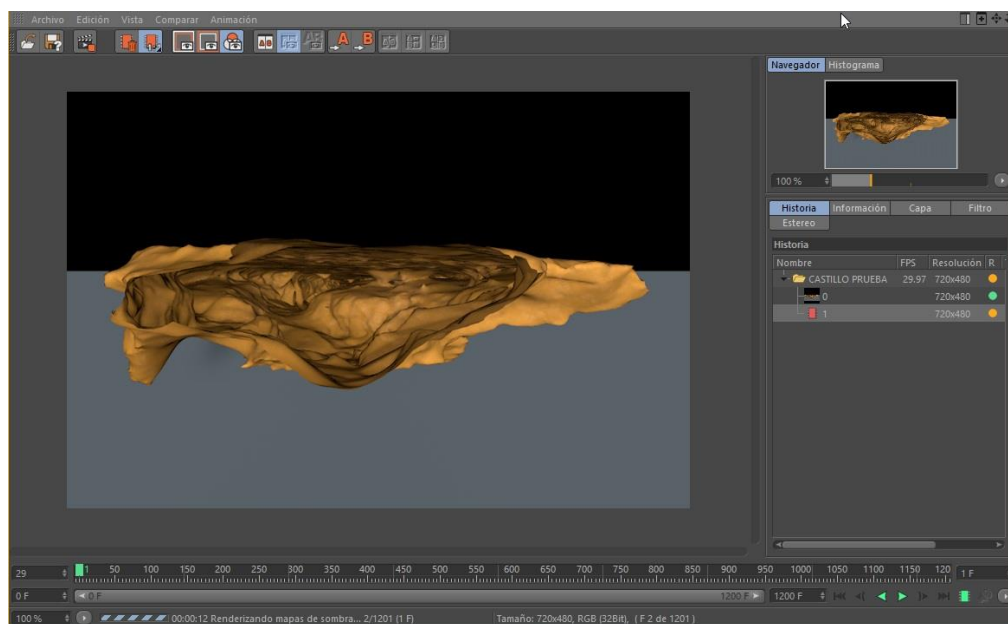


Figura 40: Render de Cueva Castillo

Fuente: Pantalla de programa Cinema 4D

Gruta de la Virgen Santísima

Se realizó 1 animación para obtener el ambiente virtual de esta cavidad subterránea, tal como se muestra en la **Figura 41** a continuación:

Tiempo del render estimado: 22 horas

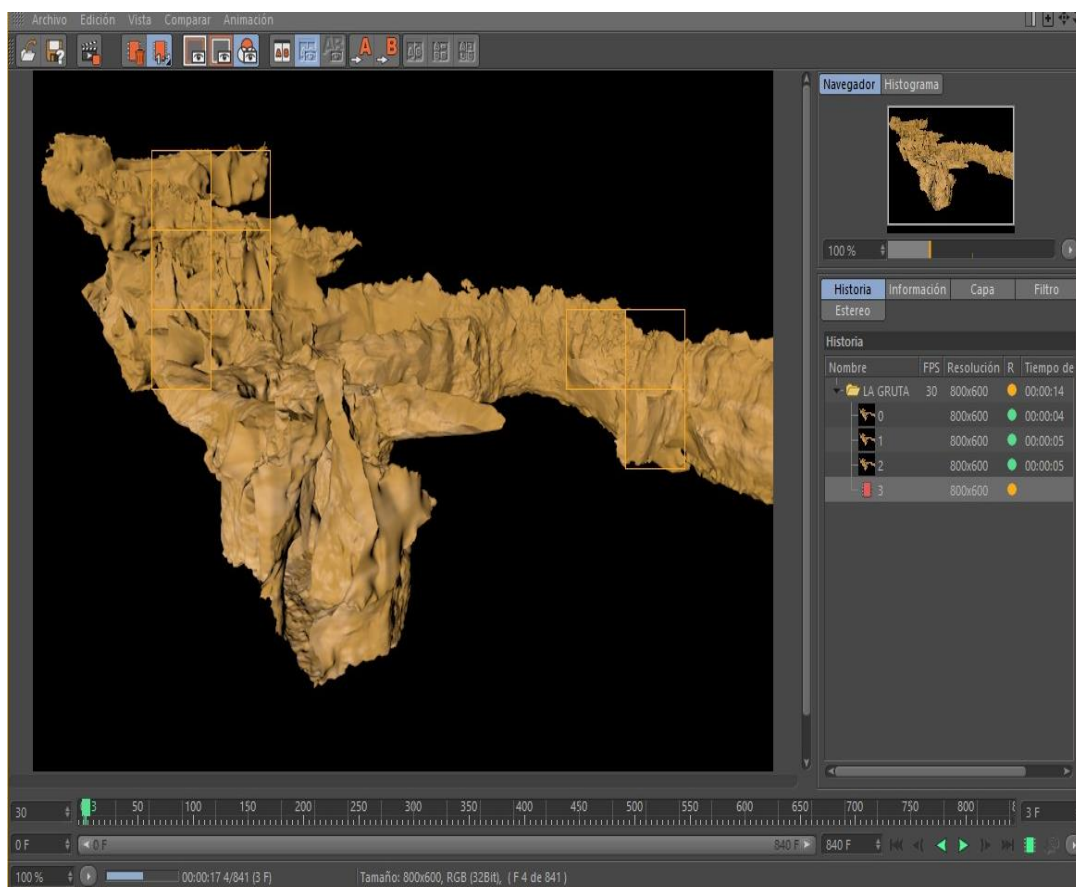


Figura 41: Render de Gruta de la Virgen Santísima

Fuente: Pantalla de programa Cinema 4D

4.2. COMPARACIÓN DE MEDIDAS REALES VS. ESCANEO

La etapa de control de calidad cuida que los resultados del escaneo no disten de las proporciones y medidas reales del objeto de estudio, en tal virtud se realizó un muestro en las cavidades subterráneas, para ello se empleó la prueba de hipótesis ji-cuadrado y el cálculo de la variación de error.

El muestreo en campo se realizó en tres cuevas que son: Jumandi, Castillo, la Gruta de la Virgen Santísima; en la cueva Elviandi no se realizó el muestro debido a cierre temporal por el invierno.

A continuación se muestra el análisis realizado en cada de una de las cavidades subterráneas:

Cavernas Jumandi

El muestreo en esta cavidad subterránea se enfocó en el pasaje turístico, debido a la facilidad de acceso al mismo, la **Figura 42** muestra lo datos recogidos:

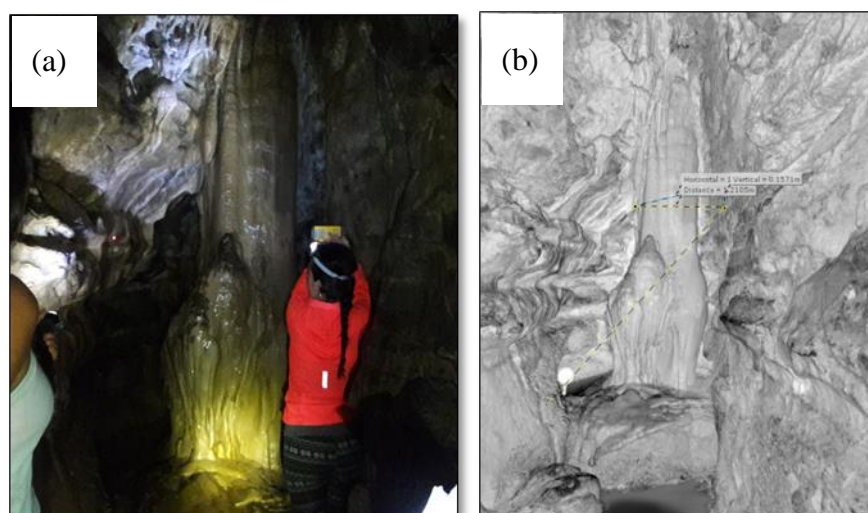


Figura 42: Muestreo Jumandi (a) en campo – (b) programa Scene 5.1

Cueva Castillo

El muestreo en esta cavidad subterránea se realizó a lo largo de misma enfocándose en especial en la galería de estalactitas y estalagmitas, debido a la facilidad de acceso al mismo, la **Figura 43** muestra lo datos recogidos:

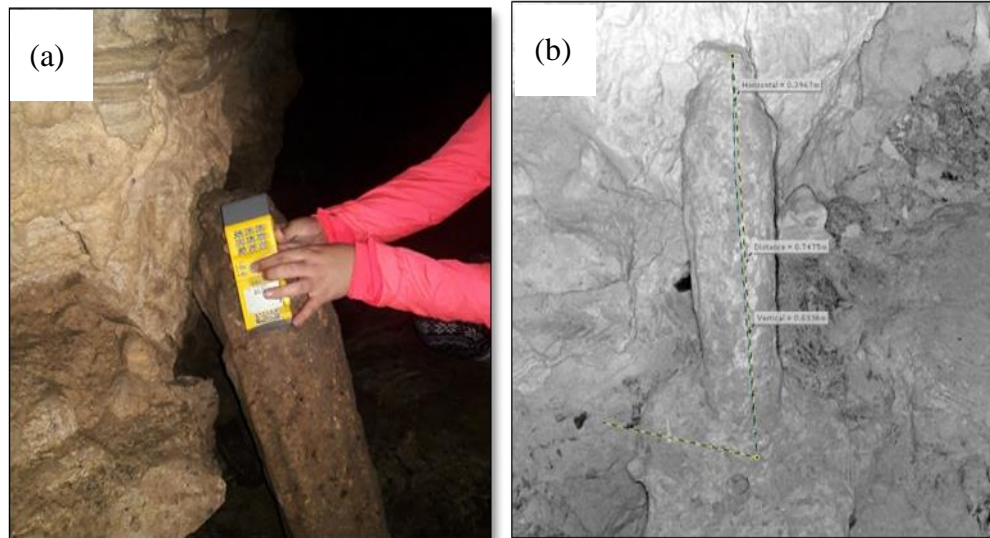


Figura 43: Muestreo Elviandi (a) en campo – (b) programa Scene 5.1

Gruta de la Virgen Santísima

El muestreo en esta cavidad subterránea se realizó a lo largo de misma, la **Figura 44** muestra lo datos recogidos en campo (a) y la medición realizada en el programa Scene 5.1

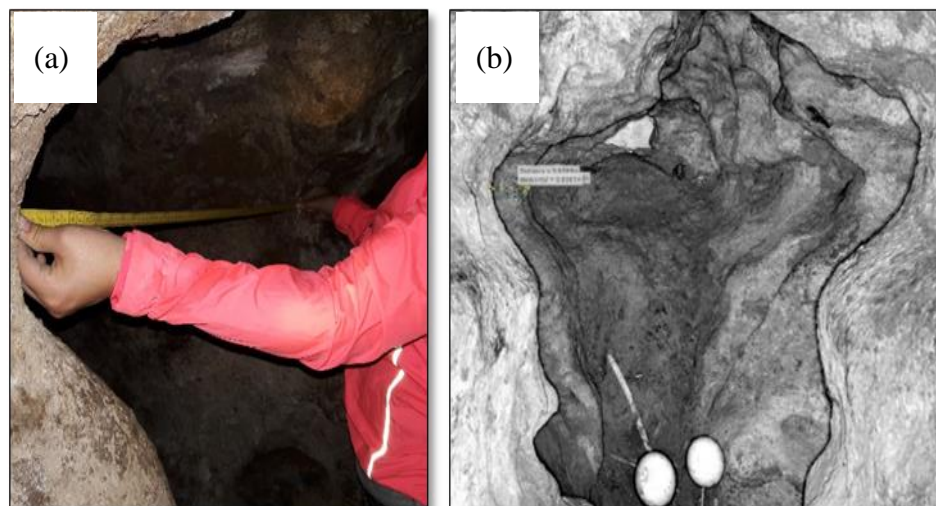


Figura 44: Muestreo Elviandi (a) en campo – (b) programa Scene 5.1

A continuación la **Tabla 8** muestra el cálculo de error en milímetros para el muestreo realizado que permite validar la calidad del modelo.

Tabla 8: Cálculo de variación de error en las cavidades subterráneas

N°	CAVERNAS JUMANDI			CUEVA EL CASTILLO			GRUTA DE LA VIRGEN SANTÍSIMA		
	x S	X C	DIF	x S	X C	DIF	x S	X C	DIF
1	958.00	954.17	3.83	747.50	744.75	2.75	258.20	256.00	2.20
2	722.60	717.27	5.33	353.50	349.20	4.30	154.60	156.60	-2.00
3	357.20	357.53	-0.33	368.60	368.20	0.40	838.90	836.42	2.48
4	572.50	574.08	-1.58	465.50	468.00	-2.50	195.70	196.60	-0.90
5	1606.30	1604.55	1.75	637.40	633.40	4.00	285.70	286.00	-0.30
6	539.60	529.27	10.33	676.00	676.00	0.00	880.40	879.60	0.80
7	1571.60	1572.10	-0.50	384.90	384.00	0.90	839.50	840.20	-0.70
8	2719.00	2722.50	-3.50	345.60	344.20	1.40	394.90	394.60	0.30
9	371.00	375.17	-4.17	779.10	777.60	1.50	104.60	102.40	2.20
10	1154.30	1154.72	-0.42	781.70	777.80	3.90	887.40	884.20	3.20
11	1210.50	1207.08	3.42	773.20	774.00	-0.80	299.20	297.20	2.00
12	1915.30	1914.55	0.75	1585.30	1584.20	1.10	153.30	153.20	0.10
13	491.00	492.83	-1.83	376.20	364.00	12.20	837.80	842.60	-4.80
14	787.90	785.82	2.08	871.30	870.80	0.50	324.20	325.60	-1.40
15	689.70	686.12	3.58	320.00	320.60	-0.60	308.90	310.60	-1.70
16	754.60	755.27	-0.67	870.40	864.20	6.20	638.00	646.20	-8.20
17	2006.40	2020.07	-13.67	1164.90	1167.40	-2.50	985.70	992.20	-6.50
18	2119.00	2119.50	-0.50	695.10	681.20	13.90	884.60	879.60	5.00
19	657.30	662.55	-5.25	754.80	764.40	-9.60	403.90	405.60	-1.70
20	1804.90	1805.48	-0.58	476.60	459.60	17.00	721.50	717.80	3.70
21	1976.40	1974.90	1.50	1863.10	1867.20	-4.10	554.50	555.80	-1.30
22	487.60	494.43	-6.83	1284.60	1261.80	22.80	302.80	302.60	0.20
23	424.20	434.87	-10.67	508.80	525.80	-17.00	284.70	283.60	1.10
24	873.50	867.58	5.92	820.10	822.00	-1.90	411.40	416.00	-4.60
25	1964.30	1964.88	-0.58	495.00	516.00	-21.00	1255.40	1280.40	-25.00
26	195.90	192.65	3.25	542.00	577.80	-35.80	302.60	307.80	-5.20
27	316.80	313.63	3.17	1280.90	1299.20	-18.30	600.10	602.20	-2.10
28	385.20	384.37	0.83	293.10	304.00	-10.90	1345.40	1350.00	-4.60
29	435.30	436.05	-0.75	580.70	571.80	8.90	498.10	499.20	-1.10
30	566.70	557.28	9.42	408.60	413.40	-4.80	582.50	579.40	3.10

Para describir la frecuencia de los valores obtenidos en el muestreo se realizaron histogramas, tal como lo muestra la **Figura 45** que sirven para tener una vista general de la distribución de la muestra con respecto a la media obtenida tanto del programa Scene 5.1 como de campo, esta valoración se realizó en el software libre RStudio 3.3.2

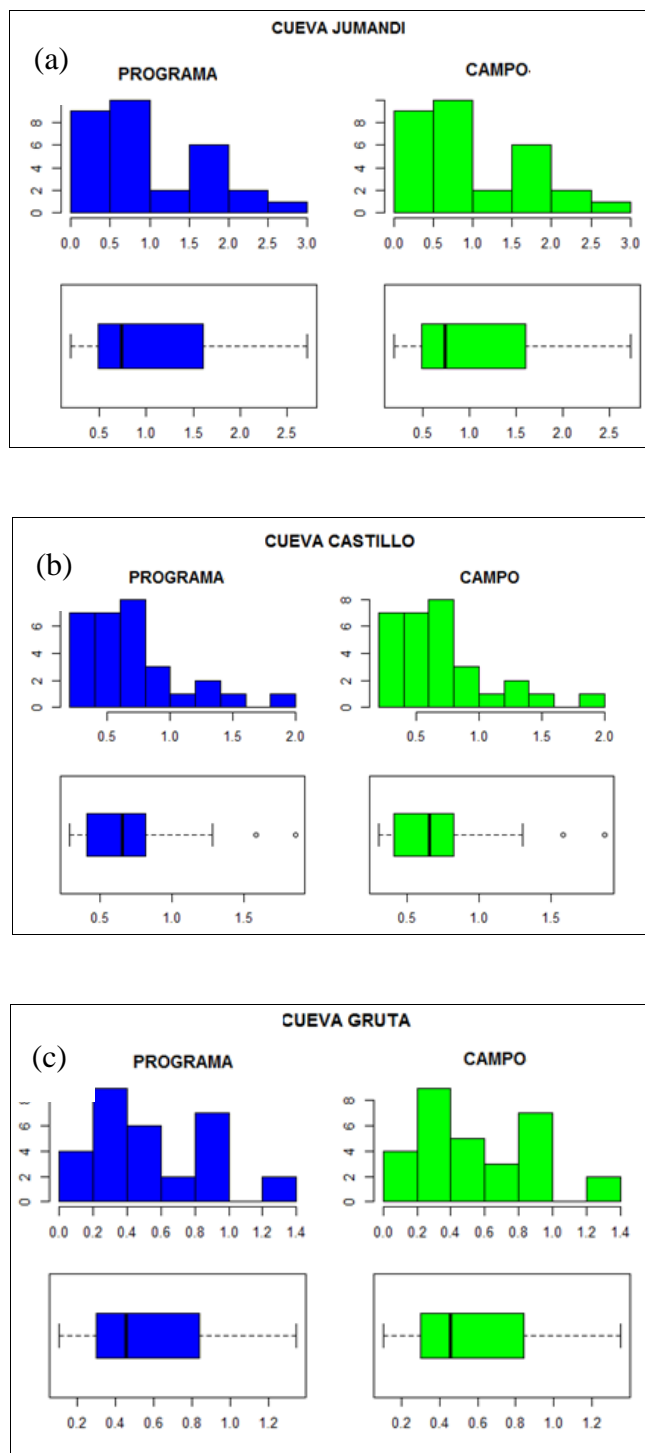


Figura 45: Histogramas y diagrama de caja de muestreo en las cavidades subterráneas

El diagrama de caja o de bigotes en estadística descriptiva sirve para analizar la distribución de un conjunto de datos, su mayor utilidad en este caso es que permite ver la presencia de valores atípicos y poner una sola dimensión al histograma.

Los resultados muestran que los datos tienen una buena distribución facilitando así el análisis de la información al detectar que el 50% de la población está en los límites del diagrama de caja, sin embargo se identifican dos valores atípicos en la cueva Castillo ya están fuera del rango por ser mayores al tercer cuartil, estos valores se deben analizar pero no van a ser descartados de la muestra debido a que presentan una correlación perfecta como se muestra en la **Figura 46** a continuación:

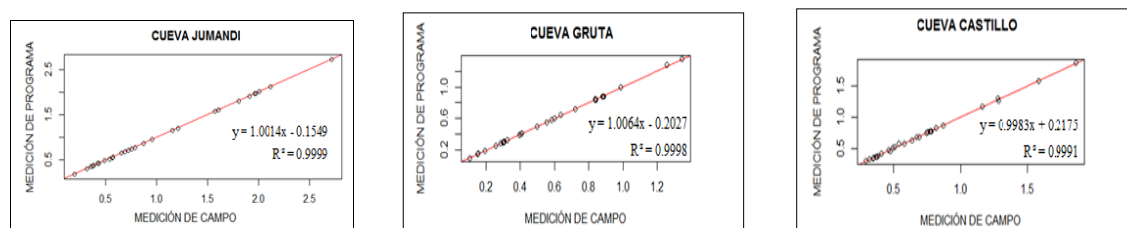


Figura 46: Regresión lineal del muestreo

El proceso de control de calidad permite estimar el error del modelo generado mediante el cálculo de la diferencia del valor estimado (láser) con respecto al valor verdadero (medida de campo). Se plantea utilizar un intervalo de confianza al 95% para la media del error. A continuación la **Tabla 9** muestra un resumen estadístico del error en los datos obtenidos, donde $n=30$.

Tabla 9: Estadístico calculado para las cavidades subterráneas en estudio

Cueva	Error Medio	Desviación	Margen de Error	IC	
				Lím. Inferior	Lím. Superior
Jumandi	0.11	5.06	0.33	-0.22	0.44
Castillo	-0.93	11.63	0.76	-1.69	-0.18
Virgen	-1.52	5.44	0.36	-1.88	-1.17

Ahora bien, una vez que se ha validado a través de los errores el modelo generado en cada ambiente virtual, se realiza la prueba de hipótesis propuesta.

A continuación la **Figura 47** muestra el resultado del estadístico ji cuadrado para las cavidades subterráneas Jumandi, Castillo y la Virgen Santísima, respectivamente:

Cavernas Jumandi

Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	TOTAL
Escene	0.958	0.723	0.357	0.573	1.606	0.540	1.572	2.719	0.371	1.154	1.211	1.915	0.491	0.788	0.690	0.755	2.006	2.119	0.657	1.805	1.976	0.488	0.424	0.874	1.964	0.196	0.317	0.385	0.435	0.567	30.635
Valor Esp	0.956	0.719	0.357	0.573	1.605	0.533	1.572	2.721	0.374	1.155	1.209	1.915	0.492	0.787	0.688	0.755	2.015	2.119	0.660	1.805	1.976	0.492	0.431	0.870	1.965	0.194	0.315	0.385	0.436	0.561	0.500
Campo	0.953	0.716	0.358	0.574	1.604	0.527	1.572	2.723	0.376	1.155	1.206	1.914	0.493	0.785	0.685	0.755	2.023	2.120	0.664	1.806	1.975	0.496	0.437	0.866	1.965	0.192	0.313	0.384	0.436	0.555	30.631
Valor Esp	0.956	0.719	0.357	0.573	1.605	0.533	1.572	2.721	0.373	1.154	1.208	1.915	0.492	0.787	0.688	0.755	2.014	2.119	0.660	1.805	1.975	0.492	0.431	0.870	1.965	0.194	0.315	0.385	0.436	0.561	0.500
TOTAL	1.911	1.439	0.715	1.147	3.211	1.067	3.144	5.442	0.747	2.309	2.417	3.830	0.984	1.573	1.375	1.510	4.029	4.239	1.321	3.611	3.951	0.983	0.861	1.740	3.929	0.388	0.630	0.769	0.872	1.122	61.265

Cueva Castillo

Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	TOTAL
Escene	0.748	0.354	0.369	0.466	0.637	0.676	0.385	0.346	0.779	0.782	0.773	1.585	0.376	0.871	0.320	0.870	1.165	0.695	0.755	0.477	1.863	1.285	0.509	0.820	0.495	0.542	1.281	0.293	0.581	0.409	21.505
Valor Esp	0.746	0.351	0.368	0.466	0.635	0.676	0.384	0.345	0.778	0.779	0.773	1.584	0.370	0.870	0.320	0.867	1.165	0.688	0.759	0.468	1.864	1.272	0.517	0.821	0.505	0.560	1.289	0.298	0.576	0.411	0.500
Campo	0.745	0.349	0.368	0.468	0.633	0.676	0.384	0.344	0.778	0.778	0.774	1.584	0.364	0.871	0.321	0.864	1.167	0.681	0.764	0.460	1.867	1.262	0.526	0.822	0.516	0.578	1.299	0.304	0.572	0.413	21.533
Valor Esp	0.747	0.352	0.369	0.467	0.636	0.676	0.385	0.345	0.779	0.780	0.774	1.586	0.370	0.872	0.321	0.868	1.167	0.689	0.760	0.468	1.866	1.274	0.518	0.822	0.506	0.560	1.291	0.299	0.577	0.411	0.500
TOTAL	1.492	0.703	0.737	0.934	1.271	1.352	0.769	0.690	1.557	1.560	1.547	3.170	0.740	1.742	0.641	1.735	2.332	1.376	1.519	0.936	3.730	2.546	1.035	1.642	1.011	1.120	2.580	0.597	1.153	0.822	43.037

Gruta de Virgen Santísima

Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	TOTAL
Escene	0.258	0.155	0.839	0.196	0.286	0.880	0.840	0.395	0.105	0.887	0.299	0.153	0.838	0.324	0.309	0.638	0.986	0.885	0.404	0.722	0.555	0.303	0.285	0.411	1.255	0.303	0.600	1.345	0.498	0.583	16.535
Valor Esp	0.257	0.155	0.837	0.196	0.285	0.879	0.839	0.394	0.103	0.885	0.298	0.153	0.839	0.324	0.309	0.641	0.988	0.881	0.404	0.719	0.554	0.302	0.284	0.413	1.266	0.305	0.600	1.346	0.498	0.580	0.499
Campo	0.256	0.157	0.836	0.197	0.286	0.880	0.840	0.395	0.102	0.884	0.297	0.153	0.843	0.326	0.311	0.646	0.992	0.880	0.406	0.718	0.556	0.303	0.284	0.416	1.280	0.308	0.602	1.350	0.499	0.579	16.580
Valor Esp	0.257	0.156	0.839	0.196	0.286	0.881	0.841	0.395	0.104	0.887	0.299	0.153	0.841	0.325	0.310	0.643	0.990	0.883	0.405	0.721	0.556	0.303	0.285	0.414	1.270	0.306	0.602	1.350	0.499	0.582	0.501
TOTAL	0.514	0.311	1.675	0.392	0.572	1.760	1.680	0.790	0.207	1.772	0.596	0.307	1.680	0.650	0.620	1.284	1.978	1.764	0.810	1.439	1.110	0.605	0.568	0.827	2.536	0.610	1.202	2.695	0.997	1.162	33.115

Figura 47: Estadístico ji-cuadrado para cavidades subterráneas:

Los valores calculados de X^2 para las cuevas son:

$$x_{Jumandi}^2 = 0.0008$$

$$x_{Castillo}^2 = 0.003$$

$$x_{Gruta}^2 = 0.0005$$

El valor crítico ji cuadrado para una probabilidad del 5% con 29 G.L es de 42,5569 dado que los valores obtenidos para las cavernas Jumandi, Castillo y la Gruta son de 0.0008, 0.003 y 0.0005 respectivamente, se acepta H_0 ; por lo que la distancia lineal medida por el escáner es la misma que la distancia lineal medida en campo; esta valoración es respecto a las medidas más muestra resultados sobre la calidad del modelo.

4.3. DISCUSIONES

- La tecnología láser del escáner es muy útil en este tipo de ambientes pero para obtener mejores resultados tanto en precisión como tiempo de procesamiento, debe ser acompañada de topografía, fotogrametría, croquis, entre otros, tal como se realizó en proyectos relacionadas como lo son: el realizado por (Salcedo, 2013) acerca de Técnicas de virtualización en yacimientos rupestres de Caravaca y Moratalla, o el proyecto generado por la empresa Virtualware de la Cueva de Altamira (Tristán, 2014) y Santimañe (Mayo y Santamaría, 2009) en España; en donde para obtener la virtualización de estos espacios incorporan a la investigación un equipo técnico interdisciplinario, diversos softwares de procesamiento, el respaldo económico de municipios y empresas; ahora bien considerando los elementos recogidos en la investigación se puede decir que el resultado es excelente puesto que presenta gran concordancia con la realidad de las cavidades subterráneas que están en estudio.
- Para el manejo de los archivos generados a partir de los datos crudos es necesario recurrir a softwares especializados de procesamiento, para este caso en particular se realizó varias pruebas en programas de alta gama tales como Maya, 3DsMax, Unity, Blender, estos no lograron soportar la gran cantidad de datos con la que se contaba por lo que se procedió a utilizar los programas especificados en la metodología con la finalidad de obtener los mejores resultados.
- Para realizar el modelado de los datos tridimensionales de las cuevas es necesario contar con una computadora que disponga del hardware y software adecuado para que logre soportar las grandes cantidades de información que se manejan
- La validación de datos de las cavidades subterráneas es una propuesta generada a partir del error medio de la medición ya que no existen modelos similares de control de calidad en cuevas en el país; pero sin duda se puede recurrir a otros métodos que puedan resultar menos costosos y quizá más eficientes.

CAPITULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.0. RESUMEN

El presente proyecto de estudio obtuvo los resultados esperados a través del cumplimiento de todas las metas propuestas, lo que muestra la eficacia del escaneo láser en el modelado 3D de estructuras complejas como las cavidades subterráneas; las ventajas de virtualizar estos frágiles ambientes despertó el interés del público en general, tanto en conservación o investigación, ya que permite al usuario acceder a espacios inimaginados desde la comodidad de un computador.

El presente capítulo pretende mostrar las conclusiones y recomendaciones generadas de cada objetivo planteado, tal como se muestra a continuación:

5.1. CONCLUSIONES

Utilizar la Tecnología de Información Geográfica (TIG) a través del Sistema Escáner Láser, aplicado a estudios espeleológicos para la generación de ambientes virtuales en las Cuevas Jumandi, Elviandi, Castillo, Gruta de la Santísima Virgen en la Provincia de Napo - Ecuador

La tecnología láser de los sistemas LIDAR es eficiente para el manejo de datos geoespaciales ya que permiten reconstruir entornos con alta precisión en corto tiempo.

El proceso de unión, depurado, modelado y animación de las cavidades subterráneas para la generación de ambientes virtuales debe estar respaldado por un conjunto de herramientas, tanto en software como hardware que permitan manejar la enorme cantidad de datos que resultan de cada proceso, tal como se muestra en el apartado 4.1.

Los ambientes virtuales generados pretenden llevar el mensaje de conservación de estos espacios al introducir al usuario en un ambiente de relajación que busca

crear conciencia sobre de la belleza escénica que rodea a las cavidades subterráneas del país.

Planificar el escaneo tomando en cuenta la longitud y el acceso para determinar correctamente los tiempos y resoluciones en los que se trabajará de acuerdo a las capacidades del equipo.

El apartado 3.2 muestra el estudio de planificación planteado de acuerdo a los requerimientos del proyecto, en donde se realizó una visita exploratoria a las cavidades subterráneas, con esa base se estimó el tiempo de captura por lo que se trabajó a diferentes resoluciones, tal como se muestra en la **Tabla 3**, de esta correcta planificación se generan las nubes de puntos de los modelos expuestos en el apartado 4.1.1.

Al momento de configurar el equipo es necesario que el técnico a cargo tenga clara la finalidad del escaneo, es por ello que dependiendo del nivel de detalle que se desee lograr se debe ajustar el equipo en varios parámetros poniendo énfasis en la resolución y calidad que dan como resultados el número de puntos por escena y el tiempo de captura, tal como se muestra en la **Tabla 4**.

Levantar la ubicación de las cuevas en estudio

Para el presente proyecto se utilizó un GPS navegador en donde se tomó las coordenadas que se muestran estandarizadas en la **Tabla 5** situación que pretende asociar coordenadas reales a las obtenidas como referenciales en el escaneo de las cavidades subterráneas.

Realizar los escaneos de las cuevas utilizando el equipo Trimble TXD 3D Láser Scanner.

La **Figura 24** muestra el resultado de los formatos de Trimble obtenidos en los escaneos de las cavidades subterráneas, el número de escaneos realizados está relacionado con la longitud, estructura y facilidad de acceso, tal como lo muestran el apartado 4.1.1; es así que los escaneos para las cuevas Castillo, la Gruta de la Virgen, Jumandi y Elviandi respectivamente son 38, 17, 66 y 22 lo que muestra que el técnico a cargo inspeccionó el área a escanear determinando nivel de detalle a obtener de acuerdo a los objetivos del proyecto.

Procesar de los datos crudos para unir los escaneos y depurar la información.

Los levantamientos obtenidos gozan de un buen nivel de detalle que permitió generar cuatro modelos virtuales muy semejantes a la realidad que dan la facilidad de conocer la estructura, morfología, fragilidad de las cavidades subterráneas en estudio.

El programa Scene 5.1 permite enlazar las escenas a través de las referencias (esferas), de donde se obtuvo una nube de puntos unificada y lista para ser procesada de acuerdo a la necesidad del proyecto, tal como se muestra en el apartado 4.1.1

El programa Trimble Real Works 8.0 presenta un grupo de herramientas que son de gran utilidad para el depurado de los detalles innecesarios resultantes del escaneo y permiten al usuario un manejo interoperable con otros programas a través de la exportación a diversos formatos CAD, tal como se muestra en el apartado 4.1.2

Realizar el control de calidad de los escaneos.

El proceso de control de calidad indica que el modelo obtenido en el escaneo es muy cercano a la realidad, esta valoración se realizó a través de un muestreo de campo versus los datos obtenidos del software (**Tabla 8**) en donde se calculó el error medio, la desviación muestral y un intervalo de confianza del 95% estos resultados se verifican en la **Tabla 9**, determinando así la bondad del modelo.

Adicional a ello se realizó una prueba de hipótesis ji-cuadrado (**Figura 10**) para determinar la calidad de la muestra tomada en base a las proporciones obtenidas y se analizó la correlación de los datos muestreados en cada cavidad subterránea con un valor muy cercano a uno; por lo que se puede concluir que el control de calidad realizado al escaneo certifica la eficacia de los sistemas escáner láser en la captura de información en ambientes complejos, tal como se muestra en el apartado 3.6 y apartado 4.2.

Generar el entorno virtual 3D de las Cuevas Jumandi, Elviandi, Castillo y Gruta de la Santísima Virgen.

Para la generación del ambiente virtual se direccionó la investigación en dos etapas: el modelado y la animación, para lograr este objetivo se exploró en varios softwares de procesamiento mismos que no lograron manejar la cantidad de datos, ni responder a las necesidades del modelado de las cavidades subterráneas, a

continuación se detallan los programas que mostraron el mejor resultado de acuerdo a los requerimientos del proyecto:

El programa Geomagic Design X (DGX) es muy efectivo al momento de modelar datos 3D con coordenadas referenciales, posee una interfaz muy sencilla de manejar y es útil para editar, eliminar excesos, rellenar, escalar y suavizar la malla para hacerla menos compleja y liviana permitiendo obtener modelos tridimensionales muy semejantes a la realidad.

El programa Cinema 4D permite realizar animaciones en los archivos en formato de imagen .obj exportados de GDX, posee una interfaz dinámica con varias herramientas de edición, diseños, texturas, entre otros; es de gran utilidad para modelar y animar datos complejos, a través de la creación de cámaras e iluminación que permitieron obtener los ambientes virtuales de las cavidades subterráneas en estudio.

Los ambientes virtuales generados de este proyecto de titulación se encuentran disponibles en línea en:

5.2. RECOMENDACIONES

Previo a la realización de los escaneos es recomendable hacer una visita exploratoria a las cuevas, analizar el área a levantar, recopilar información, hacer un croquis y determinar las posiciones óptimas del escáner láser, elementos que permitirán escanear de manera mucho más eficaz el área de estudio.

Al ingresar a las cavidades subterráneas se debe tomar siempre en cuenta los parámetros de seguridad necesarios, tales como el uso de casco, linterna, guantes entre otros.

Es recomendable que tanto como el programa Scene 5.1 y Trimble Real Works 8.0 se generen pluggins de exportación a otros formatos que sean más interoperables y que limite la pérdida de información al hacerlo.

Para realizar el modelado de los datos tridimensionales de las cuevas es necesario contar con una computadora que disponga del hardware y software

adecuado para que logre soportar las grandes cantidades de información que se manejan.

La tecnología láser del escáner es muy útil en este tipo de ambientes pero para obtener mejores resultados tanto en precisión como tiempo de procesamiento, debe ser acompañada de topografía, fotogrametría, croquis, entre otros.

En la revisión del estado del arte se puede observar que en países europeos se utilizan este tipo de investigaciones para conservar y disfrutar de los entornos virtualizados de cavidades subterráneas para apalancar la conservación de patrimonio y generar mayor número de visitas a museos.

La validación de datos de las cavidades subterráneas es una propuesta generada a partir del error medio de la medición ya que no existen modelos similares de control de calidad en cuevas en el país; pero sin duda se puede recurrir a otros métodos que puedan resultar menos costosos y quizá más eficientes.

Para el manejo de los archivos generados a partir de los datos crudos es necesario recurrir a softwares especializados de procesamiento, para este caso en particular se realizó pruebas en varios programas que no lograron soportar la gran cantidad de datos con la que se contaba por lo que se procedió a utilizar los programas especificados en la metodología con la finalidad de obtener los mejores resultados; sin embargo se puede obtener resultados diversos dependiendo del proceso que se siga y de intención del proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilera, J. (2012). *Creación de modelos tridimensionales de cavidades y su entorno TOPOGRAFÍA DE CAVIDADES*. Recuperado el 28 de 03 de 2017, de Universidad de Cádiz: <http://www2.uca.es/huesped/giex/3dtop.htm>
- Aimar, M. (2011). *Prueba Chi Cuadrado*. Recuperado el 05 de 03 de 2017, de Universidad de Ciencias Empresariales y Sociales: http://www.investigacion.webs.com/archivos/DOC/PruebasZ_y_Chi.pdf
- Allemand, J. (06 de 2005). *Sociedad Argentina de Espeleología*. Recuperado el 05 de 04 de 2017, de Espeleoturismo: La importancia de capacitar guías turísticos especializados: http://www.espeleosae.com.ar/publicaciones/BoletinS_3.pdf
- Baboon Experience. (2017). *Las mejores aplicaciones gratis de realidad virtual para iOS y Android*. Recuperado el 11 de 09 de 2016, de <https://baboonexperience.com/es/2017/03/01/las-mejores-aplicaciones-gratis-de-realidad-virtual-para-ios-y-android/>
- Bautista, F., & Delgado, M. (2004). *Técnicas De Muestreo Para Manejadores*. Recuperado el 08 de 03 de 2017, de UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO: http://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/35606013/tecnicas-muestreo.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1489777128&Signature=Aw%2Fv63qiCX3jXC7r4gjFrc%2BlslY%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DTecnicas_1.P65.pdf#page=4
- Biocca, S. (2017). *10 Posibles Usos De La Realidad Virtual (VR)*. Recuperado el 12 de 04 de 2017, de <http://www.androidpit.es/10-posibles-usos-de-la-realidad-virtual-vr>
- BIOTIC, C. (2017). *Introducción A La Inferencia Estadística*. Recuperado el 14 de 05 de 2017, de Universidad de Granada: http://www.ugr.es/~bioestad/_private/Tema_6.pdf

- Bohler, W. (2006). *Comparison of 3D laser scanning and other 3D measurement*. Londres: Taylor & Francias Group.
- Cabrejas, P. (01 de 09 de 2015). *Control Dimensional de Aeronaves con Sistemas Láser Escaner*. Recuperado el 02 de 05 de 2017, de Universidad de Valencia: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/76469/CABREJAS%20-%20CONTROL%20DIMENSIONAL%20DE%20AERONAVES%20CON%20SISTEMAS%20L%C3%81SER%20ESC%C3%81NER.pdf?sequence=4>
- Cabrelles, M., Navarro, Santiago, Ana, S., & Lerma, J. (2010). *Modelado fotorrealístico 3D a partir de procesos fotogramétricos: láser escáner versus imagen digital*. Recuperado el 02 de 04 de 2017, de Grupo de Investigación en Fotogrametría y Láser Escáner (GIFLE) Universida de Valencia: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/61249/Lerma%3bCabrelles%3bNavarro%20-%20Modelado%20fotorreal%C3%ADstico%203D%20a%20partir%20de%20procesos%20fotogram%C3%A9tricos%3a%20l%C3%A1ser....pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Corso, J. (2011). *Definiciones De Levantamiento Arquitectónico Y Proyectos Representativos A Escala Urbana De La Tecnología De Escáner Láser Terrestre TLS*. Recuperado el 02 de 05 de 2017, de https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/14948/Report_Juan%20Corso_03.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Díaz, A. (2011). Inmersión mental y realidad virtual. *UCIENCIA Universidad de Málaga*, 30-33.
- Dillehay, T. (2003). Las culturas del pleistoceno tardío de Suramérica. *Magueré*, 1-33.
- Espinel, V. (05 de 2014). *Reglamento De Operacion Turistica De Aventura*. Recuperado el 08 de 05 de 2016, de Ministerio de Turismo: <http://www.turismo.gob.ec/wp-content/uploads/2016/04/REGLAMENTO-DE-TURISMO-DE-AVENTURA.pdf>
- FARO. (2015). *Faro Láser Scanner Focus 3D 120*. Recuperado el 10 de 10 de 2016, de FARO: <http://www.faro.com/es-mx/inicio>

- FARO Europe. (2014). *Gomantong: La cueva de los millones de murciélagos*. Recuperado el 01 de 12 de 2016, de <http://blog-es.faro.com/blog/2016/01/28/se-construye-el-modelo-3d-de-alta-precision-de-las-cuevas-de-gomantong-gracias-al-faro-focus3d/>
- FARO Focus. (2015). *Escáneres láser de las series S, M y X*. Recuperado el 25 de 11 de 2016, de <http://www.faro.com/es-es/productos/topografia-3d/laser-scanner-faro-focus-3d/informacion-general>
- FARO SCANNING. (2009). *FARO Focus 3D 120*. Recuperado el 12 de 12 de 2016, de <http://www.laserscanning-europe.com/en/glossary/faro-focus-3d-120>
- Fernández, N. (2017). *Sistemas de información geográfica*. Recuperado el 04 de 05 de 2017, de Facultat d'Informàtica de Barcelona: <https://www.fib.upc.edu/retro-informatica/credits.html>
- Flores, J., Ávalos, E., & Camarena, P. (2014). *Usos Y Aplicaciones De La Realidad Virtual En La Educación*. Recuperado el 04 de 05 de 2017, de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/279449116_USOS_Y_APLICACIONES_DE_LA_REALIDAD_VIRTUAL_EN_LA_EDUCACION
- Fontal, B. (2005). *El Espectro Electromagnético y sus Aplicaciones*. Recuperado el 02 de 04 de 2017, de VII Escuela Venezolana Para la Enseñanza de la Química: http://recursos.salonesvirtuales.com/wp-content/uploads/bloques/2012/07/espectro_electromagnetico.pdf
- García, A. (2011). *Reconstrucción tridimensional para ver cuevas sin dañarlas*. Recuperado el 01 de 03 de 2017, de El Mundo: <http://www.elmundo.es/elmundo/2011/02/28/castillayleon/1298887910.html>
- García, S. (2010). Turismo activo y medio ambiente: una implicación necesaria. *Cuadernos de Turismo*, 26.
- GoogleMaps. (2017). *Google maps online*. Recuperado el 01 de 04 de 2017, de <https://www.google.com.ec/maps/search/Jumandy+cave+napo/@-0.9659888,-77.7580726,12z>
- Guerrero, F., & Velastegui, D. (2013). *Uso y procesamiento del sistema escáner láser para el modelamiento 3d de datos geoespaciales en las áreas de la*

construcción, patrimonio cultural y espeleología. Recuperado el 01 de 01 de 2017, de Repositorio de la Universidad de las Fuerzas Armadas- ESPE: <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/7764>

Iluminet. (2015). *Rayo Láser*. Recuperado el 12 de 07 de 2016, de Láser: <http://www.iluminet.com/laser-con-luz-blanca/>

Instituto de Física. (2016). *Tabla de distribución Chi cuadrado*. Recuperado el 27 de 03 de 2017, de Facultad de Ciencias: http://labrad.fisica.edu.uy/docs/tabla_chi_cuadrado.pdf

Instituto Tecnológico de Chihuahua. (2017). *Distribucion Ji-Cuadrada (X2)*. Recuperado el 24 de 07 de 2016, de <http://www.itchihuahua.edu.mx/academic/industrial/estadistica1/cap03b.html>

Laguna, C. (2014). *Inferencia paramétrica: relación entre dos variables cualitativas*. Recuperado el 09 de 01 de 2017, de Instituto Aragonés IACS: <http://www.ics-aragon.com/cursos/salud-publica/2014/pdf/M2T07.pdf>

Leica Geosystems. (2009). El Monasterio de las Cuevas en 3D. *La revista para el cliente*, 69. Obtenido de http://www.leica-geosystems.es/es/La-revista-para-el-cliente_79672.htm?pagemode=print

Leonberger. (2002). Revealing the small range of radio-microwave frequencies. *Phys. Educ*, 425-427.

Lerma, J., & Van Genechten, B. (2008). Teoría y práctica del Escaneo Láser Terrestre. Material de aprendizaje basado en aplicaciones prácticas. *Proyecto Leonardo Da Vinci*, 23-24.

Mañana, P., Rodríguez, A., & Blanco, R. (2008). *Una experiencia en la aplicación del Láser Escáner 3D a los procesos de documentación y análisis del Patrimonio Construido: su aplicación a Santa Eulalia de Bóveda (Lugo) y San Fiz de Solovio(Santiago de Compostela)*. Recuperado el 01 de 04 de 2017, de Arqueología De La Arquitectura: <file:///C:/Users/ESPE.SIG10/Downloads/87-85-2-PB.pdf>

Marcot, B., Rumiz, D., & Fredericksen, T. (02 de 2000). *Definicion De Redes De Areas Protegidas Forestales: Un Manual Para La Delimitacion De Areas*

Protegidas Forestales En Los Bosques Manejados De Las Tierras Bajas De Bolivia. Recuperado el 01 de 04 de 2017, de Cavernas y Afloramientos Rocosos: http://parquesparachile.cl/leg_bol.pdf

Marín, B. (08 de 2012). *Infografía digital: todo comenzó en las cavernas*. Recuperado el 05 de 04 de 2017, de Universidad de la Plata PREBI - SEDICI: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/34993>

Marín, D. (2014). *Explorando las misteriosas cuevas de la Luna y Marte*. Recuperado el 01 de 05 de 2017, de NAUKAS: <http://danielmarin.naukas.com/2014/03/18/explorando-las-misteriosas-cuevas-en-la-luna-y-marte/>

Mayo, S., & Santamaría, U. (2009). *La Realidad Virtual aplicada a la explotación sostenible del patrimonio arqueológico Un caso éxito: la Cueva de Santimamiñe*. Recuperado el 01 de 08 de 2016, de I Congreso Internacional de Arqueología e Informática Gráfica, Patrimonio e Innovación: file:///C:/Users/ESPEIDE06/Downloads/Comunicacion_arqueologica.pdf

Ministerio de Turismo. (2014). *Napo, potencia turística de la región amazónica*. Recuperado el 05 de 05 de 2016, de <http://www.turismo.gob.ec/napo-potencia-turistica-de-la-region-amazonica/>

Naranjo, F. (1998). *Nuevas fronteras de los contenidos geográficos Geografía Y Ordenación Del Territorio*. Recuperado el 02 de 02 de 2017, de Universidad de Barcelona: <http://www.ub.edu/geocrit/sv-77.htm>

Open the file. (2017). *¿Qué es un archivo obj y cómo puedo abrir un archivo obj? Looking for how to open obj files?* Recuperado el 24 de 07 de 2016, de <http://www.openthefile.net/es/extension/obj>

Peck, S. (1984). The invertebrate faunas of tropical American caves, Part 6: Jumandi Cave, Ecuador. *International Journal of Speleology*, 1-8. Obtenido de <http://scholarcommons.usf.edu/ijs/vol14/iss1/1/>

RAE. (2014). *Real Academia Española*. Recuperado el 01 de 02 de 2016, de <http://dle.rae.es/?id=MxT0wrP>

- Ramos, M. (2007). *Creación de ambientes virtuales inmersivos con software libre*. Recuperado el 09 de 04 de 2017, de UNAM Ciudad Universitaria, México D.F.: <http://www.revista.unam.mx/vol.8/num6/art47/int47.htm>
- Rojas, C. (2009). *ECA la educación*. Recuperado el 08 de 01 de 2017, de <http://eca-quimica.blogspot.com/2009/10/espectro-electromagnetico.html>
- Salamanca, J., & José, P. (2008). LIDAR, una tecnología de última generación, para planeación y desarrollo urbano. *Ingeniería*, 67-76.
- Salcedo, P. (2013). *Técnicas De Virtualización En Yacimientos De Caravaca Y Moratalla*. Obtenido de https://www.academia.edu/4373559/T%C3%89CNICAS_DE_VIRTUALIZACION_EN_YACIMIENTOS_DE_CARAVACA_Y_MORATALLA_I_Parte_-_Obtenci%C3%B3n_de_Geometria_y_texturas_Campa%C3%B1a_2013_
- Salcedo, P. (s.f.). *Virtualización de Yacimientos*. Recuperado el 02 de 05 de 2017, de https://www.academia.edu/4373559/T%C3%89CNICAS_DE_VIRTUALIZACION_EN_YACIMIENTOS_DE_CARAVACA_Y_MORATALLA_I_Parte_-_Obtenci%C3%B3n_de_Geometria_y_texturas_Campa%C3%B1a_2013_
- Santana, M., & Lerma, J. (09 de 2008). *Teoría y práctica del Escaneado Láser Terrestre*. Recuperado el 28 de 05 de 2017, de Universidad de Valencia: http://jllerma.webs.upv.es/pdfs/Leonardo_Tutorial_Final_vers5_SPANISH.pdf
- Sevilla, M. (2017). Revista de Universidad Complutense Instituto de Astronomía y Geodesia. *Facultad de Ciencias Matemáticas . 28040 MADRID*, 156 - 12422. Obtenido de Facultad de Ciencias Matemáticas.
- Taylor, J. (1982). *Introduction to Error Analysis*. Recuperado el 28 de 11 de 2016, de The Study of Uncertainties in Physical Measurements. University Science Books: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/unidades/medidas/medidas.htm>
- Toulkeridis, T., Constantin, S., & Addison, A. (13 de 03 de 2015). *3er Simposio Internacional de Espeleología en el Ecuador*. Recuperado el 26 de 01 de

2017, de Researchgate:
https://www.researchgate.net/publication/280923434_3er_Simposio_Internacional_de_Espeleologia_en_el_Ecuador_-_Boletin_Cientifico_Tena_13_-_15_marzo_2015

Trimble Navigation Limited. (2012). *Al-Top Topografía*. Recuperado el 14 de 06 de 2016, de http://www.al-top.com/sites/default/files/Trimble%20TX5_esp.pdf

Tristán, R. (2014). *Las cuevas de Altamira crecen: aumentan un 20% de tamaño*. Recuperado el 01 de 04 de 2017, de HUFFINGTON: http://www.huffingtonpost.es/2014/12/12/cuevas-de-altamira-_n_6315392.html

UNESCO. (1972). *Convención sobre la protección del patrimonio mundial, cultural y natural*. Recuperado el 21 de 02 de 2017, de <http://whc.unesco.org/archive/convention-es.pdf>

VLAAMS. (2008). *3D Risk Mapping (Leonardo Da Vinci Agents)*. Recuperado el 12 de 03 de 2017, de Teoría y práctica del Escaneado Láser Terrestre: http://jllerma.webs.upv.es/pdfs/Leonardo_Tutorial_Final_vers5_SPANISH.pdf

Ycaza, R., & Ycaza, R. (03 de 03 de 2009). *Bases para el desarrollo responsable del espeleoturismo en Ecuador*. Recuperado el 27 de 03 de 2017, de Facultad de Ingeniería Marítima, Ciencias Biológicas, Oceánicas y Recursos naturales ESPOL: <http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/1772/1/3472.pdf>