

**ALGORITMO PARA RECONOCIMIENTO Y MODELADO 3D DE FACHADAS
A PARTIR DE NUBE DE PUNTOS GENERADA A TRAVES DE ESCANER
LASER TERRESTRE**

DIEGO ARMANDO PINZÓN DÍAZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA
BUCARAMANGA
2015**

**ALGORITMO PARA RECONOCIMIENTO Y MODELADO 3D DE FACHADAS
A PARTIR DE NUBE DE PUNTOS GENERADA A TRAVES DE ESCANER
LASER TERRESTRE**

DIEGO ARMANDO PINZÓN DÍAZ

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO DE SISTEMAS**

DIRECTOR

Ph.D. JHON JAIRO CÁCERES JIMÉNEZ

CODIRECTOR

MSc. ELVER OMAR GALLO LANCHEROS

CODIRECTOR

ING. NELSON EDUARDO DÍAZ DÍAZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA
BUCARAMANGA**

2015

DEDICATORIA

A Dios por haberme permitido llegar a cumplir el sueño de ser profesional, por regalarme salud y por ponerme en el camino muchas personas con quienes el conocimiento fue enriquecido para lograr este objetivo.

A mis padres quienes me apoyaron desde el momento en que decidí empezar este nuevo sueño que hoy culmina, brindando apoyo en los momentos difíciles y por la perseverancia y la constancia que hoy permiten que este sueño sea una realidad.

A mis hermanas, que me han acompañado en este proceso y siempre me han apoyado con grandes y pequeños detalles

A mis familiares que aunque a algunos no los tenga cerca seguro estuve en sus oraciones y siempre fueron fuente de toda esa buena energía cuando más lo necesite y de apoyo constante en esta etapa de mi vida.

A mis amigos por todas las experiencias vividas y por todos los momentos que se quedan en recuerdos que guardare en mi memoria, por el apoyo que me brindaron y porque de una u otra manera siempre estuvieron ahí para compartir, en especial a los ingenieros: Jeison, Miguel, Nelson Jahir y David quienes estuvieron presentes motivando y colaborando para la culminación de este proyecto.

Y a todas las personas que de una u otra forma aportaron a cumplir esta meta.

DIEGO ARMANDO PINZÓN DÍAZ

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la capacidad, la inteligencia, y todas las demás virtudes necesarias para la consecución de este logro.

A la Universidad por brindar, por medio de sus docentes, un conocimiento que fue enriquecido en cada clase.

A los profesores de la Escuela de Ingeniería de Sistemas de la Universidad Industrial de Santander quienes en estos años dejaron grandes aportes, tanto en nuestra formación profesional y personal.

Al grupo de investigación Geomática, gestión y optimización de sistemas por brindar su confianza, apoyo material y humano en el desarrollo de este trabajo de investigación.

Al director del proyecto PHd. Jhon Jairo Cáceres Jiménez, y a los codirectores, Magister. Elver Omar Gallo Lancheros y al Ing. Nelson Eduardo Díaz Díaz, por el apoyo y guía en los momentos difíciles del desarrollo del presente proyecto.

A mi familia por su apoyo moral y material para la conquista de esta meta.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	16
2.	OBJETIVOS	18
2.1	OBJETIVO GENERAL	18
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
	JUSTIFICACIÓN	19
3	MARCO DE REFERENCIA	21
3.1	LEVANTAMIENTO ARQUITECTÓNICO DE EDIFICACIONES	21
3.2	FACHADAS	21
3.3	ESCÁNER LÁSER TERRESTRE	23
3.3.1	Láser	23
3.3.2	Escáner Láser	25
3.3.4	Registro y Georreferenciación	31
3.4	NUBE DE PUNTOS	34
3.4.1	Extracción de Características	36
3.4.2	Segmentación	38
3.4.3	Clasificación	39
3.4.4	Modelado 3D	41
3.5	ASPECTOS TÉCNICOS DE LA IMPLEMENTACIÓN	45
3.5.1	QT	45
3.5.2	QT Creator	46
3.5.3	VTK	46
4	DISEÑO DEL ALGORITMO	48
4.1	ADQUISICIÓN DE DATOS	51
4.2	PREPROCESAMIENTO	53
4.2.1	Filtración Puntos Suelo	53
4.2.2	Conformación Grupos de Puntos	55
4.2.3	Selección de Fachadas	56
4.2.4	División de Casas	57

4.3 SEGMENTACIÓN	59
4.3.1 Ransac.....	59
4.3.2 Metodología de Segmentación	61
4.4 CLASIFICACIÓN	63
4.5 MODELOS TRIDIMENSIONALES CITYGML	71
5 INTERFAZ GRÁFICA	74
5.1 DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ.....	74
5.2 FUNCIONAMIENTO DE LA INTERFAZ GRÁFICA	79
6 RESULTADOS	86
7 CONCLUSIONES	89
8 RECOMENDACIONES	90
9 BIBLIOGRAFÍA	91

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1 Edificio constructora FENIX, Bucaramanga, Santander	23
Figura 2 Alcaldía de Bucaramanga, Santander	23
Figura 3 El espectro electromagnético	24
Figura 4 Medida basada en tiempo de pulsos	26
Figura 5 Láseres escáneres comerciales basados en el tiempo de vuelo	27
Figura 6 Principio de medición basado en la fase	27
Figura 7 Escáneres laser basados en la fase	28
Figura 8 Imagen izquierda, un escáner láser terrestre de la marca <i>Leica</i> . En la imagen del centro, visión explicativa de un escaneo aéreo. A la derecha, un sistema de <i>mobile mapping</i> .	29
Figura 9. Aplicaciones del Escaneo Láser	30
Figura 10 Registro entre dos estaciones del escáner láser	31
Figura 11 Técnicas de Registro y Georreferenciación	32
Figura 12 Tipos de Targets Artificiales	32
Figura 13 Escaneo realizado en la entrada principal de la escuela de Ingeniería Química UIS	34
Figura 14 Escaneo realizado en la entrada principal de la escuela de Ingeniería Química UIS, puntos a color real	35
Figura 15 Modela 3D de una figura compleja, por medio de CSG- tree	42
Figura 16 Modela 3D de un auto por medio de B-rep	43
Figura 17 Reconstrucción de una superficie por medio de TIN	43
Figura 18 Los 5 niveles de detalle proporcionados por CityGML	44
Figura 19 Conexión entre objetos QT	45
Figura 20 Arquitectura de Visualización Pipeline (Oleoducto) VTK	47
Figura 21 Diagrama de etapas en el desarrollo del algoritmo.	50
Figura 22 Escáner Láser Terrestre RIEGL VZ-400	51
Figura 23 Escaneos de fachadas seleccionadas.	52
Figura 24 Resultado Selección Puntos del Suelo Fachada N° 1	54

Figura 25 Resultado Selección Puntos del Suelo Fachada N° 2	54
Figura 26 Resultado Conformación Grupos de Puntos de la Fachada N° 1	55
Figura 27 Resultado Conformación Grupos de Puntos de la Fachada N° 2	55
Figura 28 Resultado Selección de Fachadas de la Fachada N° 1	56
Figura 29 Resultado Selección de Fachadas de la Fachada N° 2	56
Figura 30 Resultado División de Fachadas de las Casas N° 3, 4, 5, 6 y 7	58
Figura 31 Diagrama toletancia de error en el ajuste de un plano	60
Figura 32 Algoritmo de RANSAC con 4 iteraciones	60
Figura 33 Resultado Segmentación de la Fachada N° 1	62
Figura 34 Resultado Segmentación de las Fachadas N° 3, 4, 5, 6 y 7	62
Figura 35 Resultado Segmentación de la Fachada N° 2	62
Figura 36 Histograma de Dispersión de los puntos de la Fachada #1	65
Figura 37 Resultado Selección Pared de la Fachada N° 1	65
Figura 39 Resultado Selección Pared de la Fachada N° 2	66
Figura 38 Histograma de Dispersión de los puntos de la Fachada #2	66
Figura 40 Vista Lateral por Niveles y Ejes de las Fachadas 1 y 4.	67
Figura 41 Resultado Selección Pared de la Fachada N° 3, 4, 5, 6 y 7	68
Figura 42 Resultado Clasificación de la Fachada N° 1	69
Figura 43 Resultado Clasificación de la Fachada N° 2	70
Figura 44 Resultado Clasificación de la Fachada N° 3, 4, 5, 6 y 7	70
Figura 45 Fragmento del Archivo CityGml de la Fachada N° 1	71
Figura 46 Modelo Tridimensional de la Fachada N° 1 Visualizada con el Software FZKViewer	72
Figura 47 Modelo Tridimensional de la Fachada N° 2 Visualizada con el Software FZKViewer	73
Figura 48 Modelo Tridimensional de las Fachadas N° 3, 4, 5, 6 y 7 Visualizada con el Software FZKViewer	73
Figura 49 Ventana Principal – Interfaz Gráfica	74
Figura 50 Menú Archivo – Interfaz Gráfica	75
Figura 51 Menú Visualización – Interfaz Gráfica	75

Figura 52 Selección de puntos hecha en la interfaz gráfica	76
Figura 53 Menú Algoritmos – Interfaz Gráfica	77
Figura 54 Menú Ayuda – Interfaz Gráfica	77
Figura 55 Barra de Botones – Interfaz Gráfica	78
Figura 56 Ventana Principal	79
Figura 57 Ventana de búsqueda del Botón Abrir – Interfaz Gráfica	80
Figura 58 Nube de puntos cargada con la Interfaz Gráfica	80
Figura 59 Resultado Selección Puntos del Suelo – Interfaz Gráfica	81
Figura 60 Resultado Conformación Grupos de Puntos– Interfaz Gráfica	82
Figura 61 Resultado Selección Puntos Fachada – Interfaz Gráfica	82
Figura 62 Resultado División de Casas – Interfaz Gráfica	83
Figura 63 Resultado Segmentación de los puntos fachada – Interfaz Gráfica	84
Figura 64 Resultado Clasificación de los segmentos fachada – Interfaz Gráfica	84
Figura 65 Resultado Modelado Tridimensional – Interfaz Gráfica	85
Figura 66 Modelo Tridimensional cargado con el Software FZKViewer	85

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1 Características de las Fachadas en Edificaciones	37
Tabla 2 Descripción de Indicadores	86
Tabla 3 Pruebas del Algoritmo	87

LISTADO DE ECUACIONES

Ecuación 1. Ecuación de la Sensibilidad	86
Ecuación 2. Ecuación de la Especificidad	88
Ecuación 3 Ecuación del Valor Predictivo Positivo	88

RESUMEN

TÍTULO

ALGORITMO PARA RECONOCIMIENTO Y MODELADO 3D DE FACHADAS A PARTIR DE NUBE DE PUNTOS GENERADA A TRAVES DE ESCANER LASER TERRESTRE

AUTOR

Diego Armando Pinzón Díaz

PALABRAS CLAVE: Nube de puntos, escáner laser terrestre, segmentación, clasificación, modelos 3d, geometría, fachadas.

DESCRIPCIÓN:

En la actualidad no existen modelos 3D de los predios en la ciudad de Bucaramanga, tampoco existe una base de datos donde se pueda consultar información actualizada y completa acerca de la estructura, dimensiones y composición de las zonas prediales; en su lugar, la información se obtiene mediante la inspección visual, registrando en un formato las dimensiones del lote, su estructura urbanizada y características, tales como la cantidad de puertas, ventanas, balcones, niveles urbanizados, entre otros; que en ocasiones sufren alteraciones en el momento de su registro, ya sea por fenómenos externos como la lluvia o por mala interpretación de los formularios.

La finalidad de este proyecto es crear un algoritmo para reconocer y modelar fachadas de edificaciones en 3D empleando la tecnología del escáner laser terrestre, la cual permita adquirir información fiel de los predios, con la intención de eliminar los procesos extensos y poco confiables de la inspección visual, mejorando la calidad de la información y reduciendo el trabajo en cuestión de costos, tiempos y mano de obra.

ABSTRACT

TITLE

RECOGNITION ALGORITHM FOR 3D MODELING AND FRONTS FROM POINT CLOUD GENERATED THROUGH SCANNER LASER LAND

AUTHOR

Diego Armando Pinzón Díaz

KEYWORDS: Point Cloud, terrestrial laser scanner, segmentation, classification, 3d models, geometry, facades.

DESCRIPTION:

Currently there are no 3D models of the premises in the city of Bucaramanga, nor is there a database where you can check current and complete information about the structure, size and composition of areas in farms; instead, the information is obtained by visual inspection, recording in a format size of the lot, its urbanized and features such as the number of doors, windows, balconies, urbanized levels, including structure; sometimes suffer alterations at the time of registration, either by external events such as rain or misinterpretation of the forms.

The purpose of this project is to create an algorithm for recognizing and modeling facades of buildings in 3D using technology terrestrial laser scanner, which allows to acquire accurate information from the premises with the intention of eliminating the extensive and unreliable process of inspection visual, improving the quality of information and reducing the work in a matter of cost, time and labor.

1 INTRODUCCIÓN

La medición de las características superficiales de un objeto, tales como la altura, el largo y el ancho, es una actividad que en muchos casos es realizada manualmente con una cinta métrica, siendo esto una labor repetitiva y compleja si el objeto a medir tuviera una superficie amplia como lo son las fachadas de las casas.

El levantamiento arquitectónico es el conjunto de operaciones de medición y análisis de un predio desde su realidad física y estructural, comprendida en dos fases claves, la primera es la toma de datos de la fachada, que consiste en la medición de los objetos que la conforman tales como ventanas, puertas, paredes, entre otras, empleando para ello una multitud de sistemas de registros de medidas, que son clasificadas en dos grupos, sistemas de medidas directa e indirecta, la directa es utilizando instrumentos simples como la cinta métrica, el flexímetro y la plomada, estos elementos son explicados con mayor detalle en el marco de referencia.

El segundo sistema de medidas es el indirecto, caracterizado por el uso de aparatos digitales tales como equipos de posicionamiento global, cámaras digitales, reflectores electrónicos de distancia, taquímetro y fotogrametría de objeto cercano, siendo este último la medición entre puntos de un edificio a través de dos o más fotografías. Estos instrumentos a pesar de facilitar y optimizar en cuestión de tiempo y personal la toma de datos, poseen la desventaja del elevado precio y del conocimiento preliminar requerido para el uso de los mismos.

La segunda fase del levantamiento arquitectónico, es la visualización de los datos recolectados en documentos gráficos, que puedan ser manejados en un software de diseño asistido, convirtiendo la fase anterior de gran importancia ya que la mala toma de los datos hace que la representación gráfica sea poco precisa con la realidad.

El presente proyecto propone optimizar los procesos de toma y visualización de los datos para el levantamiento arquitectónico, por medio del escáner láser terrestre, adquirido por el grupo de Investigación Geomática, gestión y optimización de sistemas, perteneciente a la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander y de la creación de un algoritmo que genere un modelo tridimensional que pueda ser exportado a un software de diseño

asistido a partir de la información suministrada por el escáner láser. Este algoritmo tendrá tres etapas, la primera es la segmentación de la información, la cual consiste en la agrupación de datos de acuerdo a características que poseen y que los hacen diferentes de los demás. La segunda etapa es la clasificación, en la cual se busca etiquetar los segmentos de acuerdo a propiedades que poseen y que permita catalogarlos como objetos de la fachada, ya sea puerta, ventana, pared, entre otros. Por último la tercera etapa, en donde se construye un modelo tridimensional de la fachada completa a partir de la extracción de las medidas de los objetos identificados.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un algoritmo para identificar fachadas en nube de puntos capturadas por la tecnología escáner laser terrestre y visualizarlas como objetos tridimensionales.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Adquirir datos de fachadas de edificaciones a través del escáner laser terrestre.
- ✓ Implementar un algoritmo que identifique las fachadas de edificaciones y sus elementos.
- ✓ Construir un objeto tridimensional a partir de las fachadas identificadas por el algoritmo propuesto.
- ✓ Calcular indicadores de especificidad y sensibilidad para el algoritmo implementado.
- ✓ Diseñar una interfaz gráfica que permita visualizar los resultados del algoritmo desarrollado.

JUSTIFICACIÓN

En el mundo de la arquitectura se puede diferenciar dos ámbitos de trabajo: el proyecto de obra nueva y el proyecto de intervención sobre edificios existentes. El primero parte de una idea para finalmente materializarse en un hecho construido, pasando por un estudio, análisis y diseño de la edificación[1].

El segundo se caracteriza por realizar una modificación partiendo de un inmueble existente, por lo tanto el resultado no solo dependerá de la intervención en el edificio, sino también de la exactitud de la documentación que describa la geometría, composición y estructura del inmueble a rehabilitar. En consecuencia, cualquier trabajo dentro del campo de la rehabilitación/restauración arquitectónica, debe ser precedido de la medición y análisis de un edificio desde su realidad física y estructural [1].

En la actualidad, la toma de datos acerca de la estructura, dimensiones y composición de una edificación es realizada en muchos casos manualmente, por medio de instrumentos sencillos como la cinta métrica, el flexímetro y la plomada, haciendo esta tarea compleja cuando los inmuebles tiene áreas grandes y de difícil acceso como lo son los techos, las ventanas altas, entre otras.

Una vez realizada la medición de la edificación, se procede a la visualización de los datos recolectados en documentos gráficos, que puedan ser manejados en un software de diseño asistido, convirtiendo la fase anterior de gran importancia ya que la mala toma de los datos hace que la representación gráfica sea poco precisa con la realidad.

Se espera que el presente proyecto optimice los procesos de toma y visualización de datos para la rehabilitación/restauración arquitectónica, por medio de la tecnología de escáner laser terrestre y de la creación de un algoritmo que genere un modelo tridimensional, el cual permita adquirir información fiel de los predios, con la intención de eliminar los procesos extensos y poco confiables de la inspección visual, mejorando la calidad de la información y reduciendo el trabajo en cuestión de costos, tiempos y mano de obra.

Para la realización de este proyecto se cuenta con el apoyo del grupo de Investigación Geomática, gestión y optimización de sistemas, perteneciente a la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander. También se

cuenta con el respaldo de expertos en el levantamiento arquitectónico (ingenieros civiles y arquitectos), además de ingenieros de sistemas especialistas en la tecnología de escáner laser terrestre y en el desarrollo de algoritmos para el procesamiento de nubes de puntos.

3 MARCO DE REFERENCIA

3.1 LEVANTAMIENTO ARQUITECTÓNICO DE EDIFICACIONES

El levantamiento arquitectónico es el conjunto de operaciones de medición y análisis, necesarios para comprender y documentar el predio desde su realidad física y estructural; este proceso posee dos fases claras, la primera, constituye la toma de datos, que consiste en la adquisición de la información de la edificación, desde el exterior como la fachada, hasta el interior como es la estructura y el diseño, el cual se realiza de dos formas dependiendo de la complejidad de las herramientas empleadas; la primera forma es utilizando instrumentos simples, como son la cinta métrica, la plomada y el nivel; este proceso tiene como ventaja la fácil portabilidad y la creación de planos sin la necesidad de medios tecnológicos, acercándose más a la edificación. La desventaja de este procedimiento es el largo tiempo que se requiere para obtener y procesar la información, y como en cualquier operación que implique mediciones, es posible que ocurran errores[1].

La segunda forma para la toma de datos, se caracteriza por el uso de herramientas digitales, tales como equipos de posicionamiento global, cámaras digitales, reflectores electrónicos de distancia, entre otros. Su ventaja es el poco personal requerido, reduciendo el tiempo empleado para la medición de la edificación, además la obtención de datos a mayor velocidad. La desventaja es el elevado precio, la precisión de la información dependerá de la calidad de los equipos y se requiere conocimientos preliminares para el uso de los mismos[1].

La segunda fase del proceso de levantamiento es la visualización de los datos recolectados en dibujos u otro tipo de documentos gráficos, que puedan ser entendibles y manejados fácilmente con la ayuda de un software de diseño asistido como AutoCAD; por tal motivo, la fase anterior toma gran importancia, debido a que la datos incompletos de la edificación hacen que la creación de la representación gráfica no sea fiel, ni precisa de la realidad[2].

3.2 FACHADAS

La palabra fachada deriva del latín facies, faz, cara, y por tanto, imagen y expresión de lo que envuelve. Según El diccionario de la Real Academia Española (RAE) de la Lengua, fachada es: "Paramento exterior de un edificio, generalmente

el principal". Una definición general de fachada de un edificio, se puede entender como cualquier tipo de muro o pared exterior del mismo, sin función resistente, formados de ladrillo, mampostería, bloque de mortero, sillería, entre otros [3].

Además de cumplir una función estética, una fachada debe ser impermeable y actuar como aislante térmico y acústico. Claro que a la hora de diseñarlas y construir las, existen en la actualidad distintas opciones que permiten establecer diversos tipos de fachadas para adaptarse al estilo arquitectónico que se desea para la obra.

Entre los diversos tipos de fachadas se encuentran [3]:

- **Fachada Ligeras:** Sus principales características son su poco peso, no contribuyen a la estabilización de la estructura, no garantizan protección frente al ruido ni a la temperatura, permiten el paso de la luz y su montaje en las edificaciones de gran altura son bastantes eficientes, por tal motivo son reservadas a la construcción de rascacielos y múltiples espacios públicos, como se observa en la Figura 1.
- **Fachada Pesada:** Para esta categoría, se incluyen todas aquellas fachadas tradicionales, elaboradas de ladrillo, piedra y madera; además de fachadas enfoscadas, las cuales emplean una capa de mortero hecha de cemento y en ocasiones de cal para el revestimiento de paredes, y fachadas aplacadas, que consiste en el recubrimiento directo mediante la adherencia directa de piezas, como se observa en la Figura 2.
- **Fachadas Transventiladas:** Esta categoría es considerada dentro del grupo de fachadas pesadas, debido a que son similares a los muros cortinas, los cuales son un sistema de fachada autoportantes, es decir, que pueden resistir todo el peso del apilamiento sin sufrir ningún efecto, por lo general son placas elaboradas de piedra o de cerámica.
- **Fachadas Prefabricadas:** Compuesta de pared, previamente elaboradas en algún taller, de modo que solo se ensamblan al llegar a la obra. Según sea su nivel de prefabricación, se pueden montar paredes de fachadas que lleguen con las ventanas y las puertas instaladas. Entre los materiales más comunes están el hormigón, la madera, entre otros.

Figura 1 Edificio constructora FÉNIX,
Bucaramanga, Santander



Fuente:
<http://www.panoramio.com/photo/89296974>

Figura 2 Alcaldía de Bucaramanga, Santander



Fuente:
<http://www.flickr.com/photos/dairocorrea/4176948619/>

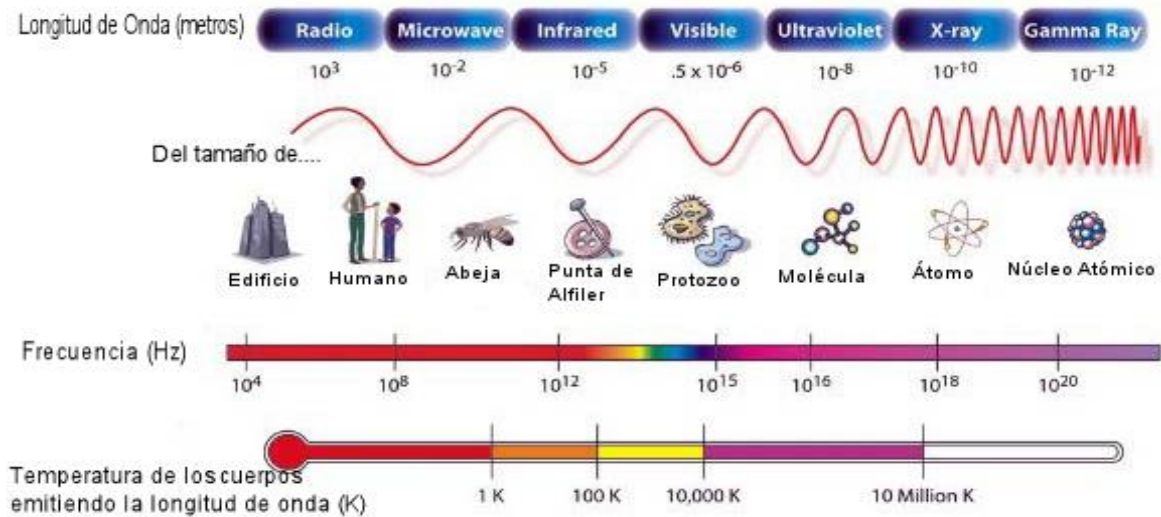
3.3 ESCÁNER LÁSER TERRESTRE

3.3.1 Láser

Láser (*de la siglas en ingles light amplification by stimulated emission of radiation, amplificación de luz por emisión estimulada de radiación*) es un haz de luz de enorme intensidad, caracterizado por mantenerse limitado a una pequeña área de superficie, sin la pérdida de fuerza por la difusión en su alrededor.

El primer laser operativo fue demostrado en mayo de 1960 por Theodore Maiman en los laboratios Hughes Research Laboratories. Actualmente los rayos laser pueden almacenar y reproducir imágenes fijas de alta calidad, imágenes de video, datos de computadora y audio. A través de ellos se pueden medir distancias con un alto grado de precisión y capturar la estructura de objetos o escenas, con el fin de reunir datos de su forma y color. En la industria, el cortado y soldado con láser es mucho más rápido y preciso que otros métodos. En procedimientos médicos y dentales, los laser dañan menos que los escalpelos y taladros. La investigación científica, utiliza láseres que han llevado a avances en el mundo real, tales como el uso de fibra óptica en comunicaciones telefónicas y redes computacionales [4].

Figura 3 El espectro electromagnético



Fuente: Frenzel, Louis L. *Sistemas electrónicos de comunicaciones* [5]

La luz de láser es un rayo con una radiación electromagnética constante, es decir que la frecuencia o longitud de onda con que es emitida es siempre de la misma magnitud, aproximadamente de la altura de la punta de un alfiler, en donde la variación del tamaño de la longitud de onda es una propiedad que diferencia la luz de láser de otros tipos de luz, debido a que existen distintos tipos de longitudes que van desde ondas tan largas como las de radio (del tamaño de edificios) hasta ondas cortas como los rayos gamma, siendo estos más pequeños que el núcleo de un átomo, estos tipos de ondas se pueden observar en la Figura 3, donde se presenta el espectro electromagnético, el cual es el conjunto de longitudes de ondas que se propagan a través del medio, en donde se encuentra ubicado la luz de láser, dentro del rango de rayo infrarrojo [5].

La luz de laser posee una serie de propiedades que la caracteriza, tales como [4]:

- La luz de láser se transmite en una sola frecuencia, o longitud de onda única, es decir es monocromática, y en una misma dirección en un haz paralelo y estrecho. Estas dos características se denominan coherencia espacial y temporal, esto hace que la luz láser puede ser concentrada y enfocada en puntos específicos por medio de lentes y fibras convencionales. Esta propiedad la luz normal no posee, ya que está

formada por múltiples longitudes de onda dispuestas al azar, haciendo que no pueda ser concentrada ni enfocada.

- La luz de láser posee una divergencia muy pequeña, es decir, puede ser propagada a través de intervalos de tiempo relativamente largos, correspondiente a largas distancias (a menudo algunos kilómetros).
- En la mayoría de los casos, la luz de láser genera un campo eléctrico oscilante en una dirección espacial particular, a esta propiedad se conoce como polaridad lineal.

3.3.2 Escáner Láser

Una de las principales aplicaciones del rayo láser, es la medición de distancias con un alto grado de precisión, además la captura de entornos u objetos, brindando información sobre su forma y apariencia, a esta tecnología se conoce como escáner laser. Los datos capturados se pueden considerar como una fotografía con información de profundidad, la cual puede ser empleada para realizar reconstrucciones digitales, planos bidimensionales o modelos tridimensionales útiles en varias aplicaciones; aunque igual que en el caso de una fotografía, el escáner laser es un instrumento de línea vista, es decir, el rayo láser viaja en línea recta, ocasionando que objetos distantes puedan ser obstruidos por otros más cercanos, por tal motivo, es necesario realizar múltiples capturas de distintas estaciones para garantizar una cobertura completa de una estructura [4].

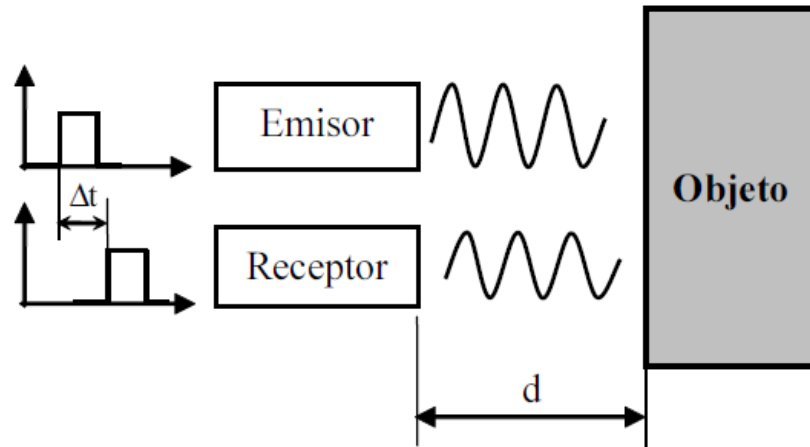
3.3.2.1 Fundamentos de Medida del Escáner Laser

El principio de funcionamiento que permite a un escáner laser medir la distancia de un objeto se llama TOF (*de la siglas en ingles time of flight = tiempo de vuelo*), el cual consiste en la emisión un rayo que será reflejado de por la superficie del objeto, de modo que una parte de la luz emitida llegará al receptor; entonces se mide el tiempo que tarda la luz en realizar ese viaje de ida y vuelta entre el láser y el objeto. En general, hay dos principios de medición por tiempo: escáneres basados en pulsos y basados en fase [6].

- **Escáneres Basados en Pulsos:** En este principio, se pone en marcha un cronómetro en el momento en que se emite el rayo. Cuando el rayo llega al receptor tras reflejarse en la superficie del objeto, se mide el tiempo

transcurrido, de esta manera se calcula la distancia teniendo en cuenta la velocidad del rayo en el medio, como se observa en la Figura 4 [6].

Figura 4 Medida basada en tiempo de pulsos



Fuente: Van Genechten, Björn Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning Training Material Based on Practical Applications [4]

Hay tres factores principales que determinan la precisión de un escáner basado en pulso:

1. La precisión con la que se fija un lapso de tiempo.
2. La capacidad de seleccionar la misma posición emitida y recibida para medir el intervalo de tiempo, ya que está limitado por el ruido presente en el área.
3. La precisión del equipo para la medida de los lapsos de tiempos.

En la Figura 5 se muestran algunos escáneres basados en tiempo de vuelo existentes en el mercado. Los fabricantes más conocidos son, colocados de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo: *Optech*, *Leica*, *Riegl*, *Trimble*, *Callidus*.

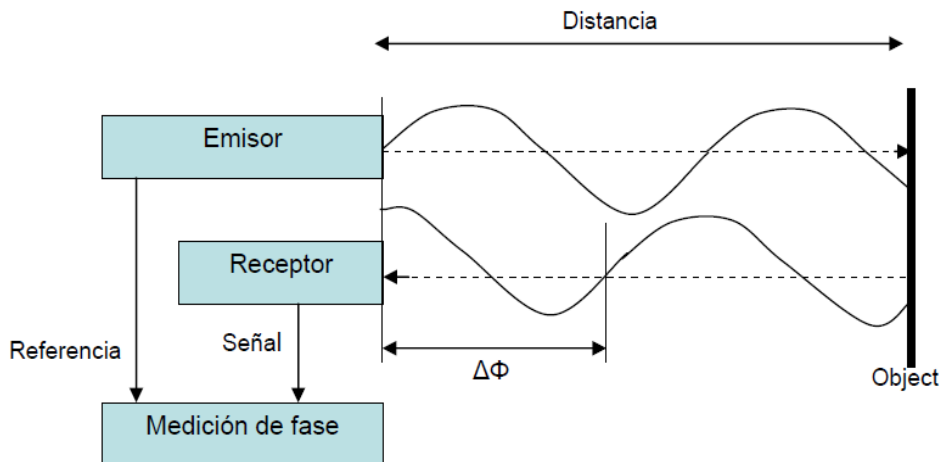
Figura 5 Láseres escáneres comerciales basados en el tiempo de vuelo



Fuente: Van Genechten, Björn Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning Training Material Based on Practical Applications [4]

- **Escáneres Basados en la fase:** Otro principio de medición basado en tiempo, evita el uso de relojes de alta precisión modulando la potencia del haz de láser. En este principio se utiliza la emisión continua del rayo, midiendo la diferencia entre las fases de las señales emitidas y recibidas para extraer la información de distancia como se observa en la Figura 6. La onda continua que se emite puede modularse en amplitud o en frecuencia, es decir, modulando la longitud y la intensidad con que son emitidas las ondas del escáner laser [4].

Figura 6 Principio de medición basado en la fase



Fuente: Van Genechten, Björn Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning Training Material Based on Practical Applications [4]

Generalmente, la precisión de un escáner basado en fase está limitada por:

- Turbulencias en el aire por el que se realiza la medición.
- Precisión en el ciclo de medición de la fase, dependiendo de la fuerza de la señal y el ruido presente.
- Frecuencia de la señal o modulación.
- Estabilidad del oscilador de modulación.

En la Figura 7, se muestran algunos escáneres basados en la fase. Las compañías más conocidas son: *IQSun*, *Leica*, *Z+F* y *Faro*.

Figura 7 Escáneres laser basados en la fase



Fuente: Van Genechten, Björn Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning Training Material Based on Practical Applications [4]

3.3.2.2 MONTAJES DEL ESCÁNER LÁSER

En función del trabajo a realizar y de la extensión de la zona a cubrir, se pueden realizar distintos montajes del escáner láser. Algunos de ellos son los siguientes (Figura 8) [7]:

- **Terrestre estático:** El escáner laser se mantiene en una posición fija durante la toma de los datos, su ventaja es la buena precisión y la alta densidad de puntos.
- **Terrestre dinámico:** El escáner suele ser montado en una plataforma móvil y realizando la captura de los datos mientras el láser es transportado, por tanto requiere otros sistemas de posicionamiento adicionales como GPS y IMU (en sus siglas en inglés *Inertial Measurement Unit*, Unidad de Medición Inercial), generando que el sistema completo sea más complejo y costoso [4].

- **Aéreo:** El equipo de escaneo es ensamblado en una aeronave especialmente adaptada, que va escaneando el terreno. Por lo general, este tipo de equipos emiten haces de gran diámetro, para detectar masas árboles, agua (ríos, lagos, mar), etc. Empleado en todos los campos de la topografía.
- **Batimétrico:** Empleada para escaneos de suelos marinos, con un montaje similar al aéreo pero sobre un barco y con tecnología adaptada para medir correctamente sobre un medio líquido.

Figura 8 Imagen izquierda, un escáner láser terrestre de la marca *Leica*. En la imagen del centro, visión explicativa de un escaneo aéreo. A la derecha, un sistema de *mobile mapping*.

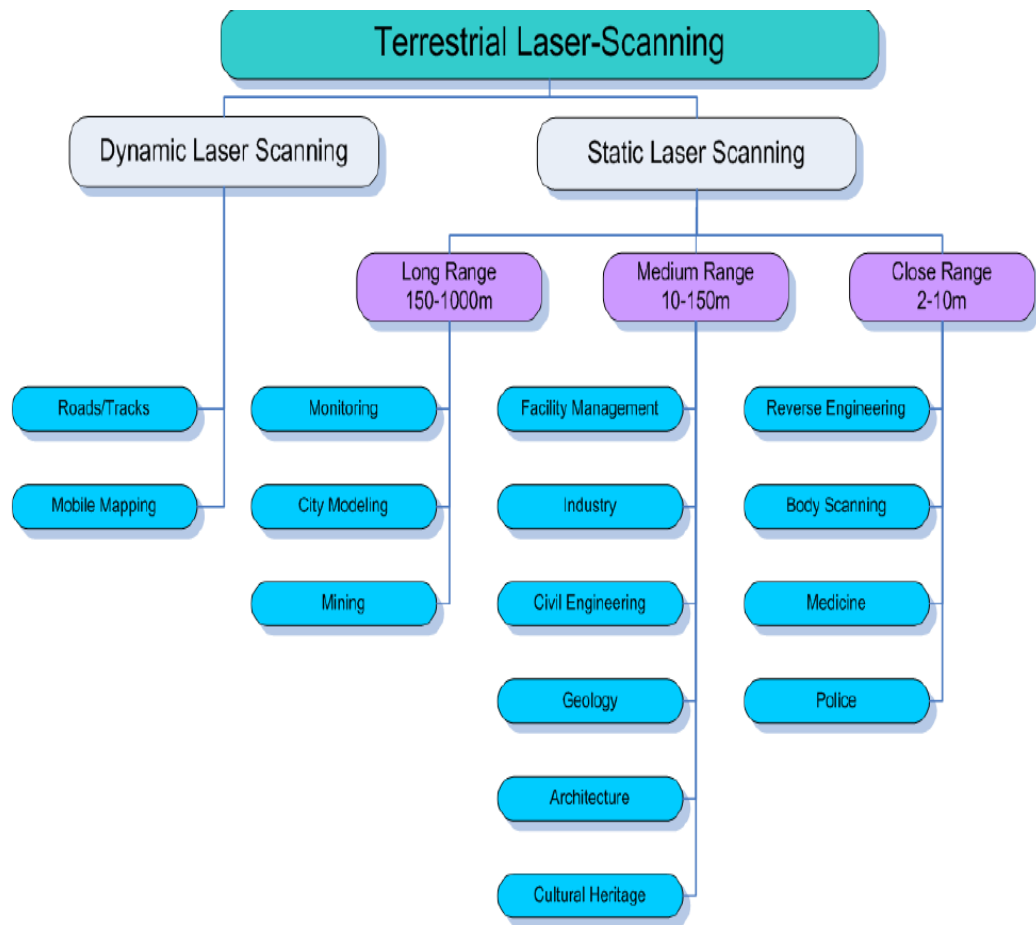


Fuente: A. J. Villanueva, “Point Cloud Manager Sistema multirresolución para el tratamiento de grandes datasets de nubes de puntos 3D,” Universidad de Santiago de Compostela, 2012 [7]

3.3.2.3 APLICACIONES DEL ESCANEO LÁSER

En un principio, los escáneres láser eran de corto alcance y se utilizaban principalmente en el diseño automatizado e industrial, con el fin de facilitar el Diseño Asistido por Computadora. Sin embargo, otros campos han sido explotados como consecuencia de la constante evolución tecnológica, otras disciplinas como el patrimonio cultural, la arquitectura, el desarrollo urbanístico, la medicina forense, la industria del entretenimiento y la topografía, están adoptando esta tecnología gracias a las ventajas del láser escáner: la inexistencia de contacto en las mediciones, la alta precisión, el largo alcance, la rápida adquisición, entre otras. En la Figura 9 se visualiza las principales aplicaciones del escáner láser, divididos por tipo de escaneo y longitud de rango del láser [8].

Figura 9. Aplicaciones del Escaneo Láser



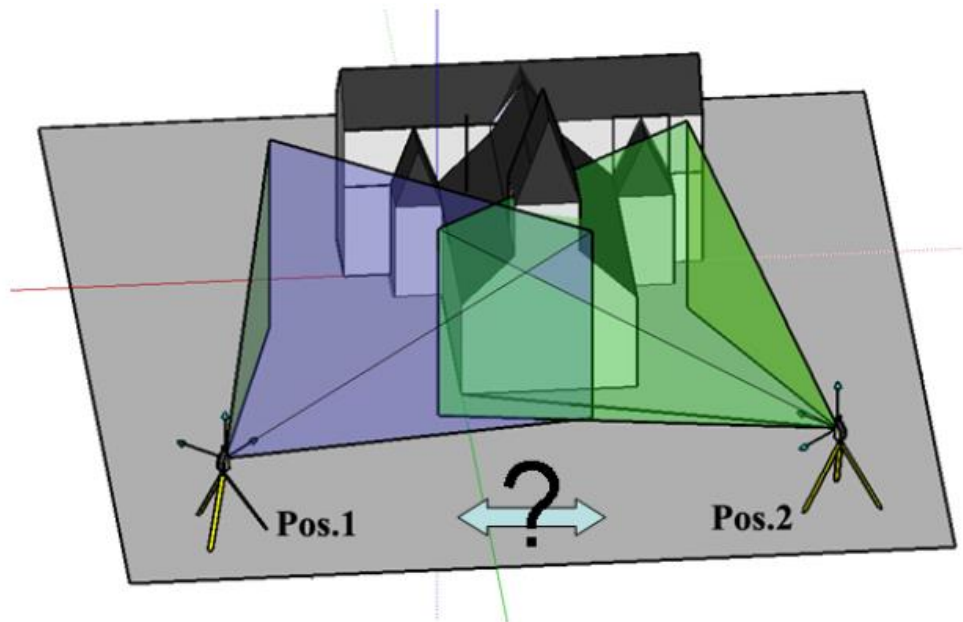
Fuente: Van Genechten, Björn Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning Training Material Based on Practical Applications [4]

Para el desarrollo de este proyecto, se empleará el escáner láser Riegl VZ-400, el cual pertenece a los dispositivos TLS (*de las siglas en inglés Terrestrial Laser Scanner, Escáner Laser Terrestre*). El Riegl VZ-400 es un sistema basado en la tecnología láser que permite obtener una muestra de la superficie de un objeto de diferente forma o tamaño. El resultado es una nube de puntos con gran detalle de la geometría y con un alto grado de precisión [9], es decir, un conjunto de vértices o puntos en un sistema de coordenadas tridimensionales cartesianas, identificados como coordenadas X, Y y Z, siendo la nube de puntos la representación de la superficie externa de un objeto [10].

3.3.4 Registro y Georreferenciación

En la utilización de la tecnología de escáner láser, se pueden presentar varios inconvenientes por parte de los objetos, por ejemplo ser demasiados grandes para ser registrados con una sola posición; debido a esto es necesario realizar diferentes escaneos que capturen la estructura completa del objeto, como se observa en la Figura 10.

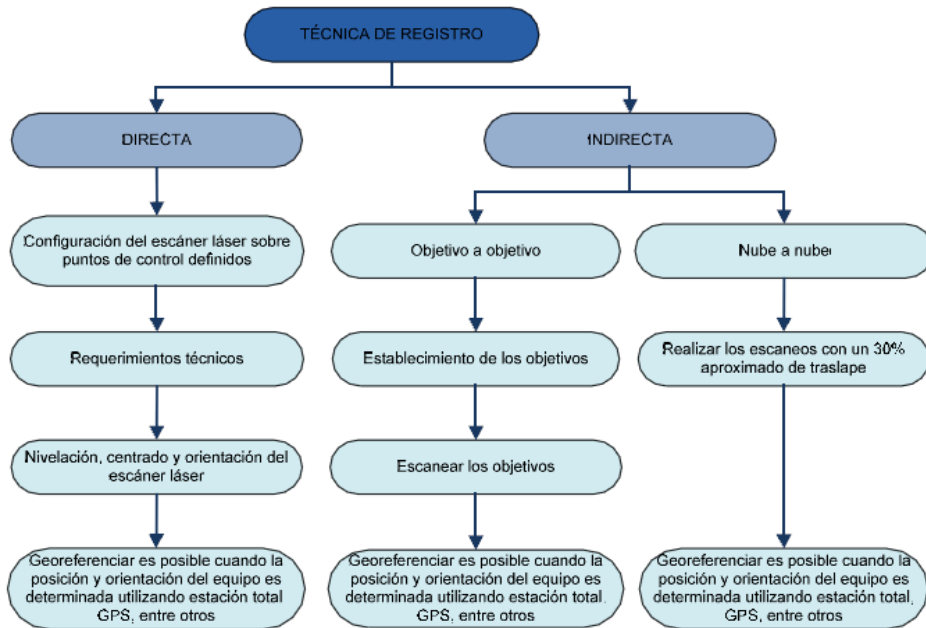
Figura 10 Registro entre dos estaciones del escáner láser



Fuente: Van Genechten, Björn Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning Training Material Based on Practical Applications [4]

Vinculado con el registro de los escaneos se encuentra la georreferenciación de todo el conjunto de datos, este proceso otorga a los datos georreferenciarlos a un sistema de coordenadas externas o geodésicas, que puedan ser de ámbito local o global, es decir, un sistema de coordenadas esféricas en que la posición es especificada por la latitud, longitud y altitud sobre el nivel del mar. En la Figura 11 se muestran las diferentes posibilidades para llevar a cabo el registro y la georreferenciación [11].

Figura 11 Técnicas de Registro y Georreferenciación

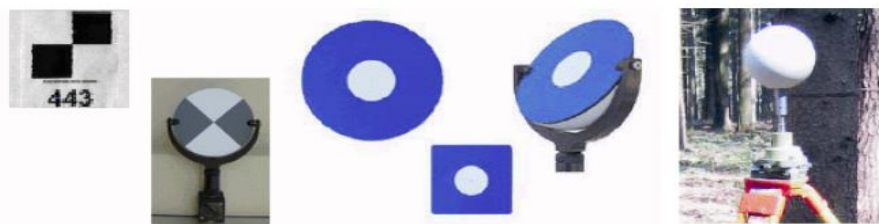


Fuente: Julia Désirée Velasteguí Cáceres and F. G. N. Manuel, “Uso y procesamiento del sistema escáner láser para el modelamiento 3D de datos geospaciales en la áreas de la construcción,” Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, 2013. [11]

3.3.4.1 Puntos de Referencia

Los puntos de referencia, targets o dianas, son elementos con material reflectante que pueden ser identificados fácilmente por el láser, por ello pueden ser empleados como puntos de referencia con el fin de determinar con gran exactitud sus posiciones en el sistema de coordenadas, facilitando el proceso de registro [4]. Actualmente hay una gran variedad de targets artificiales disponibles, tales como: retroreflectantes, esféricas, de papel, prismas, entre otros, como se visualiza en la Figura 12.

Figura 12 Tipos de Targets Artificiales



Fuente: Van Genechten, Björn Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning Training Material Based on Practical Applications [4]

Por otra parte, en la naturaleza existen diferentes puntos que son muy visibles en los escaneos, como lo son bordes de acero o esquinas de edificios. Estos puntos pueden ser empleados como puntos de referencia naturales en la nube de puntos [9].

3.3.4.2 Registro y Georreferenciación Indirecta

El registro indirecto se realiza por medio de puntos de referencia artificiales en el escenario de escaneo, los cuales son referenciados a un sistema de coordenadas geodésicas determinados por medio de un levantamiento topográfico, a través de equipos de posicionamiento global (GPS), lo que permite la transformación de las coordenadas de las nubes de puntos al sistema de coordenadas de los targets [9].

En lugares de difícil acceso, donde existe inconveniente al momento de posicionar los targets artificiales, como es el caso de zonas muy elevadas, se pueden utilizar entidades o blancos naturales, los cuales son puntos muy visibles en los escaneos, como lo son bordes de acero, cornisas, esquinas de edificios, entre otros. Estos puntos pueden ser empleados como enlaces identificados de manera manual en la nube de puntos [9].

Otro método empleado para la georreferenciación indirecta, es la alineación de la nube de puntos por medio de otra que posea un sistema de coordenadas establecido, este ajuste se puede realizar por medio del algoritmo ICP (en sus siglas en inglés Iterative Closest Point, Puntos de Cierre Iterativo), el cual comprueba iterativamente las distancias entre todos los puntos de las nubes y estima la transformación para alinear ambos conjuntos de manera que se minimice el error [4].

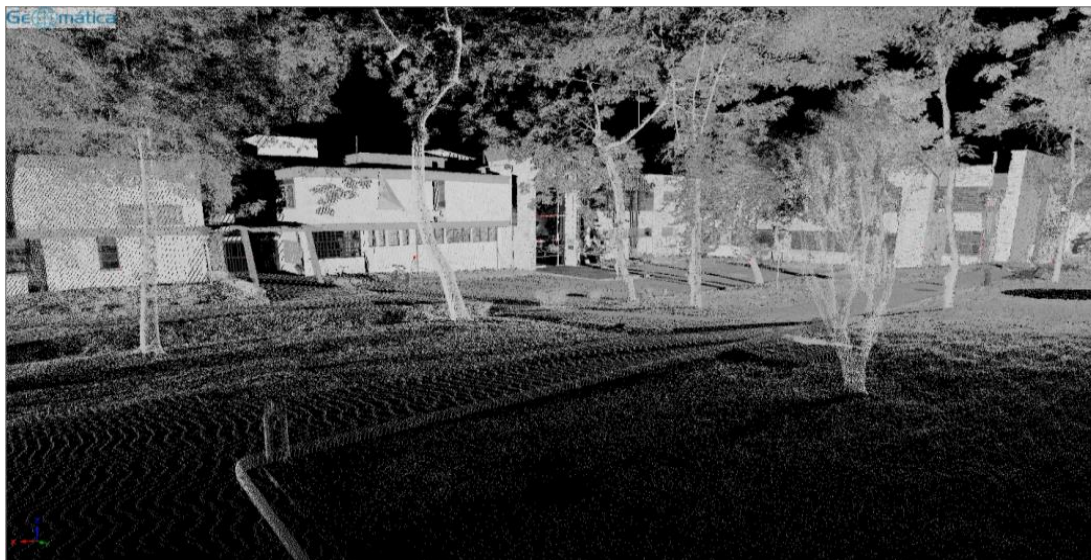
3.3.4.3 Registro y Georreferenciación Directa

Este método establece el cálculo directo de la posición y orientación del escáner, este proceso se puede realizar por medio de la ubicación del equipo sobre un punto georreferenciado ya establecido o a través del montaje de un dispositivo GPS, el cual ubica las coordenadas geodésicas del TLS y de la nube de puntos generada. Esta técnica reduce el número de targets a utilizar, por ello evita los requerimientos en cuanto a su configuración [9].

3.4 NUBE DE PUNTOS

La nube de puntos representa el conjunto de puntos que se genera al escanear un lugar o un objeto con el TLS, estos puntos se encuentran en un sistema de coordenadas tridimensionales cartesianas identificados como coordenadas X, Y y Z, brindando información sobre la forma y el tamaño de las superficies escaneadas [10] como se observa en la Figura 13. Asimismo son capturados atributos adicionales como el porcentaje de reflectancia y el color de la superficie del objeto por medio de una cámara fotográfica.

Figura 13 Escaneo realizado en la entrada principal de la escuela de Ingeniería Química UIS

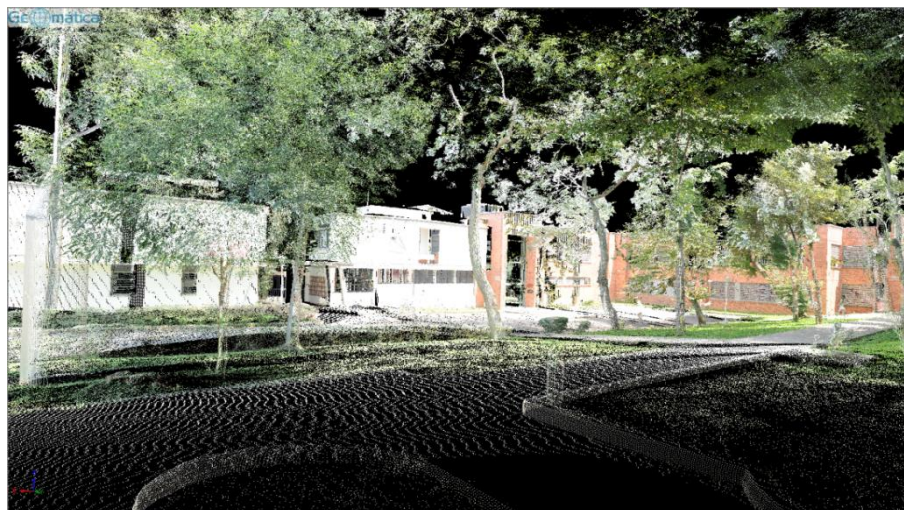


Fuente: Autor

La reflectancia es definida como la capacidad de las superficies de reflejar la luz y es expresada en porcentaje; en el caso del TLS, este valor es obtenido al realizar la relación entre la longitud de onda reflejada y la longitud de onda incidente por el rayo láser al impactar sobre cada punto de la superficie escaneada, de esta manera el TLS puede medir el porcentaje de reflectancia [9].

En el caso de los valores de color, el escáner hace uso de una cámara fotográfica Nikon D700 SLR (*soporta técnicas con imágenes HDR, en sus siglas en ingles High Dynamic Range, imágenes de alto rango dinámico, son un conjunto de técnicas que permiten un mejor rango dinámico de luminancias entre las zonas más claras y las más oscuras de una imagen a diferencias de las técnicas de imagen digital estándar*) y un flash externo conectado al escáner, el cual poseen un sistema de coordenadas propio llamado CMCS (*en sus siglas en ingles CaMera Coordinate System*) distinto al sistema de coordenadas del escáner y por medio de una matriz llamada COP (*en sus siglas en ingles Camera Coordinate System*), puede hacer la conversión entre el sistema de coordenadas CMCS al sistema de coordenadas del escáner llamado SOCS (*en sus siglas en inglés Scanners Own Coordinate System*) permitiendo asignar los valores de color RGB (*de las siglas en ingles Red, Green, Blue, es un modelo de color que permite representar un color mediante la mezcla por adición de los tres colores de luz primarios*) a cada punto de la superficie escaneada, por tal motivo el TLS puede realizar capturas de datos a color de alta calidad en condiciones de poca luz como se puede observar en la Figura 14 [4].

Figura 14 Escaneo realizado en la entrada principal de la escuela de Ingeniería Química UIS, puntos a color real



Fuente: Autor

3.4.1 Extracción de Características

La extracción de características consiste en la elección de propiedades importantes que poseen en común puntos o conjuntos de puntos, los cuales son utilizados para los procesos de segmentación y clasificación, aunque en muchas ocasiones, la identificación de características es un proceso subjetivo que se consigue a través de prueba y error [9].

Un proceso para la extracción de características es el PCA (*en sus siglas en inglés Principal Component Analysis*), que consiste en la transformación de un conjunto de puntos seleccionados en un número pequeño de variables denominadas componentes principales, estas variables son empleadas para establecer la dirección normal del conjunto de puntos, es decir, un vector perpendicular a los puntos seleccionados, el cual varía dependiendo de cada conjunto de puntos elegidos. El valor de la dirección normal es una característica relevante empleada para la segmentación y clasificación de puntos y segmentos [12].

Otras características relevantes se basan en el conocimiento humano acerca de la naturaleza de objetos de la vida diaria, las cuales son resumidas en conjunto de restricciones de categorías tales como [13]:

- **Restricción de Tamaño:** Los segmentos de gran área como son las paredes, pueden ser distinguidas fácilmente de otros segmentos de área más pequeña como son las puertas y ventanas.
- **Restricción de Posición:** Algunos segmentos o elementos de fachadas solo aparecen en ciertas posiciones, como es el caso de las ventanas y las puertas, las cuales están por lo general en las paredes, otro caso son los techos ubicados siempre en la parte superior de la fachada.
- **Restricción de Dirección:** Las paredes y los techos pueden ser distinguidos por sus direcciones, ya que las paredes son generalmente verticales y los techos no lo son.
- **Restricción de Topología:** Las propiedades de las edificaciones tienen cierta relación con la topología de otras características, como es el caso de los techos y el suelo, los cuales siempre se van a cruzar con las paredes.

- **Restricciones Varias:** Cualquier información puede ser útil para el reconocimiento de elementos en edificaciones. Por ejemplo las ventanas por lo general poseen una densidad de puntos más baja que otros elementos, debido a que el vidrio refleja un menor número de pulsos de laser que en otros materiales. Pero esto es solo una categoría de restricción opcional, ya que a veces las ventanas están cubiertas con cortinas y hacen que reflejen más pulsos laser.

En la Tabla 1 se muestra una lista de las restricciones para 7 elementos importantes de una edificación (suelo, paredes, ventanas, techo, puerta, salientes e intrusiones), considerando el suelo como uno de los elementos para ser reconocido, aunque en sí no es una característica de la fachada. Además definiendo intrusiones y salientes como elementos que está un poco más adentro y un poco más afuera que la pared respectivamente, estos dos elementos en su mayoría están intersectados por las paredes [13].

Tabla 1 Características de las Fachadas en Edificaciones

	Tamaño	Posición	Dirección	Topología	Diverso
Suelo	Segmento(s) con gran superficie	Menor			
Pared	Segmento(s) con gran superficie		Vertical	Pueden cruzarse con el suelo	
Ventana	Área de min < max	En la pared	Vertical		Láser de baja densidad en nube de puntos
Techo	Segmento(s) con gran superficie	Por encima de la pared	No Vertical	Intersección con una pared	
Puerta	Área de min < max	En la pared	Vertical	Intersección con el suelo	
Salientes		Un poco fuera de la pared / techo		Intersección con una pared	
Intrusiones		Un poco dentro de la pared / techo		Intersección con una pared	

Tomado de Pu, S., Vosselman, G., Automatic extraction of building features from terrestrial laser scanning [13]

Para alguno de los objetos que conforman la fachada de edificaciones, el reconocimiento se basa en sus características, ciertos objetos tienen mayor prioridad durante el proceso de reconocimiento que otros. De acuerdo a la Tabla 1, el reconocimiento de la ventana, techo, puerta, salientes e intrusiones requieren ser comparadas con la pared o el suelo, por lo tanto, estos dos elementos deben ser reconocidos antes de identificar los demás. Para el reconocimiento de paredes requiere de nuevo la comprobación de intersección con el suelo, por ello el suelo tiene mayor prioridad que la pared. En el reconocimiento de salientes e intrusiones dependen de la pared o del techo, lo que crea un nuevo ajuste de prioridad. Finalmente la prioridad de reconocimiento para los 7 elementos debe ser [13]:

Suelo > Pared > Techo = Ventana = puerta > Salientes > Intrusión

3.4.2 Segmentación

El proceso de segmentación es la partición o división de la nube de puntos en regiones o segmentos, donde cada punto es etiquetado dentro de grupo especial que contengan otros puntos con características o propiedades similares [9]. El objetivo de la segmentación es simplificar la representación de la nube de puntos en conjuntos definidos más fáciles de analizar. A continuación se explican distintos métodos de segmentación utilizados en el procesamiento de nubes de puntos:

- **Segmentación Basada en Ajuste a un Plano**

Este tipo de segmentación consiste en determinar la ecuación de un plano a partir de la selección de un punto aleatorio y todos los demás que estén dentro de un radio de vecindad cercano al punto seleccionado. Luego se determina la distancia que existe de todos los puntos con respecto al plano establecido, seleccionando solo los que estén por debajo de un umbral. Este proceso es repetido hasta que todos los puntos sean asignados a una región [14].

- **Segmentación Basada en el Crecimiento de Regiones**

Este método toma un conjunto de puntos semillas como entradas, las regiones crecen iterativamente mediante la comparación de todos los

puntos vecinos no asignados a ninguna región respecto a los puntos semillas. Este proceso continua hasta que todos los puntos tienen asignado una región o segmento [13]. La desventaja de este método recae en la selección de buenos puntos semilla, debido a que una mala elección, puede que el método no segmente adecuadamente todas las regiones [9].

- **Segmentación Basada en Características de los Puntos**

Esta segmentación se basa en las características propias de cada punto, como es mencionado en [4] [9] [15], se pueden agrupar puntos según las mediciones geométricas y radiométricas de los datos, tales como la superficie normal, el valor de reflectancia y el color RGB. La superficie normal consiste en estimar una superficie dentro del vecindario alrededor de cada punto y por medio del método PCA [16] o mediante regresión de mínimos cuadrados [12] se calcula el valor de la normal. Estos datos con características homogéneas y que ocupan regiones compactas y adyacentes, son denominados clúster [15].

- **Técnica de Segmentación Híbrida**

Este enfoque propuesto en [13] [14], selecciona puntos semilla aleatoriamente para realizar el mejor ajuste de un plano, luego aplica la segmentación basada en el crecimiento de regiones con los puntos semilla seleccionados anteriormente, esto con el fin de aprovechar las fortalezas de los dos métodos de segmentación, debido a que, solo los puntos dentro de cierta distancia a la superficie de la semilla y con la distancia perpendicular al plano semilla debajo de cierto umbral, puede ser añadido al nuevo segmento.

3.4.3 Clasificación

Una vez realizada la segmentación de los puntos, se procede a la clasificación en elementos previamente definidos, en el caso de las fachadas, lo son las paredes, puertas, ventanas, entre otros. Estos objetos tienen propiedades naturales como

son el tamaño, forma y ubicación, los cuales son características utilizadas para la clasificación de los segmentos previamente establecidos.

A continuación se explican distintos métodos de clasificación utilizados en las nubes de puntos:

- **Características Topológicas**

La topología, es decir la relación espacial entre los elementos, puede ser descrita por la adyacencia y la conectividad de los objetos, en el caso de las edificaciones, los techos y el suelo siempre van a intersectar con las paredes. Las ventanas están ubicadas siempre en las paredes. Estas características son expuestas por Vosselman [13], las cuales son utilizadas para la identificación de los elementos presentes en las fachadas.

- **Características Radiométricas**

La clasificación basada en características radiométricas utiliza la información espectral de cada punto, es decir, su porcentaje de reflectancia y color, los cuales pueden variar dependiendo las propiedades de la superficie, la rugosidad y el ángulo de incidencia del rayo [9], con esta información se puede calcular la fuerza de señal de retorno de la superficie registrada por el TLS, la cual es una medida para clasificar superficies continuas, ya que permite diferenciar elementos presentes en el escaneo [17].

- **Características Geométricas**

Este tipo de clasificación es la más empleada, ya que deriva de las coordenadas 3D de los puntos, los cuales suministran gran información de los objetos, independientemente cual sea el tipo de escáner laser empleado para realizar el escaneo.

En el artículo científico de Shi y Vosselman [13], proponen un método de clasificación de elementos de fachadas, iniciando con la segmentación de puntos por medio del método de crecimiento de regiones, luego proceden a identificar los elementos presentes de una fachada tales como ventanas,

puertas, paredes, techo, salientes, entre otros; posteriormente extraen las características naturales de cada uno de los elementos definidos, como se puede observar en la Tabla 1, creando un grupo de restricciones que permiten identificar cada objeto; por último realizan la clasificación, confrontando cada segmento de puntos a través de las restricciones definidas para determinar a qué elemento de la fachada pertenece [13].

Otro método propuesto para realizar la clasificación de elementos, a partir de características definidas, es el presentado en el artículo científico de Hernández y Marcotegui [18], donde plantean una clasificación realizada por medio de una SVM (*en sus siglas en inglés Support Vector Machine, Máquinas de Soporte Vectorial*), el cual es un conjunto de algoritmos que construyen un modelo capaz de predecir si un nuevo dato pertenece a una categoría o a otra, a través de un serie de ejemplos de entrenamiento. El SVM es un clasificador de aprendizaje supervisado, llamado así porque tienen una fase de entrenamiento en el cual los datos esperados de salidas son suministrados, de esta manera el SVM busca un hiperplano, es decir, un espacio unidimensional como una recta, que pueda dividir un conjunto de datos según sean las salidas esperadas [18].

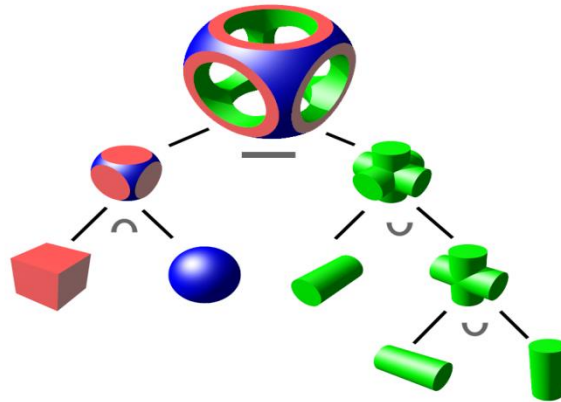
A diferencia de las características descritas en la Tabla 1, Hernández y Marcotegui consideran para la clasificación otros tipos de propiedades de los segmentos, tales como el área, la media, la desviación estándar, la moda, el máximo y el mínimo valor, de las alturas y la densidades de puntos por área de cada uno de los conjuntos de datos de la nube de puntos. De estas 11 características realizan un análisis estadístico, buscando las 6 propiedades que diferencien con claridad los tipos de elementos a clasificar, para ser utilizados como parámetros de entrada en el SVM [18].

3.4.4 Modelado 3D

Una vez teniendo los elementos de las fachadas reconocidos, se lleva a cabo el proceso de visualización mediante la generación de un modelo tridimensional a partir de las dimensiones extraídas de los objetos, con el fin de generar un producto final para el análisis y estudio del área escaneada o la posibilidad de indexar la información, para su posterior migración a herramientas más específicas como son los software de diseño asistido [18]. En la actualidad existen dos enfoques dominantes en la construcción de modelos tridimensionales, el primero se basa en el modelo CSG-tree (*en sus siglas en inglés Constructive*

Solid Geometry - tree, Árbol de Geometría Solida Constructiva), [19] el cual utiliza solidos primitivos, tales como cajas, esferas, cilindros, prismas, conos, aros, entre otros, y por medio de operadores booleanos de conjuntos, como son la unión, la intersección y la diferencia, un objeto complejo puede ser representado por medio del uso de solidos primitivos y operadores booleanos, como se observa en la Figura 15.

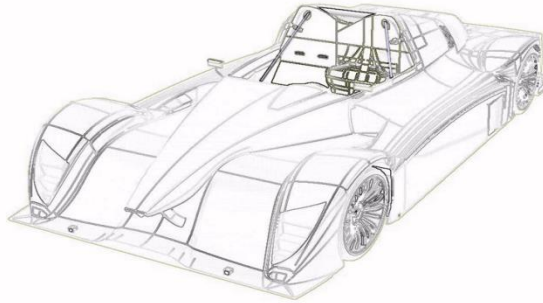
Figura 15 Modela 3D de una figura compleja, por medio de CSG- tree



Fuente: Bajaj C., Paoluzzi A. y Scorzelli G., *Progressive Conversion from B-rep to BSP for Streaming Geometric Modeling* 2007.

El segundo enfoque es el método B-rep (*en sus siglas en inglés Boundary Representation, Representación por límites*), el cual está compuesto por dos partes: la topología y la geometría (superficies, curvas y puntos). Los principales conceptos topológicos son: caras, aristas y vértices. Una cara es una sección de una superficie, una arista es una pieza acotada de una curva y un vértice es un punto que conecta dos o más aristas. Además considera que todos los objetos están limitados por un número finito de caras, compuestas a su vez por una cantidad finita de aristas, que a su vez por un número finito de vértices. Con este principio, existen varias estructuras de datos muy empleadas que siguen la norma jerárquica de vértice-arista-cara y junto con punteros que almacenan la información de la conectividad conforman la estructura del objeto, como se observa en la Figura 16 [20].

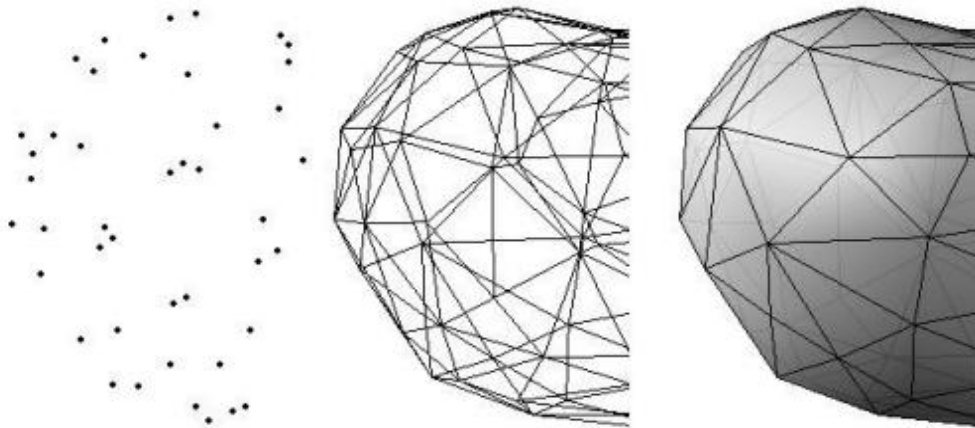
Figura 16 Modela 3D de un auto por medio de B-rep



Fuente: Raymaekers C. y Van Reeth F., Algorithms for Haptic Rendering of CSG Trees, Expertise centre for Digital Media. [19]

Otro enfoque para la representación de superficies está basado en la triangulación de Delaunay, que consiste en la generación de una red irregular de triángulos TIN (en sus siglas en inglés Triangulated Irregular Networks), es decir, una forma de dato basado en vectores y se constituye mediante la triangulación de un conjunto de vértices (puntos). Los vértices están conectados con una serie de aristas para formar una red de triángulos, los cuales cumplen el criterio que la circunferencia de cada triángulo de la red no debe contener ningún vértice de otro triángulo, el resultado es que los triángulos finos y largos se evitan en lo posible, formando un modelo 3D de la superficie, como se observa en la Figura 17 [9]Figura 17.

Figura 17 Reconstrucción de una superficie por medio de TIN



Fuente: López D., Hilda M., Gómez F., Antonio R. Superficies a partir de nubes de puntos 2011 [10]

3.4.4.1 Estándar CITYGML

CityGML es un enfoque práctico para el modelado tridimensional, ya que es un modelo de información y codificación basado en XML, es decir, la información del modelo es compactada en etiquetas de programación, con el fin de identificar los objetos y sus características presentes en el modelo 3D. Esta codificación del modelo permite la representación, el almacenamiento y el intercambio de ciudades virtuales y paisajes 3D. CityGML proporciona un mecanismo para la descripción de objetos 3D en cuanto a su geometría, topología, semántica, apariencia normal, relaciones entre los objetos y las propiedades espaciales, definiendo 5 niveles de detalle LOD (*en sus siglas en ingles Levels Of Detail*) [21]:

LOD 0: Regional o paisaje

LOD 1: Ciudad o región

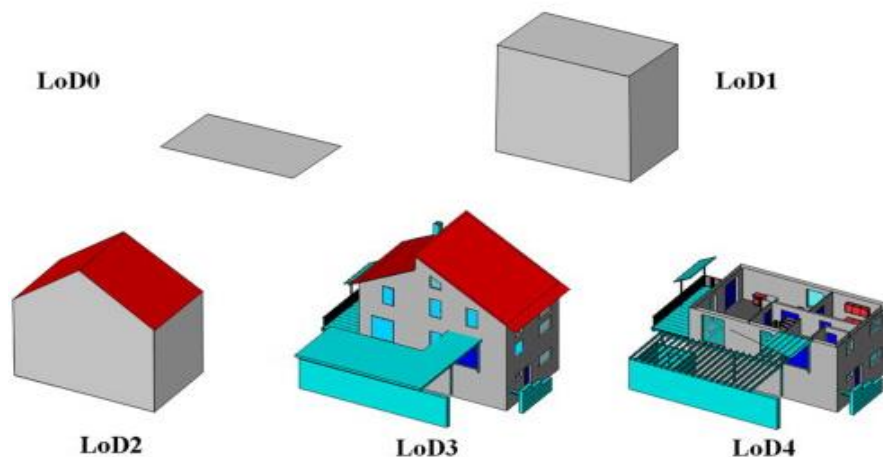
LOD 2: Distritos urbanos o proyectos

LOD 3: Modelos Arquitectónicos (exteriores), lugares de interés

LOD 4: Modelos Arquitectónicos (interior)

El modelo generado por CityGML varía según sea el número del LOD empleado, es decir, entre mayor sea el LOD utilizado, los objetos tendrán mayor detalle, como se puede observar en la Figura 18.

Figura 18 Los 5 niveles de detalle proporcionados por CityGML



Fuente: Gröger, G., Kolbe, T.H., Nagel, C., Häfele, K.-H. *OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard* [21]

3.5 ASPECTOS TÉCNICOS DE LA IMPLEMENTACIÓN

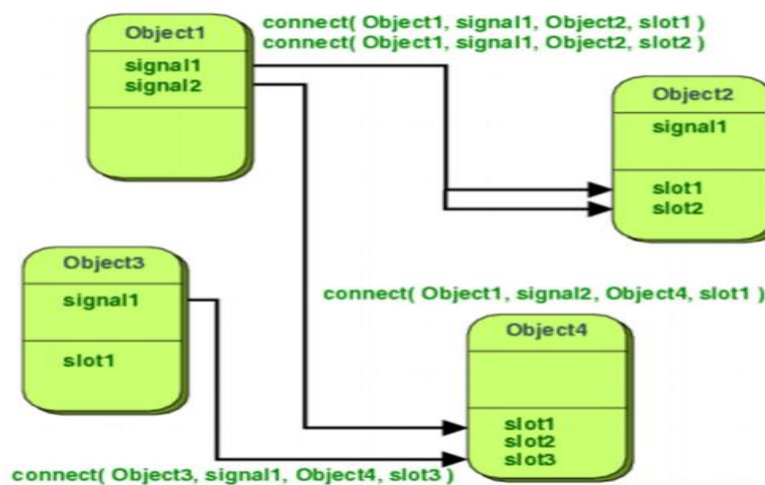
3.5.1 QT

QT es una biblioteca multiplataforma ampliamente usada para desarrollar aplicaciones con interfaz gráfica de usuario, así como también para el desarrollo de programas sin interfaz gráfica, como herramientas para la línea de comandos y consolas para servidores [22].

QT es desarrollado como un software libre y de código abierto a través de QT Project, donde participa tanto la comunidad, como desarrolladores de Nokia, Digia y otras empresas. Las librerías QT son una biblioteca multiplataforma utilizadas para el desarrollo de aplicaciones con interfaz gráfica de usuario, estas actualmente cuentan aproximadamente 500 clases, más de 9000 funciones y 500.000 líneas de código, brindando un alto grado de “potencia” aproximándose a lenguajes como C# o Java con la eficiencia de código compilado en C++ [22].

Una de las grandes ventajas que poseen estas librerías es que incluyen soporte para dibujo en 2D, hilos, red, bases de datos, etc. Lo que brinda una gran ventaja en comparación con los otros FrameWorks. Otras de las grandes ventajas que tienen las librerías QT es que es posible implementar objetos durante el desarrollo, los cuales brindan una ventaja ya que es posible la comunicación y el intercambio de información entre estos objetos [23].

Figura 19 Conexión entre objetos QT



Fuente: Guzmán G., Giraldo E., Monitoreo, Monitoreo a Través de Sistemas Embebidos a Procesos Industriales [23]

3.5.2 QT Creator

QT Creator es una herramienta utilizada para desarrollar aplicaciones con interfaces gráficas de usuario. Es multiplataforma, es decir se pueden programar aplicaciones ejecutables en diferentes sistemas operativos. El lenguaje propio de este programa es C++, sin embargo puede ser utilizado con otros lenguajes de programación por medio de bindings (*adaptaciones de la biblioteca a un lenguaje de programación diferente al original*) [22].

3.5.2.1 Ventajas

- Una de sus principales ventajas es que cuenta con un diseñador de formularios (GUI: Interfaces Gráficas de Usuario) integrado.
- Es posible administrar y crear varios proyectos.
- Soporta diferentes lenguajes (Python, Pascal, PHP, ruby, entre otros).
- Contiene un depurador de proyecto visual.
- Ayuda a la auto-completación de código.
- Resalta los errores en el código.
- Posee mucha documentación ONLINE.

Como se había mencionado anteriormente este IDE es multiplataforma y se puede encontrar para los siguientes sistemas operativos:

- Linux
- Mac OSX
- Windows
- Symbian
- Maemo

3.5.3 VTK

El kit de herramientas de visualización (VTK) es código abierto y biblioteca de software libre bajo la licencia BSD de clase C++ para la visualización de datos y procesamiento de imágenes 2D/3D por computadora. VTK consiste en una librería de C++ compatible con una amplia variedad de algoritmos de visualización. VTK es multiplataforma y soporta el procesamiento paralelo, además se integra con diversas bases de datos en herramientas GUI como Qt, funciona en Linux, Windows, Mac y Unix [24].

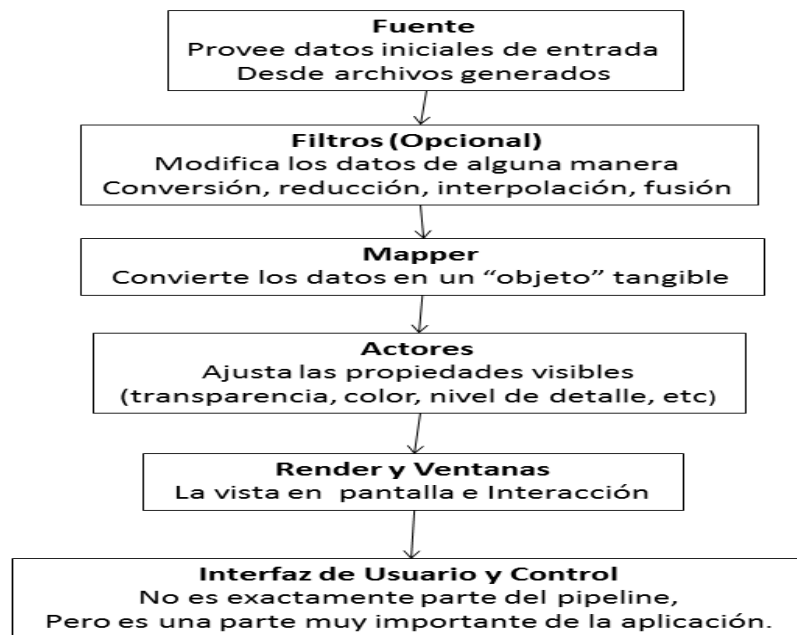
Características

- Capacidades de hacer gráficos y render, ya que incluye capacidades para desplegar primitivas geométricas, campos volumétricos, técnicas avanzadas de modelado tales como: modelado implícito, la reducción de polígonos, suavizado de mallas, corte, el contorno, entre otras.
- Capacidad de desarrollo de la interfaz de usuario con algunos lenguajes como: Tcl/Tk, Python/Tk y Java. De código Libre (Open Source), independiente de la plataforma o biblioteca.
- Extensible, portable, basado en el estándar OpenGL porque brinda un alto nivel de abstracción para gráficos 3D.
- Integrado con una biblioteca de interfaces gráficas de usuario (Tk, Qt, FLTK, WxWidgets, Java, X11, Windows, Mac OS).

La arquitectura VTK [24]:

- La estructura central es una canalización de datos a partir de una fuente de información para la visualización en pantalla.
- Los módulos individuales no actualizan su salida hasta que son llamados a hacerlo por algún otro modulo.
- Posee un núcleo compuesto de clases C++ compilado y una capa interpretado Tcl-Tk, Python y Java.

Figura 20 Arquitectura de Visualización Pipeline (Oleoducto) VTK



Fuente: A. María, G. Urueta, D. Carolina, and R. Osorio, "Herramientas Investigadas para obtener MediCom Índice general," 2010.

4 DISEÑO DEL ALGORITMO

A partir de los mejores métodos mencionados en el marco teórico, se diseñó el algoritmo que tiene como objetivo la identificación y modelado tridimensional de fachadas en nube de puntos capturadas por la tecnología escáner laser terrestre. Los pasos que se llevaron a cabo para el desarrollo se presenta en la Figura 21, comenzando con la adquisición de los datos, los cuales fueron brindados por el grupo de Investigación Geomática, gestión y optimización de sistemas, perteneciente a la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander. Estos datos son el producto de escaneos realizados con el escáner laser terrestre RIEGL VZ-400, adquirido en el 2013 por el mismo grupo. Como se mencionó anteriormente, esta información recolectada está representada por nube de puntos que contienen las coordenadas XYZ de toda la escena.

El paso siguiente es el pre-procesamiento de los datos, que inicia con la identificación y remoción de los puntos pertenecientes al suelo, esto con el fin de analizar solamente los puntos correspondientes a los objetos que se encuentran por encima del suelo. Luego estos puntos son segmentados por medio de la segmentación basada en el crecimiento de regiones, de esta manera se agrupan los puntos que no pertenecen al suelo en conjuntos de datos caracterizados por la cercanía entre ellos.

Posteriormente se identifican los conjuntos de puntos pertenecientes a las casas, por ello se parte del principio en que las fachadas son datos que poseen la mayor cantidad de puntos dentro de la escena, de esta manera se descartan todos puntos que no pertenecen a las viviendas. Por último, para terminar con el pre-procesamiento de los datos se realiza un análisis de continuidad en las fachadas presentes, por medio del cálculo de las alturas de los puntos más altos del conjunto de datos y donde exista una diferencia significativa de altura, se establece como el fin y el comienzo de una fachada y haciendo la respectiva división entre las casas.

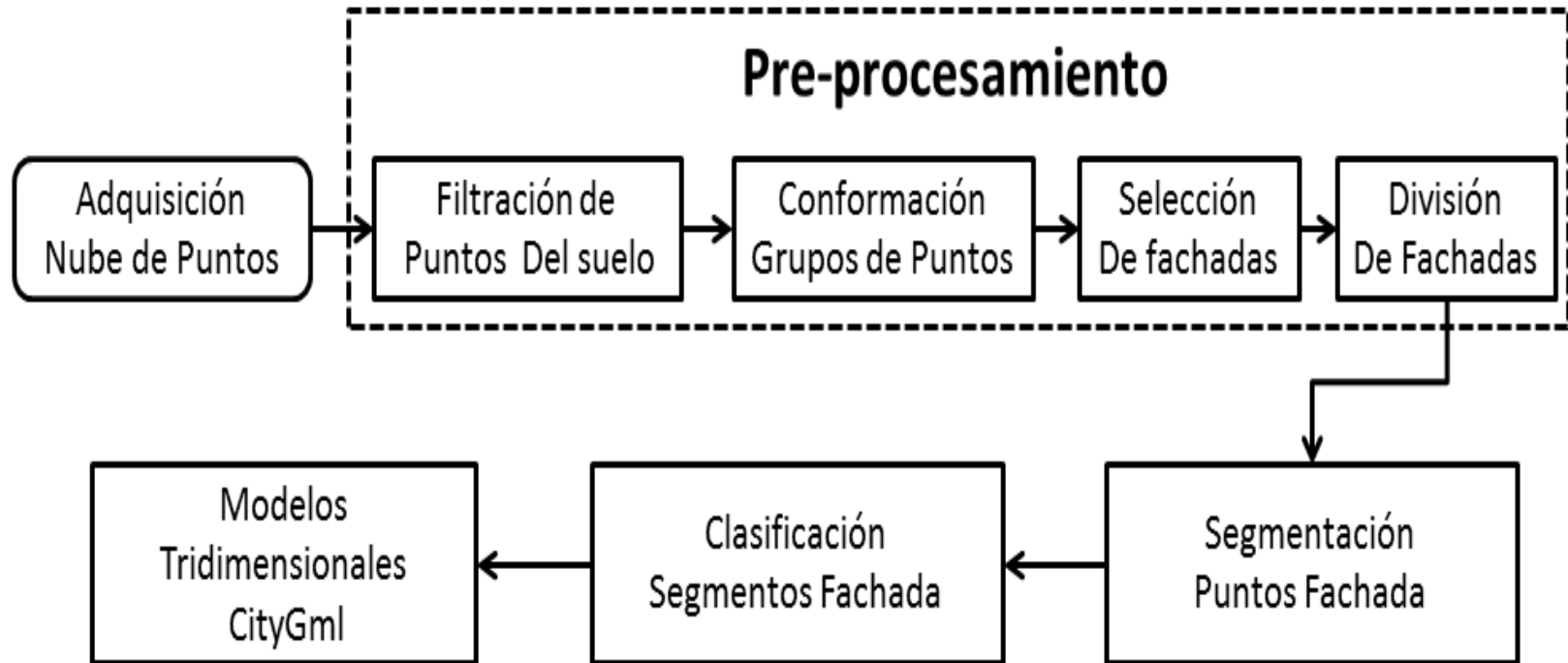
Una vez el pre-procesamiento de los datos, se realiza una segmentación basada en el crecimiento de superficies planas a los puntos, esto con el fin de definir los elementos de la fachada a través de planos. Luego estos segmentos son clasificados por medio de la evaluación de sus características propias tales como

son su tamaño, forma, ubicación, dirección, entre otros. De esta manera se tendrá identificado los elementos de las fachadas, como son las paredes, ventanas, techos y puertas.

Finalmente los segmentos clasificados como elementos de la fachada son procesados, analizando la geometría y extrayendo los vértices, los cuales permitan definir cada segmento como un sólido primitivo, ya sea un cuadrado, rectángulo, cubo, entre otros; y de esta manera modelar cada elemento de la fachada, obteniendo como resultado el modelo tridimensional de la edificación.

El algoritmo desarrollado en el procesamiento de los datos del escáner laser fue desarrollado en C++ en el IDE (por sus siglas en inglés de *Integrated Development Environment* o en español Entorno de Desarrollo Integrado) QT Creator y empleando la librería de VTK para la visualización de los datos. Ejecutados en un Computador HP Compaq 6005 con memoria RAM de 8 GB y sistema operativo Fedora 16, proporcionado por el grupo de investigación Geomática exclusivamente para el desarrollo de este proyecto debido al volumen de información que se procesa.

Figura 21 Diagrama de etapas en el desarrollo del algoritmo.



Fuente: Autor

4.1 ADQUISICIÓN DE DATOS

La adquisición de las nubes de puntos fue realizada por el grupo de investigación Geomática, gestión y optimización de sistemas, perteneciente a la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander, en colaboración para el desarrollo del presente proyecto. Estos datos fueron obtenidos en escaneos realizados con el escáner láser terrestre RIEGL VZ-400, adquirido en el 2013 por el mismo grupo. Un ejemplo del escáner se puede observar en la Figura 22.

Figura 22 Escáner Láser Terrestre RIEGL VZ-400



Fuente: Riegl, "Training Material for RIEGL VZ-XX - 4. Additional Accessories." [27]

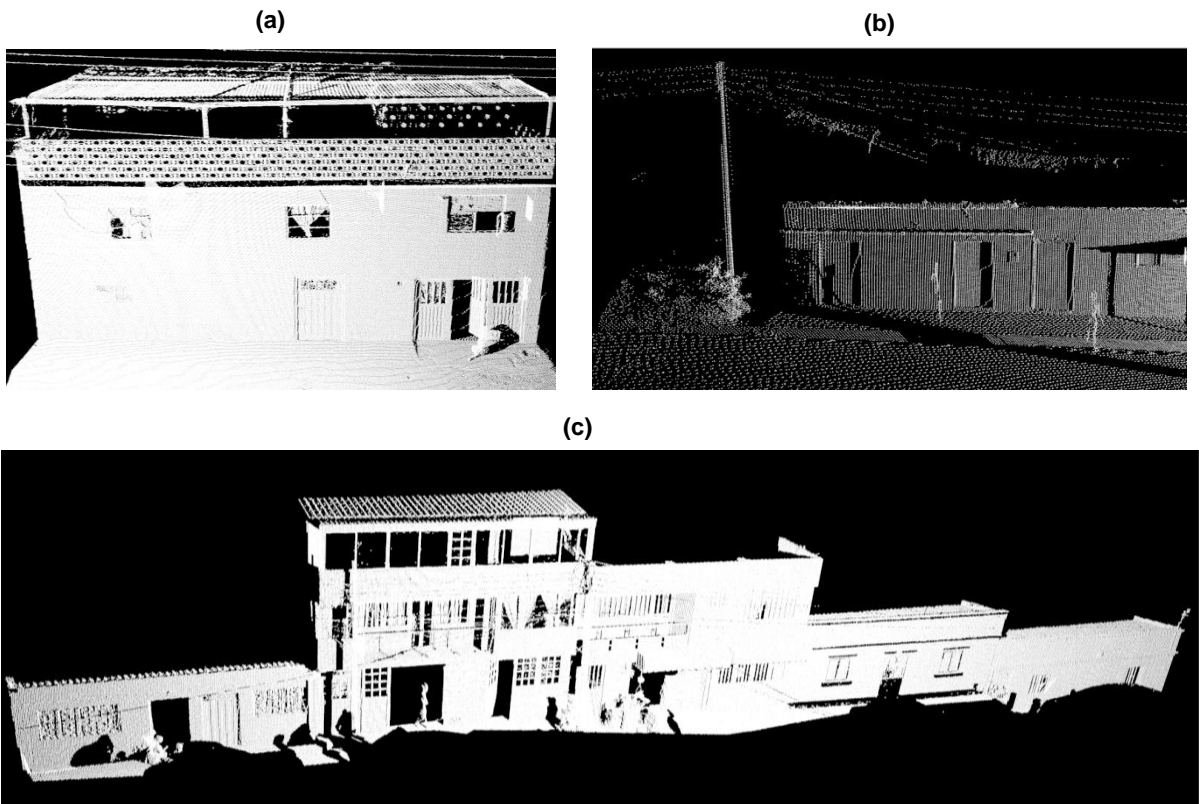
El escáner láser terrestre RIEGL VZ-400 es un instrumento de medición compacto y ligero que proporciona una alta velocidad, basado en la tecnología láser que permite obtener una muestra de la superficie de un objeto de diferente forma o tamaño. La información recolectada con este dispositivo tiene una gran precisión, comprendida en el orden de los milímetros, ya que se fundamenta en la digitalización del último eco de láser y el procesamiento de la frecuencia de onda, como se había mencionado anteriormente, lo que permite realizar mediciones superiores incluso en condiciones atmosféricas adversas. El mecanismo de escaneo del RIEGL VZ-400 se basa en un espejo poligonal de múltiples caras que proporciona líneas de escaneo unidireccional y paralelas. El resultado es una nube

de puntos con gran detalle de la geometría y con un alto grado de precisión, es decir, un conjunto de vértices o puntos en un sistema de coordenadas tridimensionales cartesianas, identificados como coordenadas X, Y y Z, siendo la nube de puntos la representación de la superficie externa de los objetos [10].

Para el presente proyecto, fueron suministrados escaneos realizados en la ciudad de Bucaramanga (Colombia), en el sector comprendido de la calle 18 entre carreras 26 y 27, también en los municipios de Piedecuesta, Vélez y Alto de Jordán, donde el grupo de Investigación Geomática realizó estudios topográficos empleando el escáner láser. Luego estos datos fueron analizados con el fin de filtrar y seleccionar escaneos de fachadas completas, con buena densidad de puntos y con pocos elementos que no obstruyeran la vista de la edificación, de esta manera se eligieron 17 edificaciones. En la Figura 23 se pueden observar algunas de las fachadas seleccionadas.

Figura 23 Escaneos de fachadas seleccionadas.

- (a) Fachada Seleccionada del Municipio de Vélez, etiquetada como Fachada N° 1.
- (b) Fachada Seleccionada del Municipio de Alto de Jordán, etiquetada como Fachada N° 2.
- (c) Fachada Seleccionada del Municipio de Piedecuesta, etiquetadas como Fachada N° 3, 4, 5, 6 y 7.



Fuente: Autor

4.2 PREPROCESAMIENTO

Una vez adquirida la nube de puntos se procedió a la construcción de los algoritmos para la etapa de preprocesamiento, es decir, la identificación de los puntos pertenecientes a la fachada o conjunto de fachadas contiguas y descartar los datos que no sean de interés. Esta etapa consta de cuatro pasos: filtración puntos del suelo, conformación grupos de puntos, selección de fachadas y división de fachadas.

4.2.1 Filtración Puntos Suelo

Para la selección de los puntos del suelo se buscó un método simple que no implicara de muchas iteraciones para obtener un buen resultado, debido a la cantidad de puntos dentro de una escena, los cuales varían desde miles hasta millones de datos; por tal motivo se optó como referencia el método propuesto por Douillard B. [25], donde expone una segmentación basada en rejilla, la cual consiste en realizar un cálculo del ancho, alto y largo de la nube de puntos, para luego formar cubos tridimensionales imaginarios del mismo tamaño llamados voxel, que dividen la nube de puntos en forma de rejilla. Reduciendo la cantidad de puntos a procesar por la cantidad de voxels presentes. Los tamaños de los voxels fueron de 10 cm³ como es recomendado por Douillard B [25].

Una vez realizada la implementación del método propuesto por Douillard B., se hace un análisis de cada voxel, tomando los puntos con la coordenada Z más alto, más bajo y la diferencia entre estos dos valores, con el fin de calcular el grado de inclinación presente en los datos estudiados; si el valor es inferior a 4 cm entonces ese voxel es considerado como suelo, de lo contrario es considerado como no suelo; este valor fue considerado después de realizar varias pruebas con diferentes escenas. Posteriormente se realiza un filtro por alturas, calculando el promedio de la coordenada Z de los voxels suelo y descartar el ruido causado por superficies horizontales no pertenecientes al piso tales secciones de techos, bordillos en ventanas, entre otros.

Por último, se realiza un análisis de vecindad de cada voxel, contando los tipo suelo o tipo no suelo más cercanos en una vecindad 26, es decir los voxel contiguo al voxel analizado, y dependiendo de cual tipo sea mayor, se asigna

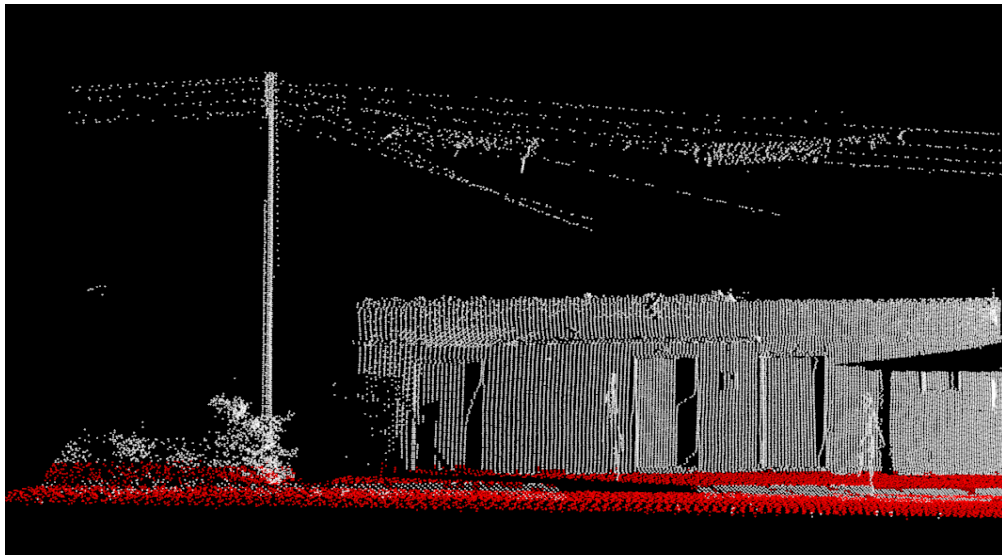
como suelo o no suelo; esto con el fin de hacer una limpieza de aquellos voxel que por cierta característica no hallan sido asignados a su correspondiente tipo, ya sea por su ubicación, altura o la cantidad de puntos dentro del voxel, obteniendo como resultado una selección de los puntos del suelo como se observa en la Figura 24 y Figura 25.

Figura 24 Resultado Selección Puntos del Suelo Fachada N° 1



Fuente: Autor

Figura 25 Resultado Selección Puntos del Suelo Fachada N° 2

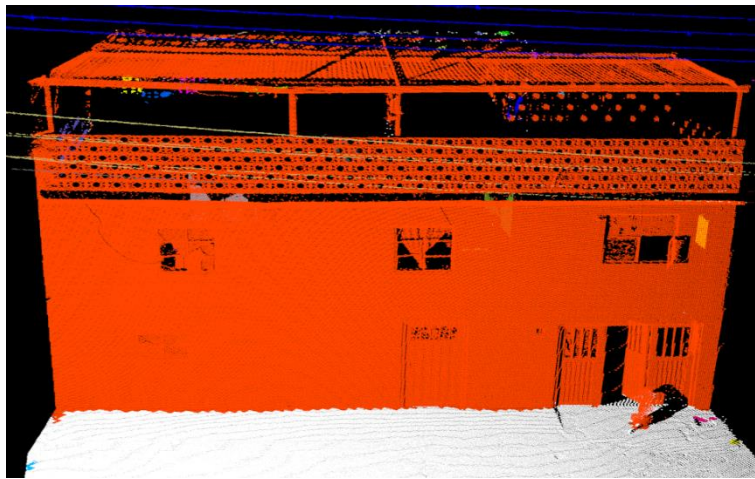


Fuente: Autor

4.2.2 Conformación Grupos de Puntos

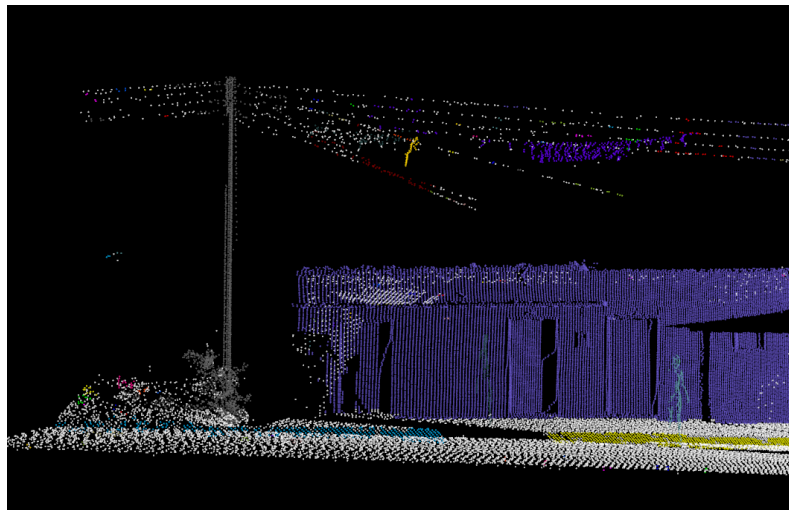
Una vez identificados los voxels y en consecuencia los puntos que no pertenecen al suelo se procede a conformar grupos para diferenciar los objetos presentes en la escena y que están conectados por medio del suelo, tales como casas, árboles, vehículos, personas, señales de tránsito, entre otros. Para ello se utiliza la segmentación basada en el crecimiento de regiones mencionada anteriormente, formando clúster de los elementos que se encuentran en la nube de puntos como se muestra en la Figura 26 y Figura 27.

Figura 26 Resultado Conformación Grupos de la Fachada N° 1



Fuente: Autor

Figura 27 Resultado Conformación Grupos de la Fachada N° 2

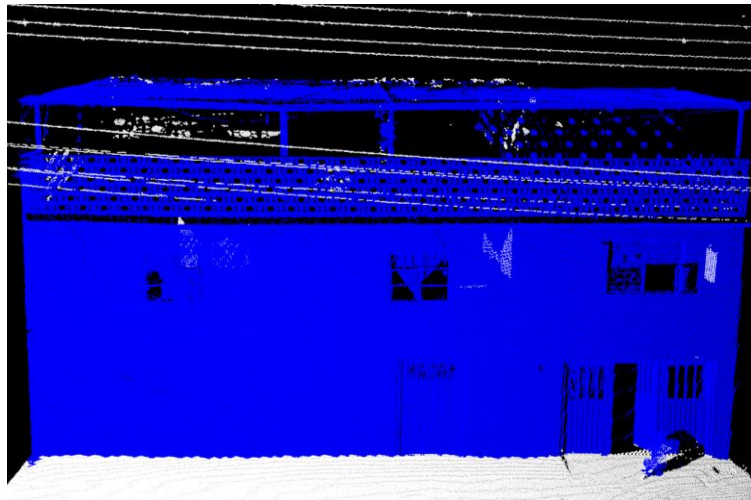


Fuente: Autor

4.2.3 Selección de Fachadas

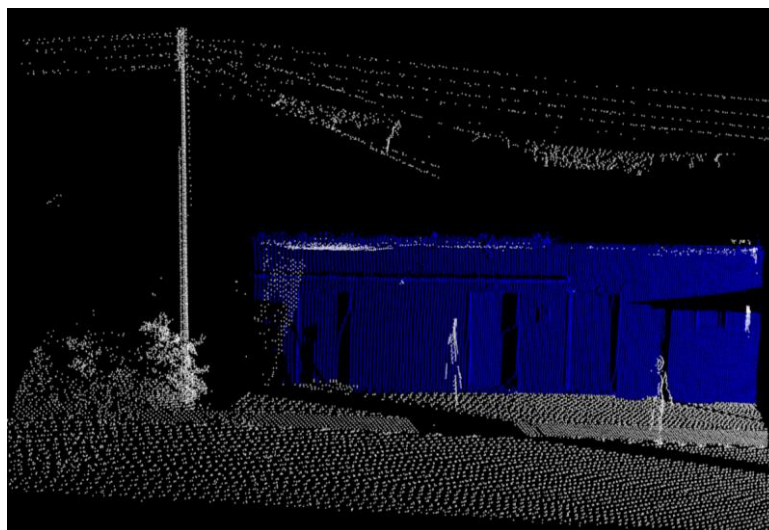
Luego de tener definidos los grupos de los puntos de los elementos por encima del suelo, se procede a identificar las casas y descartar lo demás, por ello se parte del principio en que los segmentos de fachadas son clúster que poseen la mayor cantidad de puntos dentro de la escena, de esta manera se eliminan los objetos en la nube de puntos que no son casas como se visualiza en la Figura 28 y Figura 29.

Figura 28 Resultado Selección de Fachadas de la Fachada N° 1



Fuente: Autor

Figura 29 Resultado Selección de Fachadas de la Fachada N° 2



Fuente: Autor

4.2.4 División de Casas

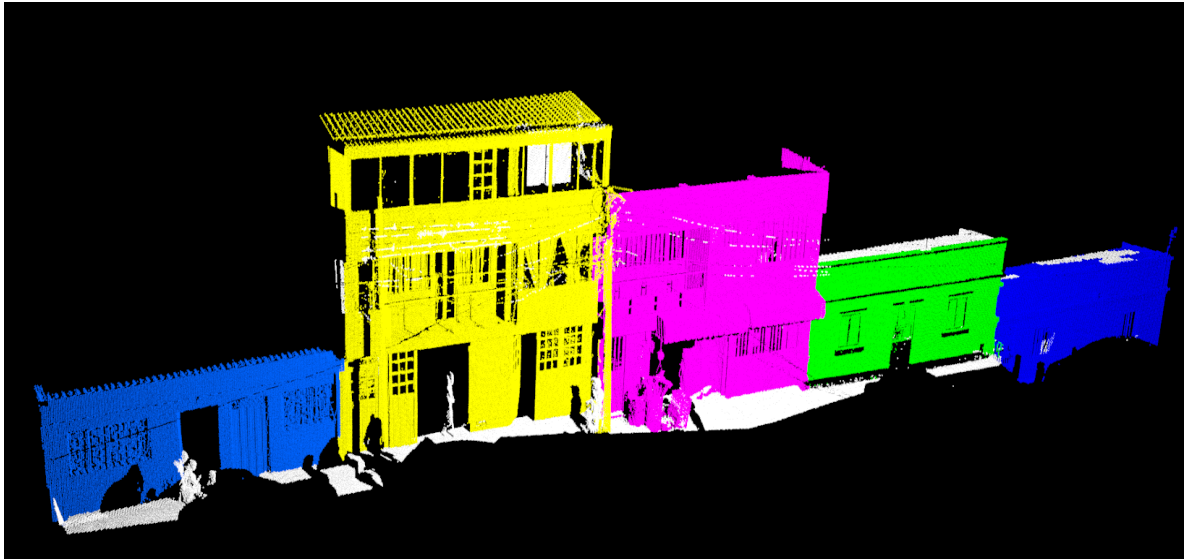
Una vez identificado los puntos pertenecientes a las fachadas, se realiza una división de las casas presentes en el clúster, esto con el fin de agrupar los puntos en conjuntos más pequeños y obtener una reducción en el procesamiento y tiempo de ejecución en los pasos siguientes de segmentación y clasificación de los elementos de las fachadas.

Para la división de las casas, primero se hacen cortes de 10 centímetros a lo largo del clúster, luego en cada una de las divisiones del conjunto de puntos de fachadas se calcula la altura máxima, obteniendo de esta manera las alturas de cada división de 10 cm. Posteriormente se hace un recorrido de las divisiones del clúster de izquierda a derecha, calculando la desviación estándar de cada una de las alturas hasta encontrar una desviación superior a 0.3, este valor fue definido como un umbral establecido después de análisis hechos con varias fachadas. Al encontrar una altura con la desviación estándar mayor al umbral, se seleccionan todos los puntos que pertenecen a estas secciones definiéndolas como una nueva fachada, luego se vuelve reinicia el cálculo de la desviación estándar con las secciones faltantes del clúster hasta encontrar otra desviación que sea mayor al umbral establecido.

Después del análisis de la desviación estándar de las alturas de cada sección del clúster, se hace un estudio de vecindad en las divisiones donde se determinó el fin y el comienzo de cada fachada, tomando cada uno de los puntos de esa sección y calculando el número de vecinos pertenecientes a una distancia no mayor a 10 centímetros, luego se hace la comparación de la cantidad de vecinos que hayan sido etiquetados como fachada antes o después de la división y se establece el punto analizado como perteneciente a la fachada con la mayor cantidad de vecinos presentes.

Cabe resaltar que el método propuesto para la división de las casas, solo se aplica donde las fachadas tiene una diferencia de altura significativa, como se puede visualizar en la Figura 30.

Figura 30 Resultado División de Fachadas de las Casas N° 3, 4, 5, 6 y 7



Fuente: Autor

4.3 SEGMENTACIÓN

Una vez identificado los puntos pertenecientes a las fachadas en la escena, se procede a realizar su respectivo análisis para identificar y dividir los datos en regiones definidas por características o propiedades similares que los hacen distintos a otros conjuntos, a estos grupos de puntos se les denominara como segmentos de fachada. Para este proceso se eligieron los métodos de segmentación basados en ajuste de planos y en el crecimiento de regiones mencionados anteriormente, por tal motivo se empleó el método RANSAC, para realizar los ajustes de los planos en la nube de puntos.

4.3.1 Ransac

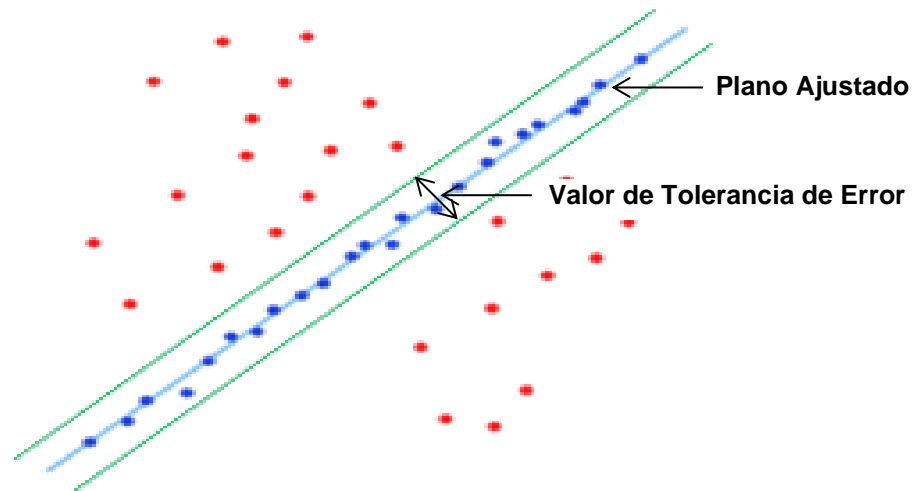
El método iterativo RANSAC (*por sus siglas en inglés Random Sample Consensus o en español Concenso Muestra Aleatoria*) es un algoritmo robusto para el ajuste de modelos matemáticos en presencia de gran cantidad de valores atípicos el cual fue introducido por primera vez por (Fischler y Bolles, 1981). Es uno de los métodos de votación probabilísticos conocidas para reducir el tiempo de cálculo [26].

En primer lugar, los subconjuntos son seleccionados al azar a partir de los datos de entrada y los parámetros del modelo se calculan de modo que se ajusten a la muestra. El tamaño de la muestra depende del modelo matemático (línea, plano, cilindro, esfera, entre otros) se quiere encontrar. Normalmente, el tamaño de la muestra es el número de puntos suficientes para determinar los parámetros del modelo "más pequeño". Por ejemplo, para encontrar un plano en el conjunto de datos, se debe seleccionar un conjunto de tres puntos, ya que este es el número mínimo de datos para determinar los parámetros de un plano (vector normal y la distancia del plano de origen) [26].

El siguiente paso es evaluar la calidad del modelo. Típicamente, un valor de tolerancia de error determina un volumen alrededor del plano dentro del cual todos los puntos deben caer. Entonces una función de coste calcula la calidad del modelo, es decir la cantidad de puntos que están de acuerdo con el modelo dentro de una tolerancia de error como se visualiza en la Figura 31, donde se hace el

cálculo de la cantidad de puntos que se encuentra entre la línea azul y las líneas verdes [26].

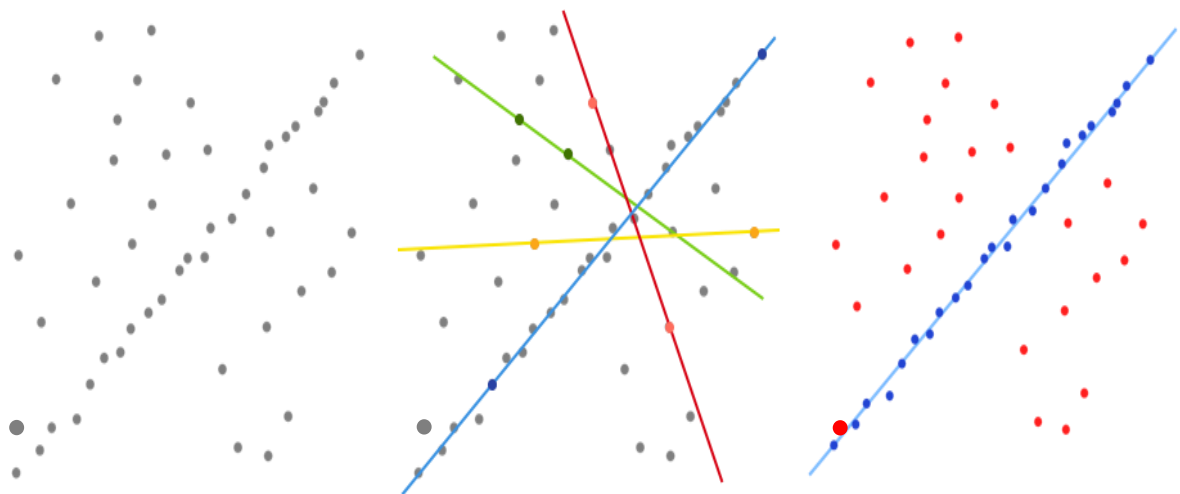
Figura 31 Diagrama toletancia de error en el ajuste de un plano



Fuente: Autor

Por lo tanto, el plano que contiene más puntos ajustados dentro de la distancia de tolerancia es considerado ser el mejor plano. El proceso termina cuando completa el número de iteraciones predeterminadas. La Figura 32 demuestra el método de RANSAC con 4 iteraciones aplicado a un grupo de 50 puntos.

Figura 32 Algoritmo de RANSAC con 4 iteraciones



Fuente: Autor

4.3.2 Metodología de Segmentación

Para la segmentación de elementos de fachadas se emplea la combinación de la segmentación basada en ajustes de planos y de crecimiento de regiones como se había mencionado anteriormente, esto con el fin de aprovechar las fortalezas de los dos métodos.

Primero se realiza el ajuste del mejor plano por medio del algoritmo de RANSAC, asignado los parámetros de entrada a la implementación del método, estos son el valor de tolerancia de error y el número de iteraciones para considerar un buen ajuste de un plano. El valor de tolerancia de error o distancia de tolerancia de los puntos al plano es de 50 centímetros, este valor fue determinado con base a varias pruebas realizadas con el conjunto de fachadas seleccionadas en busca de un umbral para seleccionar todos los puntos pertenecientes a la fachada frontal de la edificación.

El número de iteraciones es igual a un tercio de la cantidad de puntos del clúster, este valor se determinó debido a que 3 puntos son la cantidad mínima de valores necesarios para ajustar un plano y al realizar la selección de los puntos aleatoriamente, con un tercio de iteraciones se habrá seleccionado todos los puntos en busca del mejor plano ajustado.

Una vez hallado el mejor plano dentro del conjunto puntos de la fachada, se procede realizar la segmentación de crecimiento de regiones, tomando como datos semilla los puntos elegidos aleatoriamente por RANSAC. El algoritmo terminará cuando no encuentre más vecinos cercanos de los datos semilla.

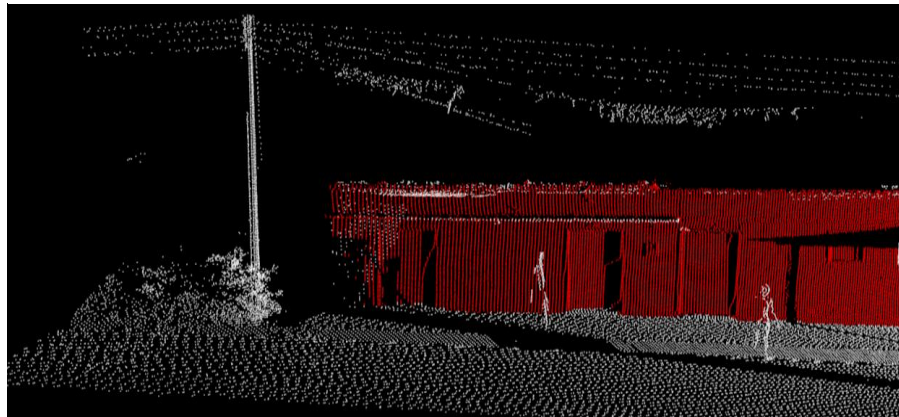
Finalmente, para que un punto pueda ser asignado a un segmento, debe cumplir dos condiciones, primero estar dentro de la distancia de tolerancia al plano ajustado y segundo ser vecino cercano a los datos semilla. Los resultados de la segmentación se muestran en la Figura 33, Figura 35 y Figura 34.

Figura 33 Resultado Segmentación de la Fachada N° 1



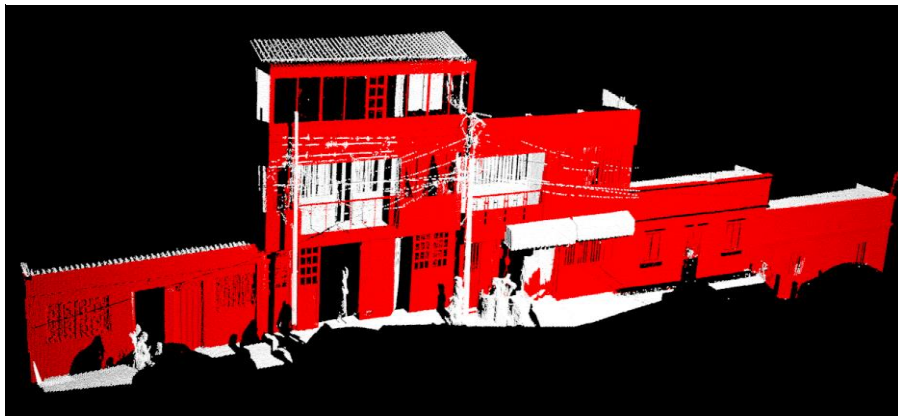
Fuente: Autor

Figura 35 Resultado Segmentación de la Fachada N° 2



Fuente: Autor

Figura 34 Resultado Segmentación de las Fachadas N° 3, 4, 5, 6 y 7



Fuente: Autor

4.4 CLASIFICACIÓN

El proceso de clasificación consiste en la separación de puntos o segmentos, en diferentes elementos definidos previamente (en el caso de las fachadas, lo son las paredes, puertas, ventanas y techos), por medio de la evaluación de sus características intrínsecas o naturales, es decir, características propias presentes en los elementos de las edificaciones, tales como [9]:

- **Tamaño:** Los segmentos de gran área como son las paredes, pueden ser distinguidas fácilmente de otros segmentos de área más pequeña como son las puertas y ventanas.
- **Posición:** Algunos elementos aparecen en ciertas ubicaciones, por ejemplo las ventanas y las puertas están siempre en las paredes; los techos en la parte superior de las paredes.
- **Dirección:** Las paredes y los techos pueden ser distinguidos por sus direcciones, ya que las paredes son generalmente verticales y los techos no lo son.
- **Topología:** Las propiedades de las edificaciones tienen cierta relación con la topología de otras características, como es el caso de las paredes deben intersectar con suelo.
- **Densidad:** Cualquier información puede ser útil para el reconocimiento de elementos en edificaciones. Por ejemplo las ventanas por lo general poseen una densidad de puntos más baja que otros elementos, debido a que el vidrio refleja un menor número de pulsos de laser que en otros materiales. Pero esto es solo una categoría de restricción opcional, ya que a veces las ventanas están cubiertas con cortinas y hacen que reflejen más pulsos láser.

Para algunas de las características, el reconocimiento se basa en otras ya reconocidas, es decir, ciertas características tienen mayor prioridad durante el proceso de identificación. Por ejemplo la característica de posición mencionada anteriormente, las ventanas y puertas están siempre ubicadas dentro de las paredes, para ese caso el elemento pared tendría que estar identificado antes. También en las características topológicas de los elementos, las paredes deben

intersectar con el suelo, para ello los puntos del suelo deben estar identificados. Por ello se tomará en cuenta la recomendación por G. Vosselman en, definiendo la prioridad de reconocimiento para las características [13]:

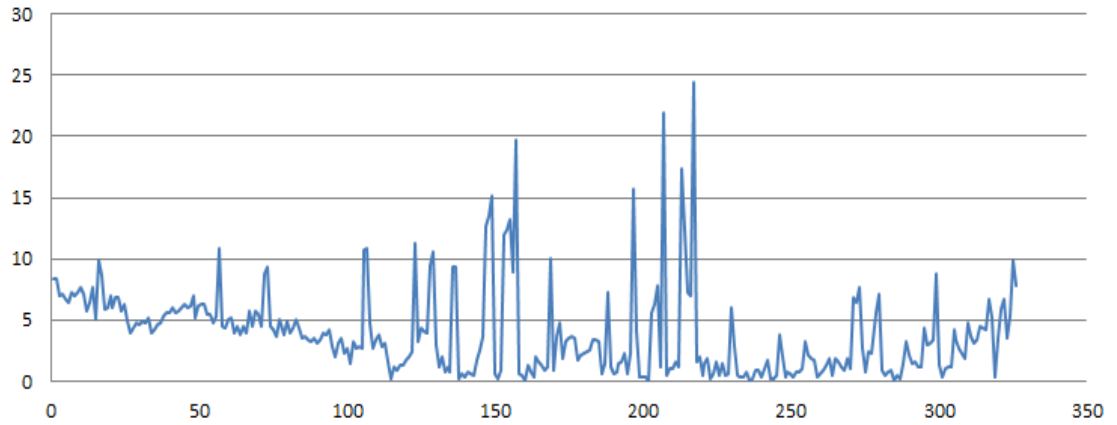
Suelo > Pared > Techo = Ventana = puerta > Salientes > Intrusión

El suelo tiene la mayor prioridad en los elementos a identificar, pero en el pre procesamiento, ya están definidos los puntos del suelo como se observa en la Figura 24 y Figura 25. Ahora siguiendo las recomendaciones de G. Vosselman en [13], se definirá los puntos de la pared, para ello se utilizará el plano ajustado por RANSAC en el paso anterior de segmentación y se calcula la distancia de todos los puntos del segmento fachada al plano ajustado, luego se obtiene el promedio y desviación estándar del conjunto de valores de distancias. Por último se recalcula un nuevo plano por medio de RANSAC sobre los puntos fachada pero con el valor de tolerancia de error o distancia de tolerancia de los puntos al plano igual a la desviación estándar calculada, este nuevo enfoque es expuesto en [26][26][26][26], indicando que la distancia mínima asociada al método de RANSAC puede determinarse a partir de la dispersión de la agrupación de los puntos en la escena.

El análisis realizado de la dispersión de los puntos fachada como es recomendado en, se representa en la Figura 36 y Figura 39, donde se visualiza una clara diferencia entre los histogramas de las fachadas, los cuales varían de 0 a 25 y de 0 a 10 para las fachadas 1 y 2 respectivamente, además en los valores de media y desviación estándar, los cuales son para la fachada 1 media de 4,17506 y desviación estándar de 4,21058, para la fachada 2 media de 2,72729 y desviación estándar de 3,28627, lo que indica que las propiedades como el material de la fachada, la arquitectura, la textura, entre otros, influyen en los datos de la fachada y las hacen cada una como un caso específico, por ello el restablecimiento de los valores de entrada a RANSAC en cada casa lo convierte en un método válido y eficiente para la identificación de los elementos de la fachada.

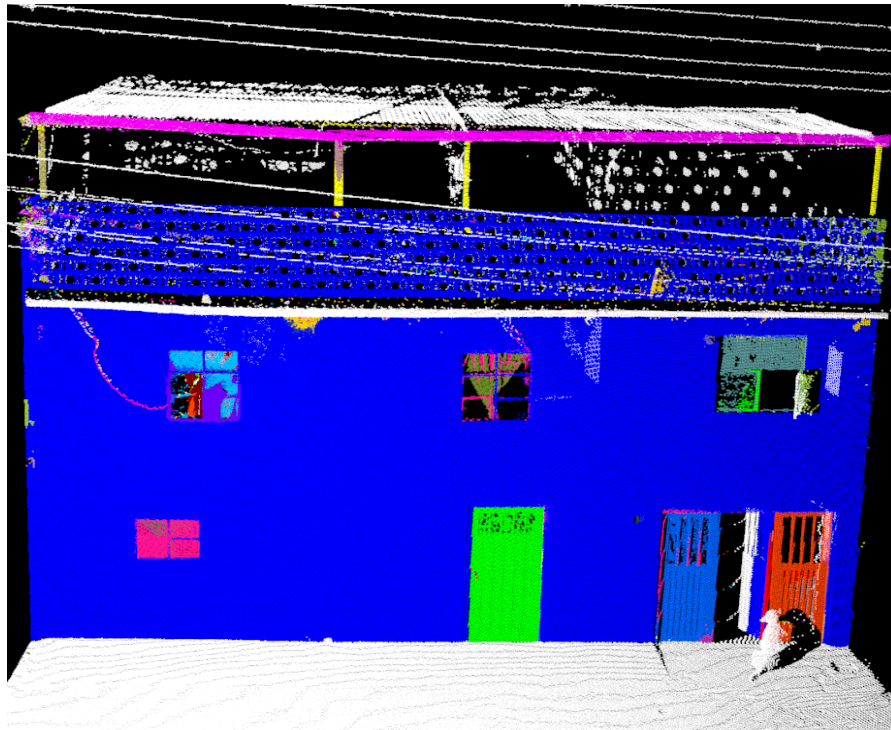
Los resultados de la identificación de los puntos pared, se pueden visualizar en las Figura 37 y Figura 38, asignando con color azul la pared de la fachada y en otros colores los demás segmentos que no han sido clasificados.

**Figura 36 Histograma de Dispersión de los puntos de la Fachada #1
Cantidad de Puntos VS Distancia Puntos al Plano (cm)**



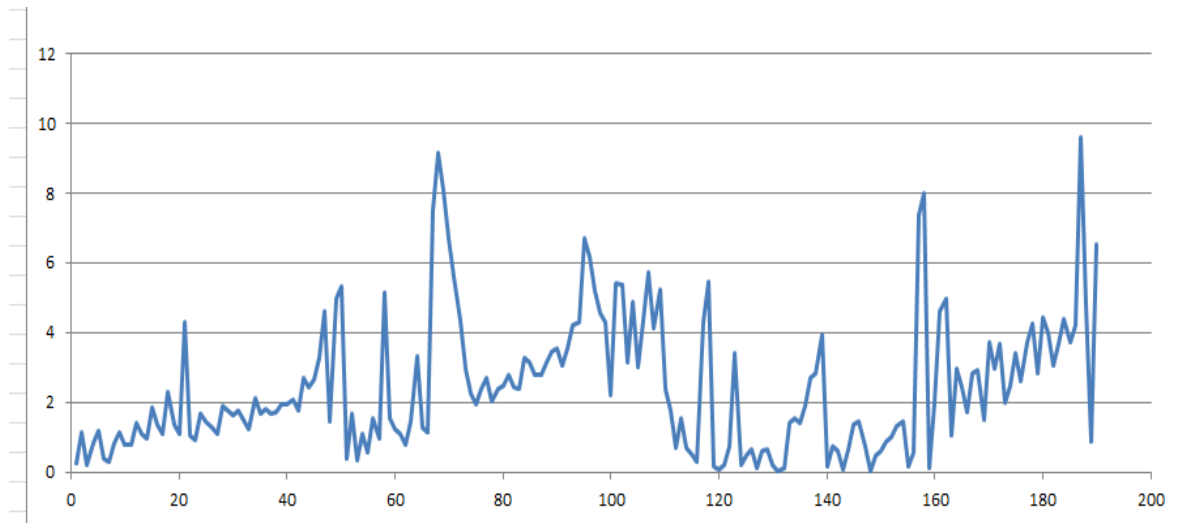
Fuente: Autor

Figura 37 Resultado Selección Pared de la Fachada N° 1



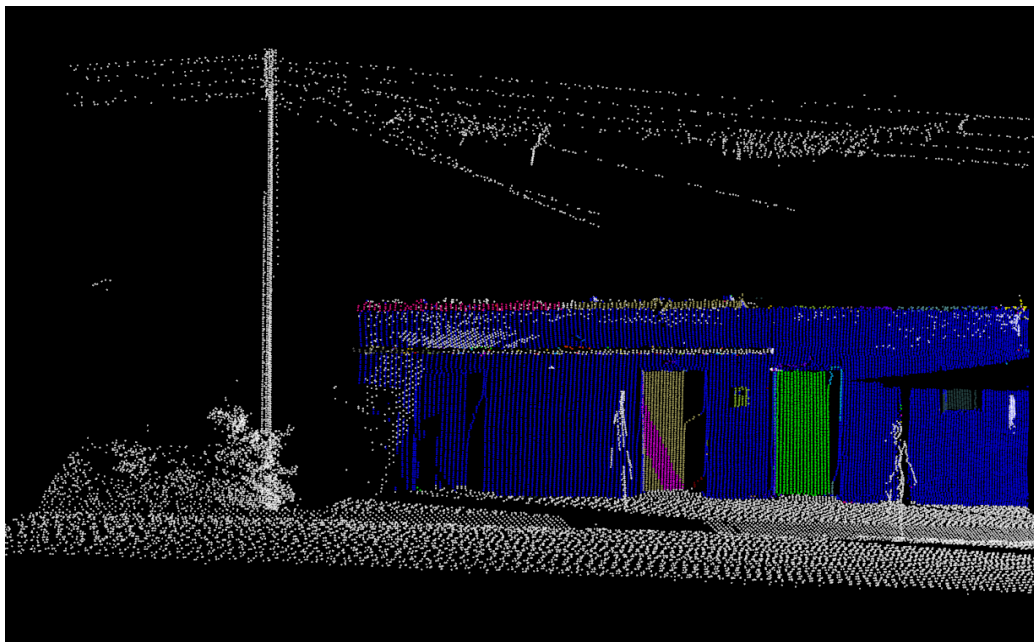
Fuente: Autor

**Figura 39 Histograma de Dispersión de los puntos de la Fachada #2
Cantidad de Puntos VS Distancia Puntos al Plano (cm)**



Fuente: Autor

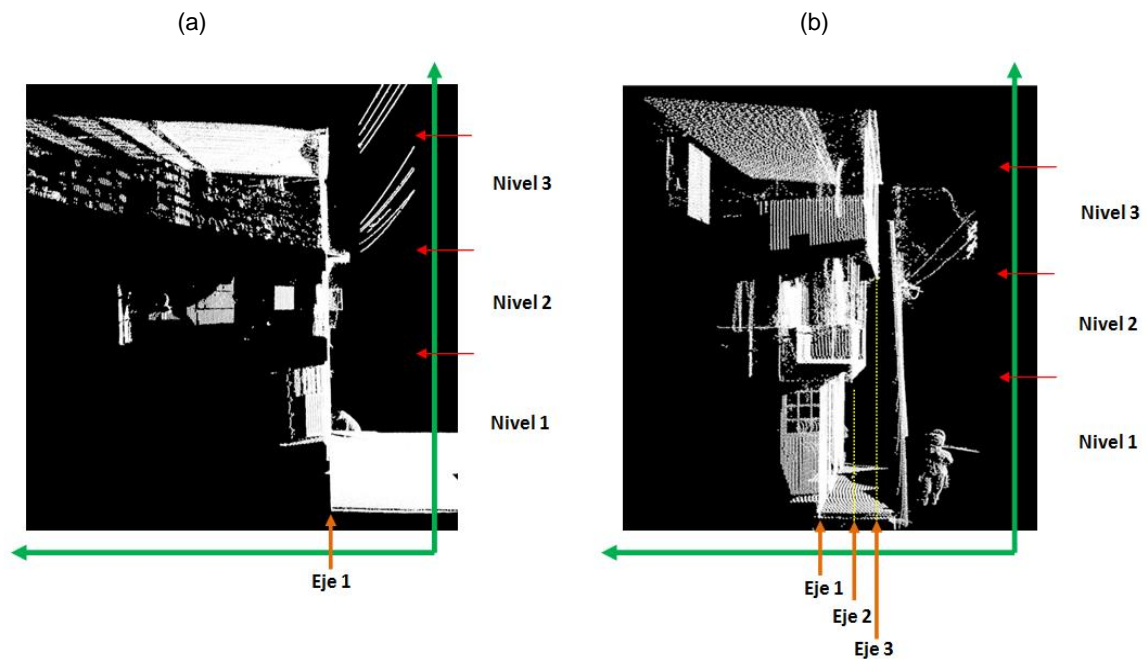
Figura 38 Resultado Selección Pared de la Fachada N° 2



Fuente: Autor

El método de identificación de los puntos de la pared se orientó a casas con fachadas planas, es decir, los puntos de la pared de la fachada desde el nivel N° 1 hasta el nivel más alto se encuentran sobre el mismo eje vertical, como se puede visualizar en la Figura 40 (a).

Figura 40 Vista Lateral por Niveles y Ejes de las Fachadas 1 y 4.



Fuente: Autor

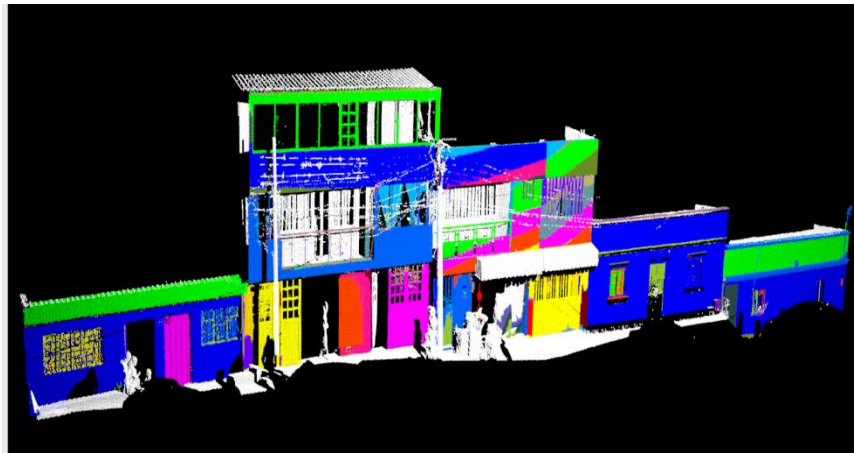
En la Figura 40 (b), se puede visualizar la casa N° 4 donde el nivel N° 1 está ubicado en un eje vertical diferente al N° 2 y N° 3 de la edificación, por consiguiente el método propuesto de clasificación no aplica para este tipo de viviendas.

En búsqueda de un método para identificar los elementos de las fachadas, se enfocó el proyecto al análisis de viviendas con fachadas planas como se visualiza en la figura 35 a; al identificar los elementos de este tipo de vivienda, se está cumpliendo con los objetivos propuestos del presente proyecto y para las fachadas con diferentes ejes verticales (figura 35 b.), la investigación quedaría abierta para futuros proyectos, los cuales por recomendaciones del autor pueden tomar como punto de partida la presente investigación.

Una vez identificados los puntos pertenecientes a la pared, se realiza una validación de la vivienda determinando si es una fachada plana, por medio de la proporción entre los puntos ya etiquetados y los puntos que aún no se han etiquetado, es decir, la cantidad de los datos que hacen falta por clasificar debe ser menor al 50% del total de los puntos de la casa para considerarse una vivienda de fachada plana, este principio se aplica ya que por lo general la pared tiene un área relativamente grande comparado con los demás elementos de la fachada, por consecuencia la cantidad de puntos de la pared es superior que los demás segmentos.

La Figura 41 muestra 5 casas de las cuales 3 (fachadas N° 3, 6 y 7) poseen una fachada plana, debido a que los puntos de la pared en color azul abarcan un área grande y una densidad de puntos superior a los demás segmentos representados en otros colores.

Figura 41 Resultado Selección Pared de la Fachada N° 3, 4, 5, 6 y 7



Fuente: Autor

Una vez realizada la validación de fachadas planas y descartar las demás viviendas, se procede a identificar las ventanas y las puertas en los segmentos sin clasificar, es decir todos los datos que no son de color azul; para ello se hará uso de las características propias de estos elementos, tales como posición, tamaño, dirección y topología.

Primero se realiza un análisis de la posición de los segmentos, descartando todos los que se encuentran por delante de los puntos pared, es decir, hacia afuera de la fachada, ya que los elementos de ventanas y puertas siempre se encuentran hacia

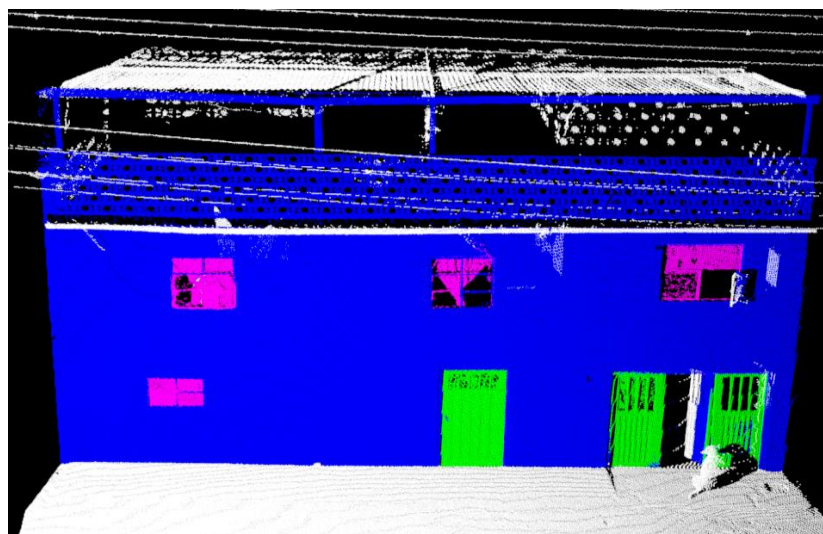
dentro de la vivienda. Todos los segmentos que no cumplen con esta característica son agregados al conjunto de puntos pared.

Luego se hace un análisis de dirección de los segmentos restantes, ajustando un plano con el método RANSAC de los puntos pared y otro plano de los puntos pertenecientes a cada segmento, esto con el fin de hallar el ángulo que se forma entre los dos planos por medio del vector normal de cada conjunto de puntos. Si el ángulo que se forma entre los puntos pared y los puntos del segmento es superior a 10 grados, se considera que el segmento no está en la misma dirección de la pared y es descartado, etiquetando los datos como puntos pared, ya que los elementos de ventanas y puertas están ubicados dentro de la pared, en consecuencia en la misma dirección.

Posteriormente se hace un filtro de área, calculando el promedio de la cantidad de puntos de todos los segmentos y descartando los que estén por debajo de la mitad del promedio. Este filtro es de ayuda para eliminar muchos segmentos de ruido que por su poca cantidad de puntos no se hayan descartado.

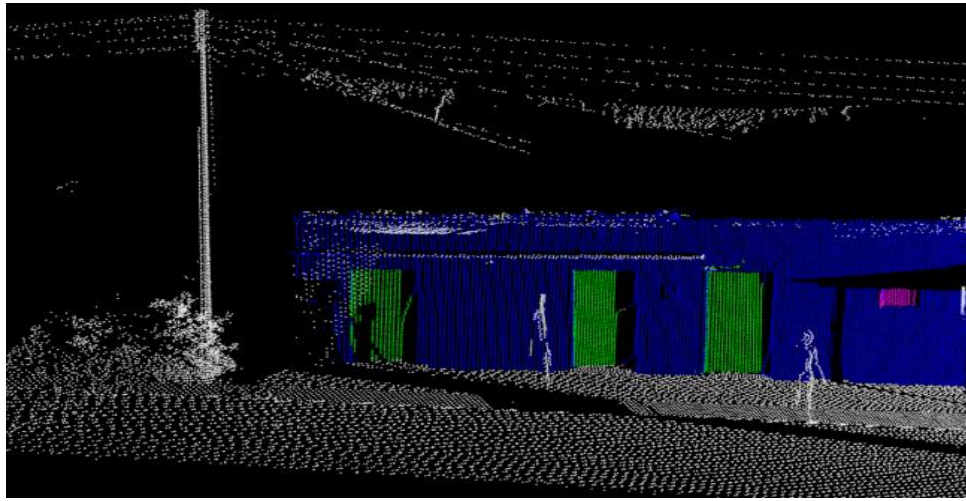
Por último se analiza la característica de topografía de los datos, si el segmento está intersectado con el suelo o se encuentra a una distancia cercana, este segmento es considerado como un elemento puerta, si es el caso opuesto el segmento es etiquetado como elemento ventana, obteniendo como resultado la identificación de los elementos presentes en las fachadas como se muestra en la Figura 42, Figura 43 y Figura 44, donde los segmentos de color verde son las puertas, en color fucsia las ventanas y en azul las paredes. Cabe indicar que en las casas que no son fachadas planas (Fachada N° 5 y 6), estos filtros no se aplican y todos los puntos son etiquetados como pared.

Figura 42 Resultado Clasificación de la Fachada N° 1



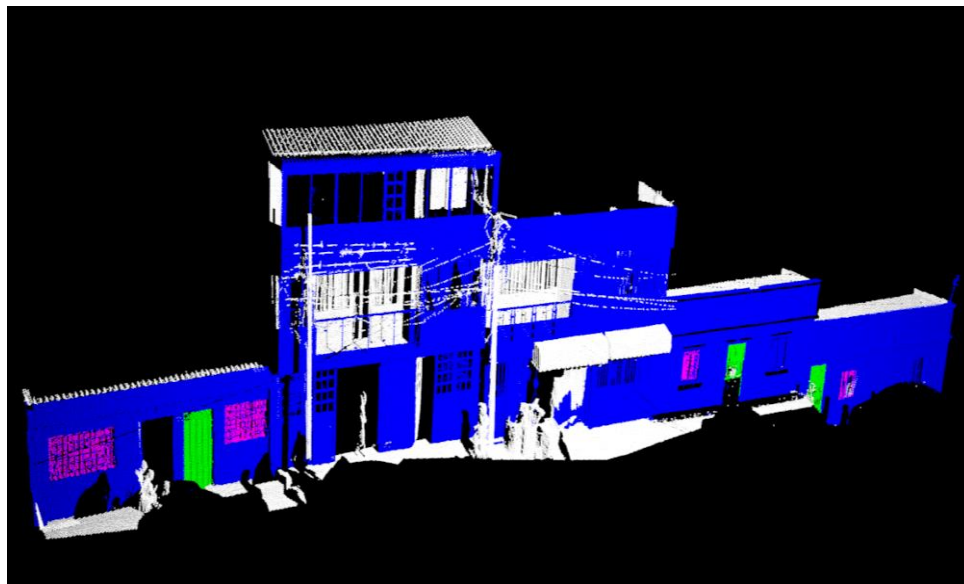
Fuente: Autor

Figura 43 Resultado Clasificación de la Fachada N° 2



Fuente: Autor

Figura 44 Resultado Clasificación de la Fachada N° 3, 4, 5, 6 y 7



Fuente: Autor

4.5 MODELOS TRIDIMENSIONALES CITYGML

Después del proceso de clasificación, ya se tienen identificados los elementos de las fachadas y se procede a construir los modelos 3D de las casas en el formato Citygml, que es un enfoque práctico para el modelado tridimensional, ya que es un modelo de información y codificación basado en XML, es decir, la información del modelo es compactada en etiquetas de programación, con el fin de identificar los objetos y sus características presentes en el modelo 3D.

CityGML proporciona un mecanismo para la descripción de objetos 3D en cuanto a su geometría, topología, semántica, apariencia normal, relaciones entre los objetos y las propiedades espaciales, definiendo 5 niveles de detalle LOD (*en sus siglas en ingles Levels Of Detail*) [21], como se visualiza en la figura 13. Para el presente proyecto se optó por elaborar los modelos de las casas en el nivel de LoD 3, el cual es orientado principalmente para la representación exterior de construcción y lugares de interés.

Para la creación del modelo 3D de la fachada, se extraen las medidas de los elementos identificados en cada vivienda, obteniendo las dimensiones en forma de coordenadas de toda la fachada. Luego estas coordenadas son agregadas al archivo Citygml donde se construye el polígono representativo de cada elemento, en la Figura 45 se visualiza un fragmento del archivo Citygml de la fachada N° 1.

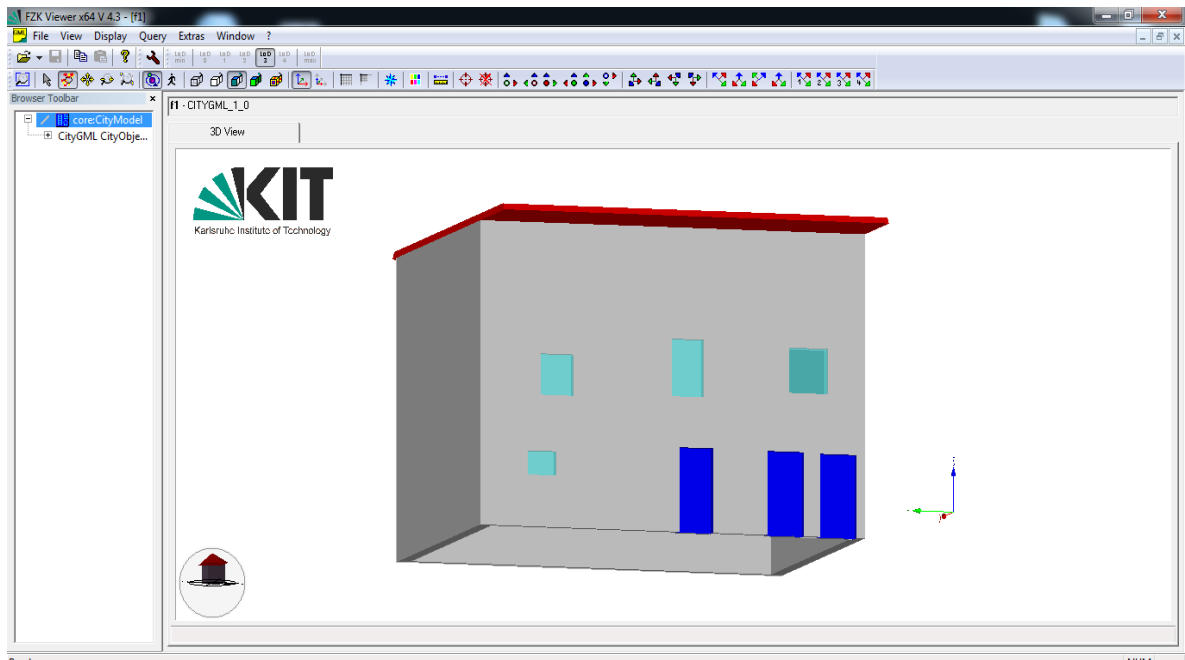
Figura 45 Fragmento del Archivo CityGml de la Fachada N° 1

```
<?xml version='1.0' encoding='UTF-8' standalone='yes'?>
<cityObjectMember>
<grp:CityObjectGroup gml:id='g_1'>
<grp:groupMember><bldg:Building gml:id='FACHADA'>
<bldg:boundedBy>
<bldg:WallSurface gml:id='Pared'>
<bldg:lod3MultiSurface>
<!-- Frente-->
<gml:surfaceMember>
<gml:Polygon gml:id='poligono'>
<gml:exterior>
<gml:LinearRing gml:id='poligono1'>
<gml:posList srsDimension='3'> 10.7 1.5 4.8 10.7 11.7 4.8 10.7 11.7 0.1 10.7 1.5 0.1</gml:posList>
</gml:LinearRing>
</gml:exterior>
<gml:interior>
<gml:LinearRing gml:id='poligono2'>
<gml:posList srsDimension='3'> 10.7 9.4 2.2 10.7 10.2 2.2 10.7 10.2 1.1 10.7 9.4 1.1</gml:posList>
</gml:LinearRing>
</gml:interior>
<gml:interior>
<gml:LinearRing gml:id='poligono3'>
<gml:posList srsDimension='3'> 10.7 3.1 2.2 10.7 3.9 2.2 10.7 3.9 0.1 10.7 3.1 0.1</gml:posList>
</gml:LinearRing>
</gml:interior>
</gml:Polygon>
</gml:surfaceMember>
</gml:MultiSurface>
</bldg:lod3MultiSurface>
</bldg:boundedBy>
</grp:groupMember>
</grp:CityObjectGroup>
</cityObjectMember>
```

Fuente: Autor

Una vez generado los archivos Citygml de la fachada, los cuales son formato .gml, se procede a la visualización de los modelos tridimensionales de las casas, para ello se utilizó un software gratuito desarrollado por el instituto alemán *Karlsruher Institut für Technologie (KIT)* llamado *FZKViewer*. En la Figura 46 se muestra el modelo 3D de la fachada N° 1 cargada desde el FZKViewer.

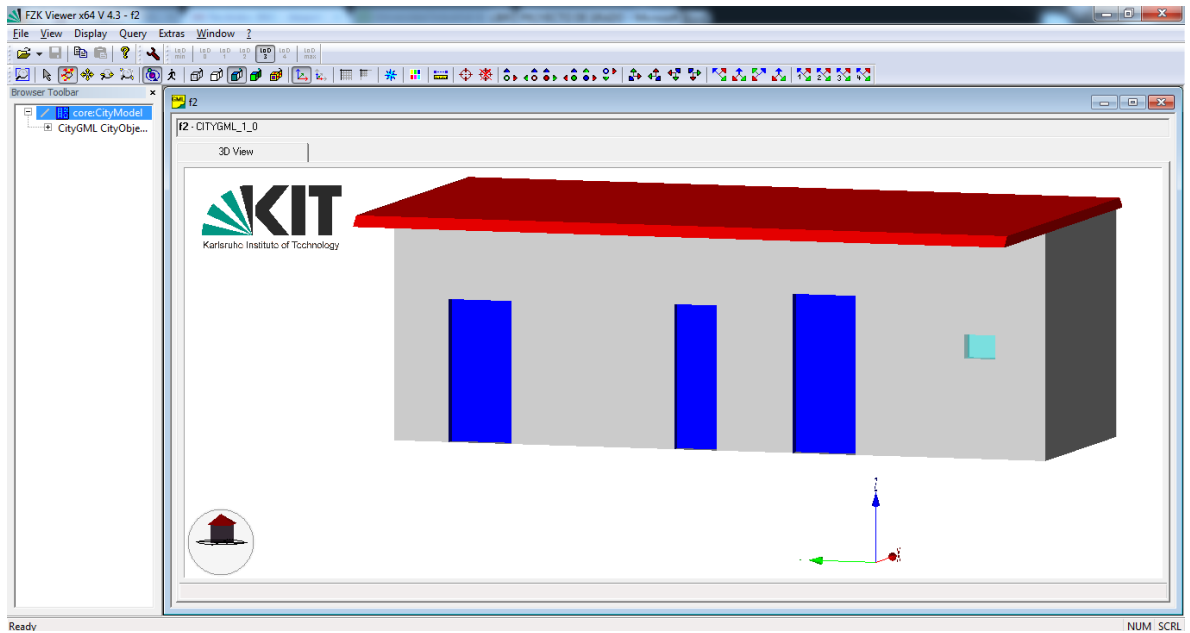
Figura 46 Modelo Tridimensional de la Fachada N° 1 Visualizada con el Software FZKViewer



Fuente: Autor

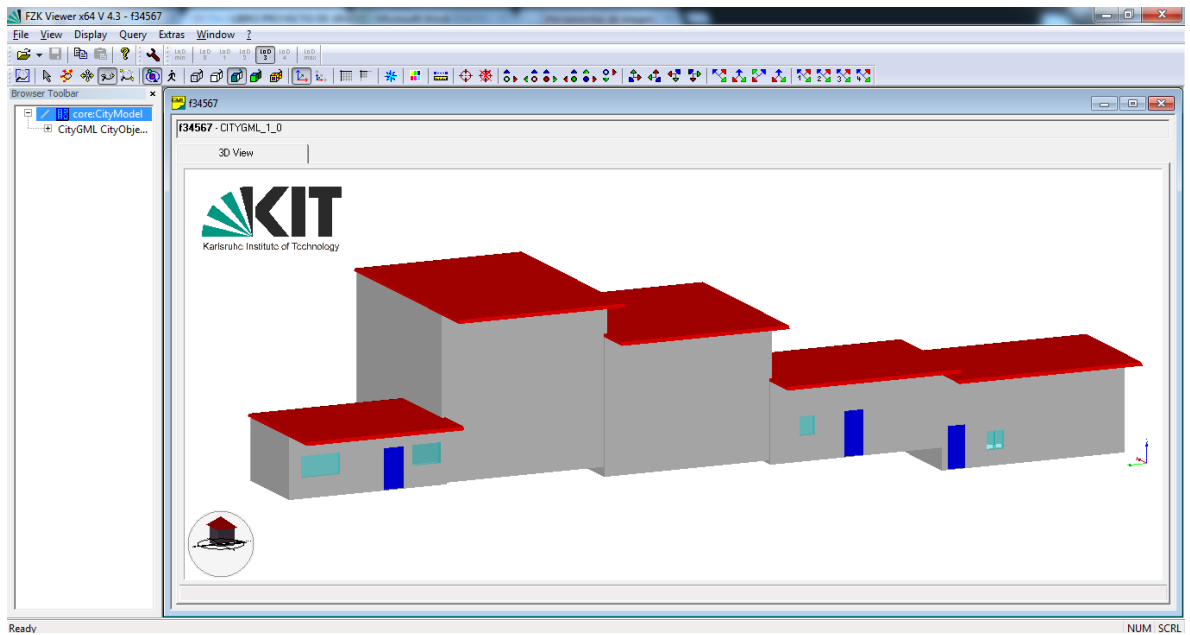
Por último en la Figura 47 y Figura 48 se visualiza los modelos 3D de las casas N° 2, 3, 4, 5, 6 y 7, cabe resaltar que las viviendas 4 y 5 no son fachadas planas como se había explicado anteriormente; aun así es generado su modelo tridimensional con las medidas correspondientes a estas casas.

Figura 47 Modelo Tridimensional de la Fachada N° 2 Visualizada con el Software FZKViewer



Fuente: Autor

Figura 48 Modelo Tridimensional de las Fachadas N° 3, 4, 5, 6 y 7 Visualizada con el Software FZKViewer



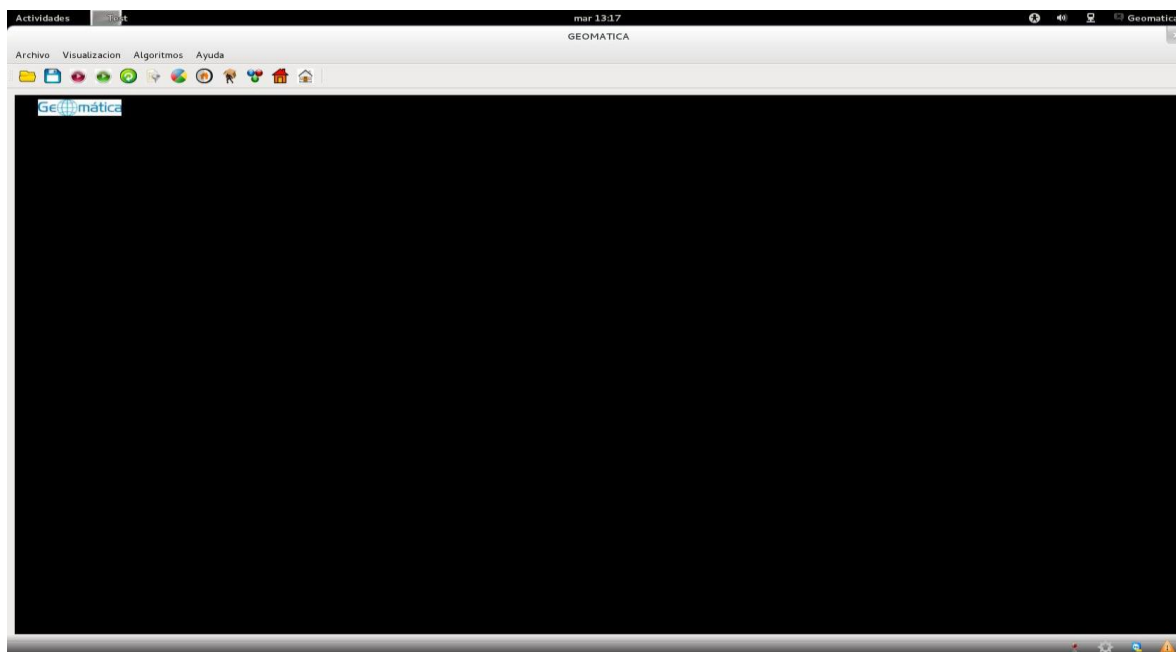
Fuente: Autor

5 INTERFAZ GRÁFICA

5.1 DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ

La interfaz gráfica que soporta el procesamiento de las nubes de puntos, fue desarrollado con la herramienta QT Creator y la biblioteca de software libre VTK (*kit de herramientas de visualización*). El primer paso para ejecutar la herramienta es ubicar el directorio y ejecutar el archivo InterfazGrafica.exe. Presentando la ventana principal como se visualiza en la Figura 49.

Figura 49 Ventana Principal – Interfaz Gráfica



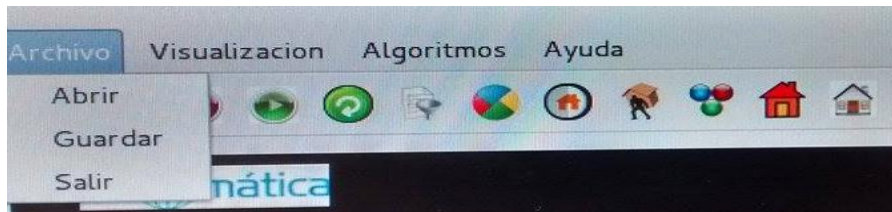
Fuente: Autor

La ventana principal consta de una barra de menú, una barra de botones y un widget o área de visualización del tamaño de casi toda la interfaz y de color negro como se observa en la Figura 49. La barra de menú, está conformada por los menús de Archivo, Visualización, Algoritmos y Ayuda. La barra de botones son accesos directos a las opciones dentro de los menús. Los elementos que integran la interfaz gráfica se explicarán a continuación:

Barra de Menús

El menú de Archivo está conformado con las opciones de Abrir, Guardar y Salir como se observa en la Figura 50.

Figura 50 Menú Archivo – Interfaz Gráfica



Fuente: Autor

- **Abrir:** Permite cargar la ventana de búsqueda y seleccionar el archivo de la nube de puntos a visualizar.
- **Guardar:** Esta opción genera un nuevo archivo, almacenando los datos de la nube de puntos que este cargada en la interfaz gráfica.
- **Salir:** Como su nombre lo dice, cierra la interfaz gráfica.

El menú Visualización está conformado por las opciones de Modo Interacción, Selección, N-Selección y Restaurar Puntos, como se observa en la Figura 51.

Figura 51 Menú Visualización – Interfaz Gráfica

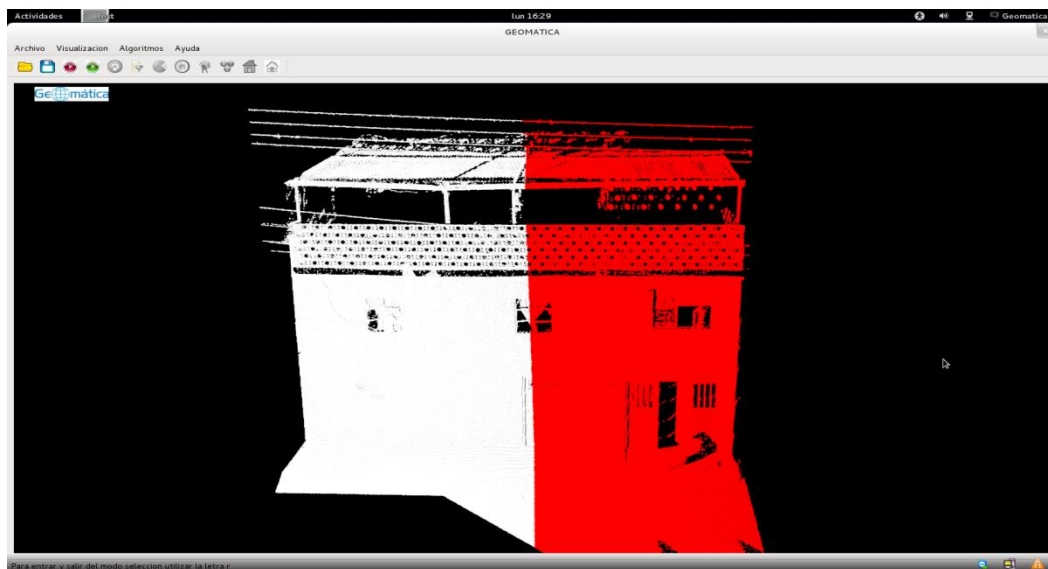


Fuente: Autor

- **Modo Iteración:** Este botón activa las opciones de selección de la nube de puntos, al hacer click izquierdo con el mouse y sin soltar, se dibuja un rectángulo sobre la nube de puntos que colorea en color rojo todos los puntos que se encuentren por dentro como se observa en la Figura 52.

- **Selección:** Esta opción descarta todos los puntos que no hayan sido seleccionado, es decir, eliminará todos los puntos blancos que se observan en la Figura 52, mostrando en pantalla solo los puntos de color rojo.
- **N-Selección:** Esta opción descarta todos los puntos que hayan sido seleccionado, es decir, eliminará todos los puntos rojos de la Figura 52 y mostrará en pantalla los puntos de color blanco.
- **Restaurar Puntos:** Este botón carga de nuevo todos los puntos del archivo seleccionado inicialmente, restituyendo puntos que hayan sido eliminados.

Figura 52 Selección de puntos hecha en la interfaz gráfica



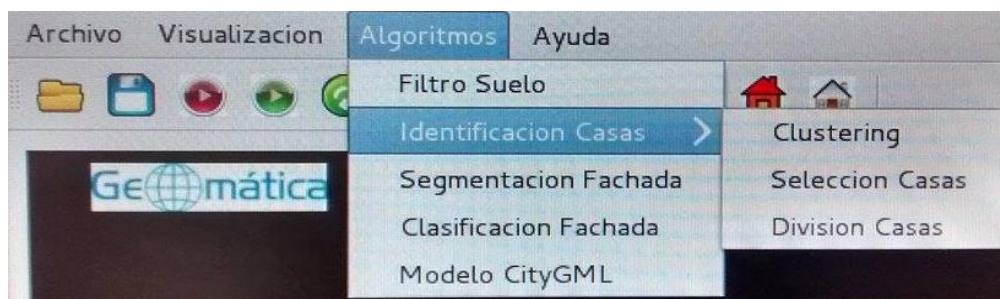
Fuente: Autor

El menú de Algoritmos está conformado por las opciones de Filtro de Suelo, Identificación Casas, Segmentación Fachada, Clasificación Fachada y Modelo CityGML. La opción Identificación Casas tiene un submenú de: Clustering, Selección Casas y División Casas, como se visualiza en la Figura 53.

- **Filtro Suelo:** Esta opción aplica el método de selección de puntos del suelo a la nube de puntos cargada.
- **Identificación Casas:** Este botón tiene un submenú de opciones:
 - **Clustering:** Conformar los clúster de todos los puntos que no sean etiquetados como suelo.

- **Selección Casas:** Como su nombre lo dice, selecciona todos los puntos pertenecientes a las casas.
- **División Casas:** Esta opción hace un análisis de los puntos seleccionados como casas, buscando divisiones entre las fachadas presentes dentro de la nube de puntos.
- **Segmentación Fachada:** Esta opción aplica el método de segmentación a los puntos de las casas.
- **Clasificación Fachada:** Este botón realiza la clasificación de los segmentos generados en el paso anterior, identificando los elementos de las fachadas.

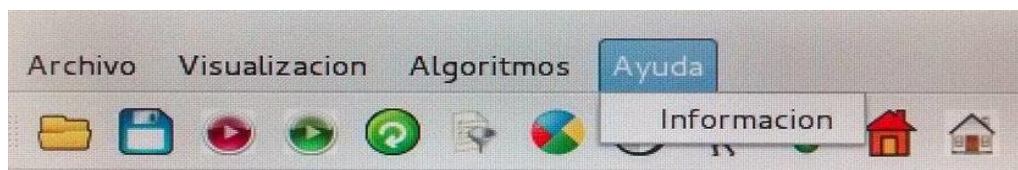
Figura 53 Menú Algoritmos – Interfaz Gráfica



Fuente: Autor

El menú Ayuda tiene la opción de Información, como se muestra en la Figura 54. El botón de información genera una ventana auxiliar con datos sobre la interfaz y su desarrollador.

Figura 54 Menú Ayuda – Interfaz Gráfica



Fuente: Autor

Barra de Botones

La barra de botones son accesos directos a las opciones dentro de los menús, como se puede observar en la Figura 55. La ubicación de los accesos está distribuida de la siguiente manera:

Figura 55 Barra de Botones – Interfaz Gráfica



Fuente: Autor

De izquierda a derecha:

1. Botón Abrir
2. Botón Guardar
3. Botón Seleccionar
4. Botón N-Seleccionar
5. Botón Restaurar Puntos
6. Botón Filtro Suelo
7. Botón Clustering
8. Botón Selección Casas
9. Botón División Casas
10. Botón Segmentación
11. Botón Clasificación
12. Botón Modelo CityGML

Widget o Área de Visualización

El widget o área de visualización, como su nombre lo dice, es un espacio donde se muestra la nube de puntos seleccionada por la herramienta; tiene el tamaño de casi toda la interfaz y es de color negro como se visualiza en la Figura 52, donde se muestra los puntos seleccionados de la fachada N° 1. Este widget llamado QVTKWidget, es una integración entre QT Creator y la biblioteca VTK, el cual brinda las librerías gráficas y de procesamiento que ofrece VTK para las nubes de puntos.

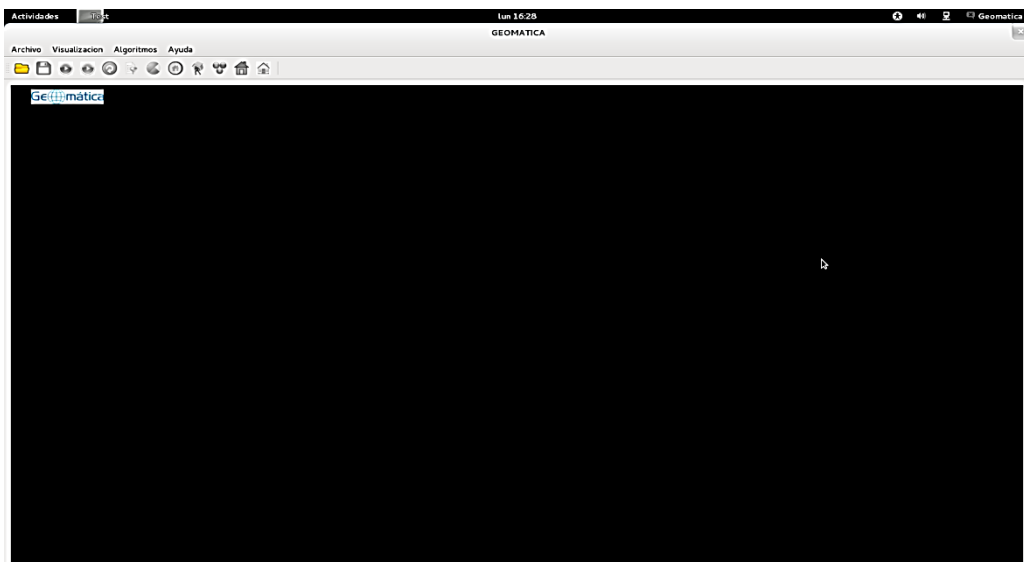
5.2 FUNCIONAMIENTO DE LA INTERFAZ GRÁFICA

Con el propósito de presentar mayor claridad en el uso de la interfaz gráfica, se mostrará cada uno de los pasos para la identificación y modelo tridimensional de las casas:

- **Ejecución:**

Una vez ubicado en el directorio que contiene la interfaz gráfica, se ejecuta la aplicación InterfazGrafica.exe. Presentando una ventana como se visualiza en la Figura 56. Solo está activado el botón abrir, los restantes botones se activaran a medida que avance el proceso de identificación y modelado.

Figura 56 Ventana Principal

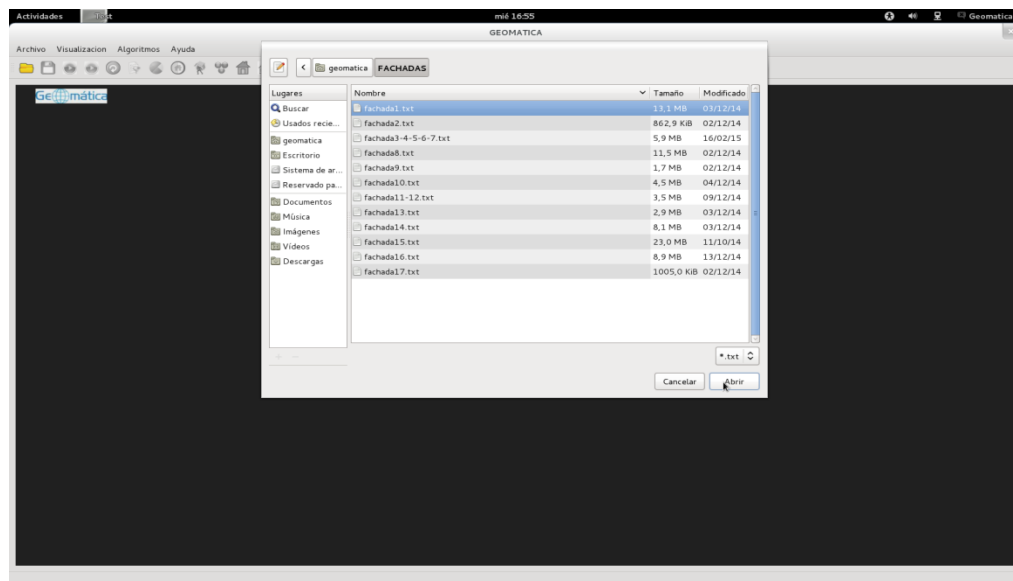


Fuente: Autor

- **Cargar Nube de Puntos:**

Para seleccionar y cargar una nube de puntos en la interfaz gráfica, se puede hacer clic al botón de Abrir en la barra de botones, o en la barra de menú Archivo esta la opción Abrir, mostrando una ventada de búsqueda de archivo como se visualiza en la Figura 57.

Figura 57 Ventana de búsqueda del Botón Abrir – Interfaz Gráfica



Fuente: Autor

De pues de seleccionar el archivo.txt con los datos de la nube de puntos, la interfaz gráfica mostrará dentro del widget la información como se ve en la Figura 58, además habilitando la opción Filtro Suelo.

Figura 58 Nube de puntos cargada con la Interfaz Gráfica

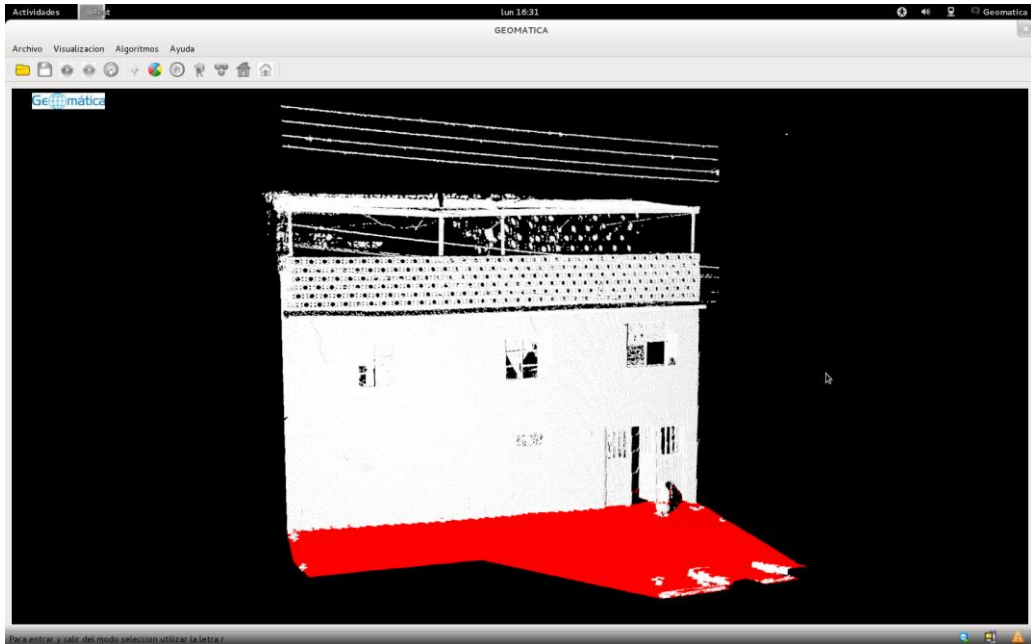


Fuente: Autor

- **Selección Puntos del Suelo:**

Una vez seleccionada y cargada la nube de puntos, se realiza el filtro de los puntos del suelo en la escena, haciendo clip al Botón Filtro Suelo o en el menú de Algoritmos Filtro Suelo. El resultado de este paso es mostrado en la Figura 59. Por último se activa el Botón Clustering.

Figura 59 Resultado Selección Puntos del Suelo – Interfaz Gráfica

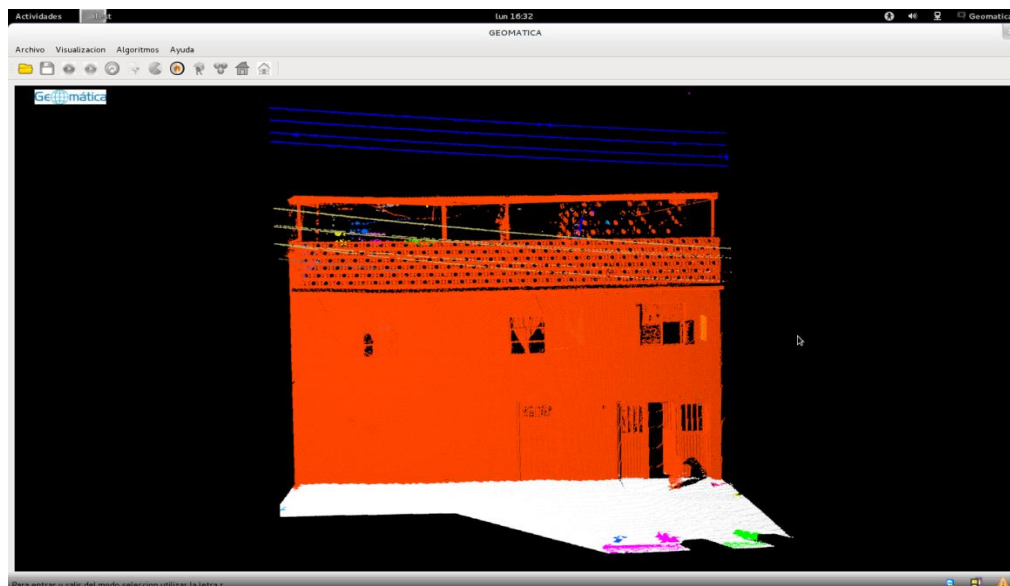


Fuente: Autor

- **Conformación Grupos de Puntos:**

Después de seleccionar los puntos del suelo, se realiza la conformación de los grupos de los puntos por encima del suelo haciendo clip en el Botón Clustering o en el submenú Identificación de Casas ubicado en el menú Algoritmos, además se activa el Botón Selección Fachada. El resultado de este Botón se visualiza en la Figura 60.

Figura 60 Resultado Conformación Grupos de Puntos – Interfaz Gráfica

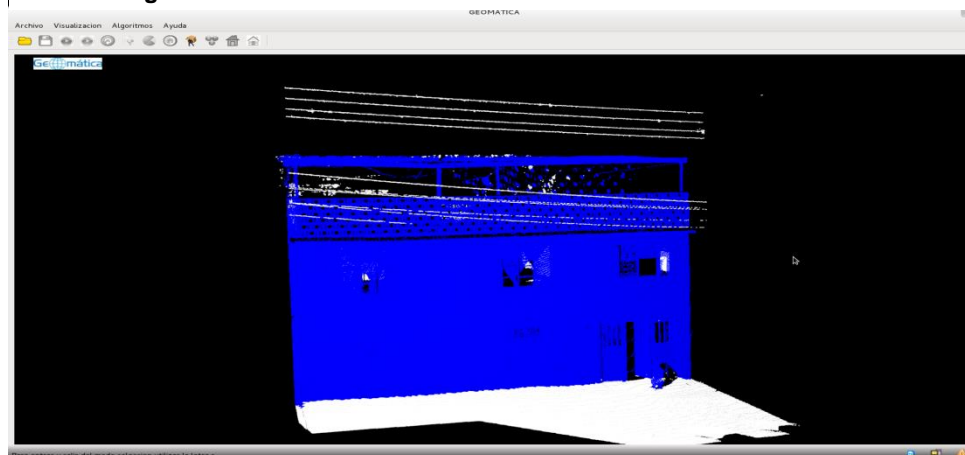


Fuente: Autor

- **Selección de Puntos Fachada:**

Luego de definir los clúster de los puntos por encima del suelo, se definen los puntos pertenecientes a las casas, haciendo clip en el Botón Selección Casas. El resultado se visualiza en la Figura 61, además se habilitará el botón División Casas.

Figura 61 Resultado Selección Puntos Fachada – Interfaz Gráfica

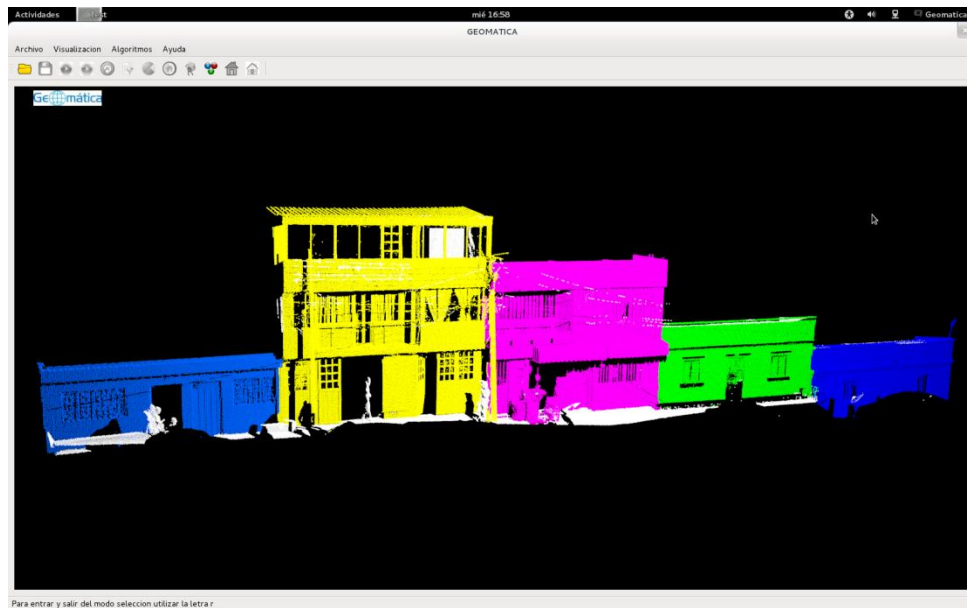


Fuente: Autor

- **División de Casas:**

Después de seleccionar los puntos pertenecientes a las fachadas, se aplica el paso de División de Casas haciendo clic en el Botón División Casas o en el submenú Identificación de Casas ubicado en el menú Algoritmos, además se activa el Botón Segmentación. El resultado de este Botón se visualiza en la Figura 62. Cabe resaltar que el método propuesto para la división de las casas, solo se aplica para sucesiones de casas en la misma escena, por ello se muestra el resultado de la división de las casas de las fachadas N° 3, 4, 5, 6 y 7.

Figura 62 Resultado División de Casas – Interfaz Gráfica

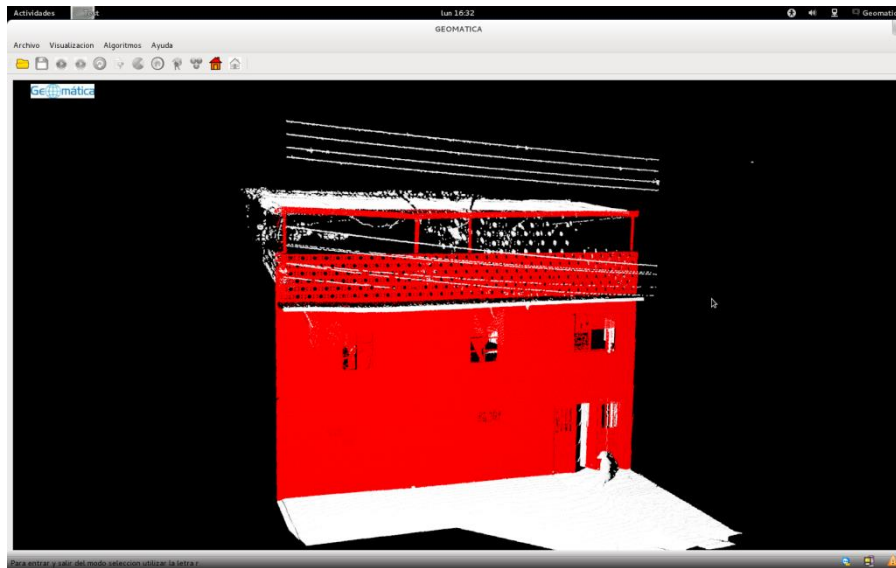


Fuente: Autor

- **Segmentación de los Puntos Fachada:**

Después de realizar la división de casas, se aplica el método de segmentación a los puntos de las fachadas haciendo clic en el Botón Segmentación o en la opción del menú Algoritmos, además se habilitará el Botón Clasificación. El resultado de la segmentación de los puntos fachada se visualiza en la Figura 63.

Figura 63 Resultado Segmentación de los puntos fachada – Interfaz Gráfica

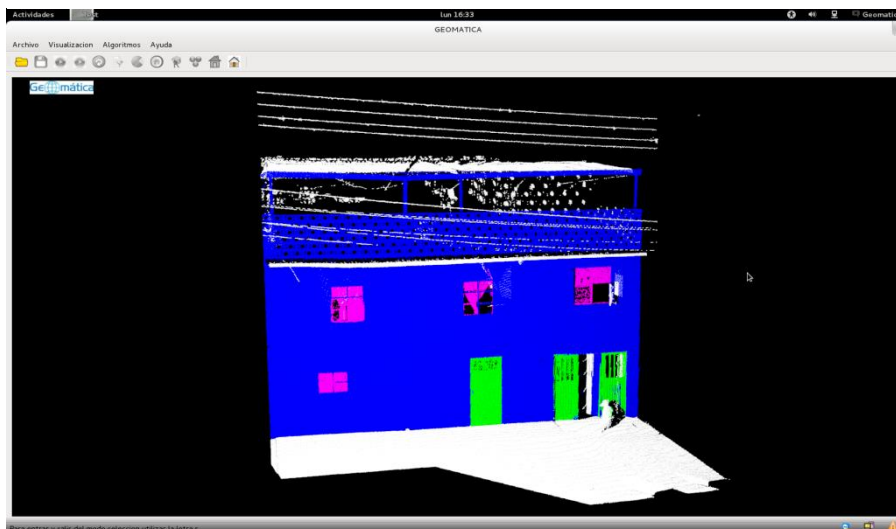


Fuente: Autor

- **Clasificación de los Segmentos Fachada:**

Luego de segmentar los puntos de las fachadas, se procede a clasificarlos, haciendo clic en el Botón Clasificación o en la opción del menú Algoritmos, habilitando el botón Modelo CityGML. El resultado de la clasificación se visualiza en la Figura 64.

Figura 64 Resultado Clasificación de los segmentos fachada – Interfaz Gráfica

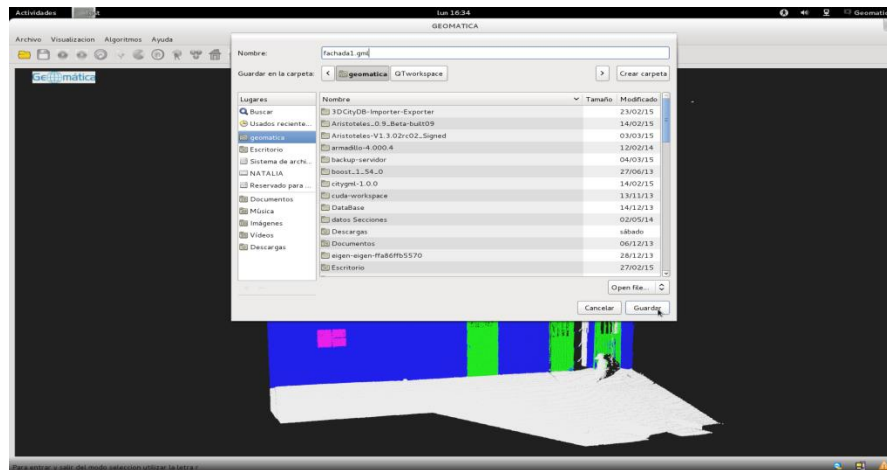


Fuente: Autor

- **Modelados Tridimensionales CITYGML**

Una vez completados los pasos hasta la clasificación de los segmentos, se procede a crear los modelos tridimensionales CityGML en formato .gml, haciendo clic en el Botón Modelo CityGML se abre una ventana emergente que permite al usuario seleccionar la ubicación y el nombre del archivo a guardar, como se observa en la Figura 65.

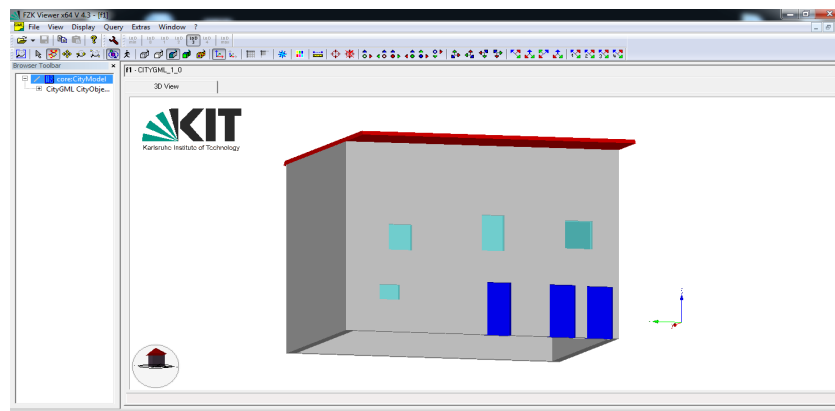
Figura 65 Resultado Modelado Tridimensional – Interfaz Gráfica



Fuente: Autor

El archivo CityGML creado, puede ser visualizado por medio del software gratuito *FZKViewer* ya mencionado anteriormente. El resultado del modelo 3D se visualiza en la Figura 66.

Figura 66 Modelo Tridimensional cargado con el Software FZKViewer



Fuente: Autor

6 RESULTADOS

Con el fin de evaluar el desempeño del algoritmo desarrollado en el presente proyecto, se realizó pruebas para medir la sensibilidad y especificidad. Para la pruebas se tomaron los 17 escaneos de casas mencionados en la adquisición de datos, con un total de 50 ventanas y 30 puertas, con los que se procedió a evaluar el algoritmo.

En la Tabla 2 se observa la descripción de los parámetros usados para calcular los índices de sensibilidad y especificidad. En la Ecuación 3 están los valores obtenidos en cada una de las casas.

Tabla 2 Descripción de Indicadores

INDICADOR	DESCRIPCION
VP1(Verdaderos Positivos de las ventanas)	Ventanas detectadas correctamente
VN1 (Verdaderos Negativos de las ventanas)	Ventanas que no son y no se detectaron
FP1 (Falsos Positivos de las ventanas)	Ventanas que no son y se detectaron
FN1 (Falsos Negativos de las ventanas)	Ventanas no detectadas
VP2(Verdaderos Positivos de las puertas)	Puertas detectadas correctamente
VN2 (Verdaderos Negativos de las puertas)	Puertas que no son y no se detectaron
FP2 (Falsos Positivos de las puertas)	Puertas que no son y se detectaron
FN2 (Falsos Negativos de las puertas)	Puertas no detectadas

Fuente: Autor

La sensibilidad indica la capacidad del algoritmo para detectar los elementos de ventanas y puertas dentro de las fachadas de las casas, que realmente lo son, su fórmula se muestra en la Ecuación 1.

Ecuación 1. Ecuación de la Sensibilidad

$$Sensibilidad = \frac{VP}{VP+FN}$$

Fuente: Autor

Tabla 3 Pruebas del Algoritmo

CASAS	Cantidad Puntos	Tiempo Total (Seg.)	VP1	VN1	FP1	FN1	VP2	VN2	FP2	FN2
CASA 1	556920	50,34	4				3			
CASA 2	37345	6,321	1				3			
CASA 3	23747	5,54	2				1			
CASA 4	106003	8,89		1				1		
CASA 5	96543	8,06		1				1		
CASA 6	28766	6,21	1			1	1			
CASA 7	12280	4,97	1			1	1			
CASA 8	531898	55,23	2				1			
CASA 9	77433	10,87	1				2			1
CASA 10	209708	32,35	4			1		1		
CASA 11	122693	16,51		1			1			1
CASA 12	55491	7,29	2							1
CASA 13	122221	8,14	1				1			1
CASA 14	345800	32,21	5				2		1	
CASA 15	693614	55,58	4		1		2			
CASA 16	408558	54,45	1				2			
CASA 17	43507	6,61	1				2			

La especificidad indica la capacidad del algoritmo de no detectar los elementos de ventanas y puertas dentro de las fachadas de las casas, que realmente no lo son, su fórmula se muestra en la Ecuación 2.

Ecuación 2. Ecuación de la Especificidad

$$\textit{Especificidad} = \frac{VN}{VN + FP}$$

Fuente: Autor

El valor predictivo positivo (VPP) es la probabilidad cuando la detección de los elementos de ventanas y puertas es positiva, que corresponda a un verdadero positivo, su fórmula se muestra en la Ecuación 3.

Ecuación 3 Ecuación del Valor Predictivo Positivo

$$\textit{Valor Predictivo Positivo} = \frac{VP}{VP + FP}$$

Fuente: Autor

Finalmente, con las ecuaciones presentadas, se exponen los resultados de sensibilidad y especificidad el algoritmo propuesto.

$$\textit{Sensibilidad} = \frac{30+22}{30+22+3+4} = 87,76 \%$$

$$\textit{Especificidad} = \frac{1+1}{1+1+3+3} = 75 \%$$

$$\textit{Valor Predictivo Positivo} = \frac{30+22}{30+ 22 + 1+ 1} = 96,77 \%$$

7 CONCLUSIONES

Se desarrolló un algoritmo que permite la identificación y modelado tridimensional de las fachadas y sus elementos, a partir de nube de puntos generada a través de un escáner láser terrestre, para el apoyo del levantamiento arquitectónico de las edificaciones.

La división de la nube de puntos en voxel o cubos tridimensionales imaginarios del mismo tamaño, contribuyó a reducir la cantidad de puntos a procesar por la cantidad de voxels presentes, lo que con lleva a un algoritmo más rápido capaz de procesar grandes cantidades de puntos.

La utilización de RANSAC con parámetros iniciales variados, calculados por la desviación estándar de la distribución de los puntos fachada en cada casa, fue la mejora necesaria para aprovechar la ventaja que tiene este método y su eficiencia para cualquier caso de fachada plana.

El sistema de escáner laser es una tecnología innovadora en la generación de modelos tridimensionales de edificaciones, ya que permite la documentación detallada con alta precisión y en corto tiempo de la superficie del inmueble.

La interfaz gráfica desarrollada en QT Creator y las librerías del Kit de Herramientas de Visualización (VTK) ayuda a la visualización de los resultados del algoritmo y su aplicabilidad, permitiendo la interacción con el usuario y una fácil manipulación por parte del mismo.

8 RECOMENDACIONES

Utilizar arquitectura en paralelo para la construcción de algoritmos de segmentación y clasificación de puntos fachada, basados en crecimiento de regiones y ajustes de un plano.

Es importante que los escaneos a casas sean realizados con un análisis previo de la edificación, ya que una buena densidad de puntos y un escaneo completo que no posea sombras o áreas incompletas de la vivienda, permite que se realicen buenos ajustes de planos, brindando mejores resultados en los pasos de segmentación y clasificación de puntos fachada.

La búsqueda de un método para procesar las fachadas con más de un eje vertical. Esta recomendación radica para los tipos de fachadas que el algoritmo desarrollado no fue diseñado, pero que puede servir como parte de la solución a estos tipos de fachada.

Se recomienda definir características para la identificación de elementos de fachadas que el presente proyecto no clasifica, tales como balcones, barandillas, toldos, alfajías, entre otros, que por su complejidad o por la falta de estándares respecto al diseño de fachadas, sea una tarea compleja.

De acuerdo al nivel de detalle que se desee obtener en las fachadas, se debe configurar la resolución del escaneo, mientras más tiempo dure este, se obtendrá mayor cantidad de puntos y por ende el nivel de detalle mejorará.

En futuros trabajos se recomienda el desarrollo de algoritmos para el procesamiento de escaneos realizados en interiores de las casas, esto con el fin de complementar la presente investigación y generar un aporte para el modelado tridimensional de todas las áreas de las edificaciones.

9 BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. C., B. M., and V. J., *Metodología para el Levantamiento Arquitectónico de Edificaciones Patrimoniales*. CUENCA, 2010.
- [2] A. Almagro Gorbea, "Levantamiento arquitectónico," *Monográfica (Universidad Granada)*. *Bibl. Archit. y restauración*, p. 300, 2004.
- [3] N. R. Roca and J. Pérez Navarro, *Manual prevención de fallos, estanqueidad en fachadas*. Murcia, 2012, p. 97.
- [4] B. Van Genechten, *Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning Training Material Based on Practical Applications*. Universidad Politecnica de Valencia Editorial, 2008, p. 241.
- [5] WAYNE TOMASI, *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*, CUARTA. MEXICO, 2003, pp. 1–10.
- [6] C. Torre Ferrero, "Contribuciones al alineamiento de nubes de puntos 3D para su uso en aplicaciones de captura robotizada de objetos," Universidad de Cantabria, 2010.
- [7] A. J. Villanueva, "Point Cloud Manager Sistema multirresolución para el tratamiento de grandes datasets de nubes de puntos 3D," Universidad de Santiago de Compostela, 2012.
- [8] A. M. Fernández, "Desarrollo de prótesis ortopédicas personalizadas mediante tecnologías láser escáner 3D," UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID, 2015.
- [9] H. Porras Díaz, J. J. Cáceres Jiménez, and E. O. Gallo Lancheros, "MODELOS URBANOS TRIDIMENSIONALES GENERADOS A PARTIR DE NUBES DE PUNTOS DE UN ESCANER LASER TERRESTRE," *Tecnura la Fac. tecnológica la Univ. Dist. Fr. José Caldas*, vol. 39, 2013.
- [10] H. M. López D. and A. R. Gómez F., "Superficies a partir de nubes de puntos," *Univ. Simón Bolívar, C15321 Comput. Gráfica II*, p. 8, 2011.
- [11] Julia Désirée Velasteguí Cáceres and F. G. N. Manuel, "Uso y procesamiento del sistema escáner láser para el modelamiento 3D de datos geoespaciales en la áreas de la construcción, patrimonio cultural y espeleología," Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, 2013.

- [12] C. M. Shakarji, "Least-squares fitting algorithms of the NIST algorithm testing system," *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, vol. 103, no. 6, p. 633, 1998.
- [13] G. Vosselman and S. Pu, "AUTOMATIC EXTRACTION OF BUILDING FEATURES FROM TERRESTRIAL LASER SCANNING," *Proc. ISPRS Comm. V Symp. Image Eng. Vis. Metrol.*, vol. XXXVI, p. 5, 2006.
- [14] G. Vosselman, B. G. H. Gorte, G. Sithole, and T. Rabbani, "RECOGNISING STRUCTURE IN LASER SCANNER POINT CLOUDS," *Laser-Scanners For. Landsc. Assess.*, vol. XXXVI, pp. 33–38, 2004.
- [15] P. P. Sapkota, "Segmentation of Coloured Point Cloud Data," *International Institute for Geo-information Science and Earth Observation*. p. 79, 2008.
- [16] R. A. JOHNSON and D. W. WICHERN, *Applied Multivariate Statistical Analysis*, SEXTA., vol. 20. New Jersey, 1991, pp. 323–324.
- [17] S. Gordon, D. Lichti, and M. Stewart, "APPLICATION OF A HIGH-RESOLUTION , GROUND-BASED LASER SCANNER FOR DEFORMATION MEASUREMENTS," *10th FIG Int. Symp. Deform. Meas.*, pp. 23–32, 2001.
- [18] J. Hern and B. Marcotegui, "Point Cloud Segmentation towards Urban Ground Modeling," *Urban Remote Sens. Event, 2009 Jt.*, pp. 1–5, 2009.
- [19] C. Raymaekers, "Algorithms for haptic rendering of CSG trees," *Proc. Eurohaptics 2002*, pp. 86–91, 2002.
- [20] C. Bajaj, A. Paoluzzi, and G. Scorzelli, "NIH Public Access," *Changes*, vol. 29, no. 5, pp. 997–1003, 2012.
- [21] E. Standard, T. H. Kolbe, A. Czerwinski, and C. Nagel, "OpenGIS® City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard," *OPEN GEOSPATIAL Consort.*, 2008.
- [22] V. D. F. García, "Programación de gaits y adquisición de datos para robots serpiente," Pontificia Universidad Javeriana, 2012.
- [23] E. F. Giraldo, J. Mario, R. Herrera, J. Carlos, and M. B. Botero, *MONITOREO A TRAVÉS DE SISTEMAS EMBEBIDOS A*. 2011, pp. 1–58.
- [24] A. María, G. Urueta, D. Carolina, and R. Osorio, "Herramientas Investigadas para obtener MediCom Índice general," 2010.

- [25] B. Douillard, J. Underwood, N. Kuntz, V. Vlaskine, A. Quadros, P. Morton, and A. Frenkel, "On the segmentation of 3D LIDAR point clouds," *Robot. Autom. (ICRA), 2011 IEEE Int. Conf.*, pp. 2798–2805, May 2011.
- [26] K. Hammoudi, F. Dornaika, and N. Papanicolaou, "Extracting building footprints from 3D point clouds using terrestrial laser scanning at street level," *Isprs/Cmrt09*, vol. XXXVIII, no. Dmi, pp. 3–4, 2009.
- [27] Riegler, "Training Material for RIEGL VZ-400 2. Operating & Handling Hardware."