

**MÉTODO PARA GENERAR MODELOS DIGITALES DE TERRENO CON BASE EN  
DATOS DE ESCÁNER LÁSER TERRESTRE**

**JULIO HERNÁN BONILLA ROMERO**

**DIRECTOR:  
MSc. Luis Joel Martínez**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS  
ESCUELA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN GEOMÁTICA  
BOGOTÁ  
2016**

**MÉTODO PARA GENERAR MODELOS DIGITALES DE TERRENO A PARTIR DE  
ESCÁNER LÁSER TERRESTRE**

**JULIO HERNÁN BONILLA ROMERO**

**TESIS DE INVESTIGACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
MAGISTER EN GEOMÁTICA**

**DIRECTOR:  
MSc. Luis Joel Martínez  
PROFESOR ASOCIADO**

**Línea de Investigación  
Geoinformación para el uso sostenible de los recursos naturales**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS  
ESCUELA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN GEOMÁTICA  
BOGOTÁ  
2016**

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi esposa e hija por su apoyo constante e incondicional. A mi madre por su ejemplo de vida y a mi padre que está en el mundo espiritual, por su ejemplo de estudio constante. A la Universidad Distrital que facilitó los equipos de medición y predios para el estudio. Al director por sus recomendaciones.

## **MÉTODO PARA GENERAR MODELOS DIGITALES DE TERRENO A PARTIR DE ESCÁNER LÁSER TERRESTRE**

### **Resumen**

El modelo digital de terreno como representación en formato digital de la superficie justo en el nivel del suelo, es generado con base en datos de escáner laser terrestre de un terreno montañoso determinando primero cuál es su mejor resolución según la distancia de los targets colocados sobre una superficie, para poder realizar los cambios de posición del equipo. Para este caso se tomaron tres resoluciones: alta de 1/1, media de 1/8 y baja, de 1/20 comparando los mismos puntos escaneados desde una sola posición, mediante una evaluación estadística de las distancias tomadas sobre el terreno con topografía de exactitud y las mismas tomadas sobre los datos escaneados. Con base en la resolución determinada de 1/8 se configura el equipo, y se diseña una metodología en campo para la obtención de los datos con cambios de posición del equipo con distancias no mayores a 20 m. Se materializaron sobre el terreno 20 puntos fijos sobre la capa vegetal para realizar un control y poder medir la posición relativa y absoluta según las normas y especificaciones NTC 5205, NTC 5043, resolución número 64 IGAC y la ASPRS. El método propone partir del amarre de la georreferenciación de dos puntos con coordenadas conocidas sobre el terreno y realizar el modelo digital del terreno. Este proceso es documentado y por último se valida el modelo aplicándolo al diseño horizontal, vertical y de secciones transversales de una tramo de vía secundaria.

**Palabras Clave:** Exactitud, Precisión, Escáner, Topografía, Coordenadas

## **METHOD FOR GENERATING DIGITAL TERRAIN MODELS FROM TERRESTRIAL LASER SCANNERS**

### **Abstract**

The digital terrain model is like a representation in a digital format of the surface just in the level of the soil, is generated based on the data of a terrestrial laser scanner of a mountainous area, determining first, what is its better resolution according to the distance of the targets placed on a surface to be able to make the changes of the position of the equipment. For this case, three resolutions were taken: high of 1/1, medium of 1/8 and low of 1/20, comparing the same scanned points from one position, by a statistical evaluation

of the distances taken on the area with a topography of accuracy and the same taken on the scanned information.

Based on the certain resolution of 1/8, the equipment is set up and a methodology is designed in field for obtaining data with changes of the position of the equipment with distances not bigger than 20 m. Cement cylinders were materialized on the area as fixed points on the vegetable cap to carry out a check and be able to measure the relative and absolute position according to the procedures and specifications of the NTC 5205, NTC 5043, resolution number 64 IGAC and the recommendations of the ASPRS. The method proposes to depart from the moorings of the geo-reference of two points with known coordinates on the area the digital terrain models. This process is documented and finally the model is validated when it is applied to the horizontal and vertical design, and transverse sections of a stretch of a secondary route.

**Keywords:** Accuracy, Precision, Scanner, Topography, Coordinates

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>11</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>14</b>
<b>1. REVISIÓN DE LITERATURA</b>	<b>15</b>
1.1 Modelos Digitales de Terreno	15
1.1.1. Representación de la superficie del terreno	16
1.1.2. Muestreo en el terreno	17
1.1.3. Toma de datos y métodos para generarlos	18
1.2 Escáner Laser Terrestre (ELT)	19
1.2.1 Principios y funcionamiento de los levantamientos con laser	19
1.2.2 Métodos de Levantamiento y equipo	22
1.2.3 Utilidades	25
1.2.4 Resolución	27
1.3 Especificaciones Técnicas Mínimas para Trabajos Cartográficos	32
1.3.1 Resolución número 64 de 1994 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi	34
1.3.2 La American Society for Photogrammetry and Remote Sensing ASPRS.	35
1.3.3 La Norma NTC 5205 y NTC 5043	36
<b>2 MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>39</b>
2.1 Área de estudio y características	39
2.2 Equipos y software	40
2.3 Metodología	43
2.3.1. Evaluación de la resolución del escaneo - Planificación	43
2.3.2 Trabajo de Campo	46
2.3.3 Análisis estadísticos	52
2.4 Generación del modelo digital de terreno	55
2.4.1 Determinación del alcance del proyecto	56
2.4.2 Selección de la zona de trabajo	57
2.4.3 Determinación del sistema de referencia o georreferenciación del proyecto en terreno.	57
2.4.4 Posición de escaneos, targets y esferas en terreno.	59
2.4.5 Configuración del escáner y captura de información	62
2.4.6 Procesamiento de los datos	62

2.4.7 Limpieza del ruido con software Cloud compare.	63
2.4.8 Modelo digital de terreno	64
2.5 Determinar la exactitud en posición absoluta y relativa de un modelo digital de terreno según la resolución obtenida.	68
2.5.1 Metodología para las pruebas de exactitud	68
<b>3 RESULTADOS Y ANÁLISIS</b>	<b>74</b>
3.1 Evaluación de las diferentes resoluciones espaciales del escáner laser	74
3.2 Determinar la exactitud en posición relativa y absoluta de un modelo digital de terreno según la resolución obtenida.	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
3.2.1 Prueba de exactitud	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
3.2.2 Exactitud absoluta o externa.	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
3.2.3 Exactitud relativa o interna.	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
3.3 Documentación del Método propuesto para generación de modelo digital de terreno	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
3.3.1 Proceso de Software	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
3.3.2 Importar escaneos e Identificar las esferas y targets en SCENE.	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
3.3.3 Pegue y georreferenciación de escaneos.	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
3.3.4 Georreferenciación de los escaneos	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
3.3.5 Exportar puntos de escaneo	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
3.4 Aplicación del modelo digital de terreno al diseño de un tramo de vía	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Prisma que descompone la luz blanca en los diferentes colores.....	19
Figura 2. Rango de las longitudes de onda.....	19
Figura 3. Esquema gráfico de la medición del tiempo.....	20
Figura 4. Esquema gráfico de la diferencia de fase.....	21
Figura 5. Imágenes y nube de puntos tomadas con Escáner Optech.....	22
Figura 6. Rotación vertical y horizontal del equipo.....	23
Figura 7. Puntos en común con dos escenas estáticas.....	24
Figura 8. Ejemplos de targets.....	24
Figura 9. Resolución espacial (Horizontal y vertical).....	27
Figura 10. Lectura axial del escáner.....	28
Figura 11. Pantalla del escáner según parámetros de resolución y calidad.....	30
Figura 12. Ejemplos de Precisión y Exactitud.....	33
Figura 13. Área de estudio escaneada en la Universidad Distrital, Bogotá.....	39
Figura 14. Escáner laser terrestre Faro 3D.....	40
Figura 15. Diagrama de la investigación.....	44
Figura 16. Terreno montañoso donde se realizó la prueba 1.....	45
Figura 17. Vista general y detalle de la zona de localización de la malla.....	45
Figura 18. Diseño y separación de la cuadrícula.....	46
Figura 19. Zona dura en donde son materializados los ejes T1 a T18.....	47
Figura 20. Base nivelante y control de perpendicularidad del prisma.....	47
Figura 21. Materialización de puntos y control de la línea eje.....	48
Figura 22. Los dos ejes con los targets colocados con respecto al escáner.....	48
Figura 23. Detalles de la configuración de las tres resoluciones 1/1, 1/8 y 1/20.....	49
Figura 24. Cinta de seguridad y escáner.....	50
Figura 25 Nube de puntos tomados con escáner láser terrestre y targets.....	51
Figura 26. Detalle de nivelación con nivel electrónico.....	51
Figura 27. Toma de azimut y distancia de los puntos sobre los ejes.....	52
Figura 28. Placa TT20 y visual desde TT19 al cilindro No. 3.....	58
Figura 29. Escáner con visual a cilindro 2 y registro de esfera en placa TT20.....	59
Figura 30 Posición recomendada de escaneos y esferas en terreno montañoso.....	60
Figura 31. Vista de escáner, posición de targets y esferas sobre trípode.....	61
Figura 32. Vista de escáner y esferas sobre trípode.....	61
Figura 33. Vista de resolución 1/5 y calidad 4x.....	62
Figura 34. Vista de la nube de puntos a eliminar sobre la superficie del terreno.....	63
Figura 35. Vista de la nube de puntos de árboles y postes sobre la superficie del terreno.....	63
Figura 36. Capa superficial.....	64
Figura 37. Inserción de un punto en un diagrama de Voronoi.....	64
Figura 38 Configuración proyección global mapper.....	66
Figura 39. Modelo digital generado con Global Mapper.....	67
Figura 40. Modelo digital de terreno.....	67
Figura 41. Posiciones de cilindros y placas en el plano.....	69
Figura 42. Lectura de posición de coordenadas y alturas Placa TT19 en la imagen.....	71
Figura 43. Coordenadas punto PS2.....	71
Figura 44. Medida de distancias entre C2 y TT20.....	72
Figura 45 propiedades del área de escaneado y nube de puntos con filtro.....	75
Figura 46. Búsqueda de objetos de tablero y medida entre los puntos.....	75
Figura 47. Diferencias de dispersión en distancia (m) de resolución 1/1 (153 datos).....	81



Figura 48. Diferencias de dispersión en distancia (m) de resolución 1/8 (120 datos).....	82
Figura 49. Diferencias de dispersión en distancia (m) de resolución 1/20 (91 datos).....	83
Figura 50. Gráfica con las diferencias de distancia en las tres resoluciones .....	83
Figura 51. Medidas con escáner laser terrestre para distancia de 20 m y distancias reales .....	84
Figura 52. Superficies para las tres resoluciones.....	86
Figura 53. Perfiles eje izquierdo (T10-T18).....	87
Figura 54. Diagrama de caja coordenadas Norte.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 55. Diagrama de caja coordenadas Este .....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 56. Diagrama de caja cotas .....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 57. Toma de medidas del punto Ver 1 al Ver 8 en la nube de puntos .....	¡Error! Marcador no definido.
<b>Marcador no definido.</b>	
Figura 58. Diagrama de caja distancias horizontales .....	¡Error! Marcador no definido.
Figura. 59 Diagrama de Caja distancias verticales .....	¡Error! Marcador no definido.
Figura. 60 Posición de la placa TT20 y cilindro 2 .....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 61. Posición de Placa TT19 y vista de esferas.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 62. Vista de esferas y tagets.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 63 Esfera en color verde identificado y target .....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 64. Esferas identificadas en el escáner.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 65. Promedio de resultados .....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 66. Unión de cinco escenas escaneadas.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 67. Vista de correspondencia con posiciones del escáner .....	¡Error! Marcador no definido.
<b>definido.</b>	
Figura 68. Archivo .txt con coordenadas y alturas.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 69. Esfera TT20 con sus coordenadas .....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 70. Cilindro C2 con sus coordenadas .....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 71. Exportación a formato E57.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 72. Curvas de nivel cada metro sobre el modelo digital de terreno	¡Error! Marcador no definido.
<b>no definido.</b>	
Figura 73. Detalle modelo digital de terreno con curvas de nivel y puntos georreferenciados.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 74. Modelo digital de terreno con curvas de nivel y puntos georreferenciados	¡Error! Marcador no definido.
<b>Marcador no definido.</b>	
Figura 75. Curvas de nivel y puntos de control .....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 76 Curvas de nivel .....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 77. Delta del diseño de la vía en la curva espiral circular espiral...	¡Error! Marcador no definido.
<b>no definido.</b>	
Figura 78. Diseño horizontal con abscisas y calzada.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 79. Detalle del diseño vertical del K0+000 al K0+070 .....	¡Error! Marcador no definido.
<b>definido.</b>	
Figura 80. Diseño vertical .....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 81. Secciones transversales .....	¡Error! Marcador no definido.
Figura. 82 Diseño de peralte.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 83. Plano final planta perfil.....	¡Error! Marcador no definido.

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Frecuencia de repetición y duración del pulso según configuración .....	29
Tabla 2. Requisitos ASPRS de exactitud topográfica en planimetría .....	35
Tabla 3. Exactitud topográfica en elevación ASPRS .....	36
Tabla 4 Configuración de las características de los escaneos .....	50
Tabla 5. Coordenadas, cotas, azimuts y distancias entre puntos .....	58
Tabla 6. Coordenadas y cotas de cilindros .....	69
Tabla 7. Coordenadas y cota (m) de los puntos T1 a T18 sobre los ejes .....	74
Tabla 8. Distancia con base en las coordenadas entre cada uno de los puntos.....	76
Tabla 9. Matriz de distancias topográficas y de resoluciones 1/1 .....	77
Tabla 10. Matriz de distancias topográficas y de resolución 1/8.....	78
Tabla 11. Matriz de distancias topográficas y de resolución 1/20.....	78
Tabla 12. Diferencias en distancias entre topografía y las tres resoluciones.....	79
Tabla 13. Cálculos del error medio cuadrático RMSE para las tres resoluciones.....	85
Tabla 14. Coordenadas y alturas tomadas de la nube de puntos -MDT ...	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 15. Coordenadas y alturas levantamiento topográfico	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 16. Coordenadas y alturas del DTM y topografía .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 17. Datos para obtener la exactitud de un DTM por comparación de coordenadas en X, Norte .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
La Tabla 18 muestra los puntos, coordenadas DTM, coordenadas con topografía en Y de los 20 puntos. Tabla 18. Datos para obtener la exactitud de un MDT por comparación de coordenadas Y, Este.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 19. Datos para obtener la exactitud de un MDT por comparación de alturas ..	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 20 Cuartiles Norte .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 21 Rango intercuartil .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 22. Cuartiles Este.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 23. Rango intercuartil Este .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 24. Cuartiles cotas .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 25. Rango intercuartil Cotas.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 26. Distancias en la nube de puntos y por coordenadas .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 27. Distancia horizontal nube de puntos y coordenadas .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 28. Cuartiles .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 29. Intercuartil .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 30. Distancia vertical nube de puntos y coordenadas	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 31. Cuartiles.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 32. Intercuartil .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 33 Parámetros de diseño .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 34. Elementos geométricos de la curva espiral circular espiral .	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 35. Coordenadas y cotas de las abscisas .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

## INTRODUCCIÓN

Los modelos de terreno han sido estudiados y usados por personal militar, planificadores, arquitectos, paisajistas, ambientalistas, geógrafos, ingenieros civiles, así como otros expertos en diversas ciencias de la tierra. Originalmente, eran modelos físicos, de caucho, plástico, arcilla, arena, etc, (Li Zhilin et al., 2005). Nuevas tecnologías de captura de información masiva y con la red de computadores que se han introducido en esta área, han permitido por medio de los software el modelado de la superficie del terreno, de manera más precisa y eficiente.

Las técnicas utilizadas para la medición real de las posiciones de un elemento en el terreno son variadas, levantamientos de campo mediante el uso de teodolito, estación total y gps para la medición directa de superficies de terreno, fotogrametría, radargrametría y radar de apertura sintética (SAR), escaneo láser aerotransportado (LIDAR) y digitalización cartográfica. Cada uno de estos métodos ofrece diferentes precisiones y utiliza diversos tiempos para la toma de información, procesamiento y análisis. En cuanto a la precisión de la medición, un nivel de milímetro se puede llegar por levantamiento topográfico y al nivel de centímetro por fotogrametría y a metro por digitalización de los mapas. La exactitud de los datos fotogramétricos depende de las imágenes utilizadas. En el caso de la fotogrametría utilizando imágenes de satélite, la precisión podría ser muy baja, dependiendo de la resolución. Por ejemplo, si se utilizan imágenes Spot con una resolución de 10 m, entonces la precisión es de 5 a 10 m. Insar es una buena técnica para mostrar la deformación de medición y con ello se puede alcanzar una exactitud de 1 cm. Sin embargo, en la generación de modelos digitales de terreno (MDT), tomando las alturas absolutas sobre la superficie del terreno, se obtiene una exactitud alrededor de 5 m. La exactitud de los datos radargramétricos es aún menor pero para, Insar y radargrametría, realizando un control topográfico y fotogramétrico las características del modelo se pueden mejorar (Li Zhilin et al., 2005). En términos de eficiencia, la topografía convencional necesita más mano de obra y por lo tanto sólo es adecuado para el modelado de un área pequeña, cuando se requiere una alta exactitud. Por otro lado, la mayoría de los procesos técnicos de fotogrametría ya han sido automatizados, por lo tanto, la adquisición de datos es más eficiente. La técnica fotogramétrica es más conveniente para las áreas de tamaño mediano y grande. Para la digitalización cartográfica, el proceso de escaneado puede ser fácilmente automatizado,

pero sigue siendo necesaria la intervención humana durante la conversión de raster a vectorial.

Con la utilización del escáner laser terrestre, que es un dispositivo para recolectar gran densidad de datos masivamente reportando una nube de puntos tridimensional, a partir de la medición de distancias y ángulos, mediante un rayo de luz láser en diferentes resoluciones, implica que se puede aplicar a levantamientos de terreno, generando una superficie para ser utilizada en proyectos de ingeniería y topografía. La gran cantidad de datos suministrados por el equipo, permite diferenciar el movimiento de la deformación de la tierra al milímetro o centímetro y medir distancias horizontales, verticales e inclinadas y coordenadas. El método conocido para la captura de datos y generación del MDT consiste en conocer la ubicación del escáner laser terrestre trazando una poligonal sobre cada uno de los orígenes de su propio sistema de coordenadas, donde se coloca también un receptor GNSS (Global Navigation Satellite Systems) calibrado para determinar su posición (Jiménez, 2012). No se conoce una metodología adaptada a normas colombianas para generar modelos digitales que sean confiables en áreas pequeñas, para diseñar sobre ellos obras de ingeniería que requieren una posición en coordenadas y altura de alta exactitud.

El presente trabajo se realizó para establecer un método que permita generar modelos digitales de terreno con base en datos de escáner laser terrestre (ELT). Se midió la eficiencia de esta tecnología en la obtención de superficies para trabajar en mapas a escalas grandes de 1:50 a 1:5000, con especificaciones de precisión referidas en la resolución número 64 de 1994 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, la norma técnica colombiana NTC 5043 conceptos básicos de la calidad de los datos geográficos y NTC 5205 precisión (exactitud) de datos espaciales, que están relacionadas con las de la Sociedad Americana para la Fotogrametría y Teledetección, cuyas siglas en inglés son ASPRS, para proyectos de ingeniería civil y topografía.

Existe un gran vacío con respecto a los tipos de escáner y qué resolución es la más óptima para generar una nube de puntos que permita conocer el comportamiento del terreno. Para cumplir el objetivo principal primero se evalúan tres resoluciones alta, media y baja del escáner laser terrestre para la confiabilidad de los datos según los estándares de exactitud en mapas de escalas grandes. Se realiza un análisis para determinar la exactitud de posición relativa y absoluta de un modelo digital de terreno

según la resolución obtenida. Se documenta y determina por método de posicionamiento libre del escáner y georreferenciado a dos puntos con coordenadas conocidas, la recolección de datos de un corredor de un área montañosa para la generación del modelo digital de terreno que lo representa convenientemente con buena resolución y exactitud centimétrica. Para determinar su aplicabilidad se realiza un diseño horizontal y vertical de un tramo de una vía.

En esta investigación se realizan actividades como determinación de coordenadas por método topográfico, nivelación de precisión, recopilación de datos con Escáner Laser Terrestre, georreferenciación de la nube de puntos, procesamiento y análisis con software Scene, global mapper y Autocad, con base en la resolución determinada. La metodología propuesta por posición libre del escáner, no sobre placas topográficas, genera datos confiables en su posición relativa y absoluta en X, Y y Z. Los conceptos y procedimientos son aplicables a cualquier equipo ELT. Para el desarrollo de este trabajo se utilizó un equipo de la marca Faro 3D 130, en el anexo 1 se muestra el procedimiento de campo y oficina detalladamente.

## **OBJETIVOS**

### **General**

Desarrollar una metodología para generar modelos digitales de terreno a partir de datos tomados con escáner laser terrestre

### **Específicos**

- Evaluar las diferentes resoluciones espaciales del escáner laser terrestre para la confiabilidad de los datos según los estándares de exactitud en mapas de escalas grandes.
- Determinar la exactitud en posición relativa y absoluta de un modelo digital de terreno según la resolución obtenida.
- Documentar el proceso para generación de los modelos digitales de terreno con escáner laser terrestre.
- Determinar la utilidad del modelo digital aplicándolo al diseño de un tramo de vía

# 1. REVISIÓN DE LITERATURA

## 1.1 Modelos Digitales de Terreno

Los modelos digitales de terreno se definen como la representación en formato digital de una porción de la superficie terrestre, y se conocen de diferentes maneras. Los términos más utilizados son:

- Modelo Digital de Superficie o DSM, describe la superficie terrestre, incluyendo los objetos que lo cubren como edificios, la vegetación y, en general, se expresan a través de elementos geométricos (rectángulos o triángulos).
- Modelo Digital del Terreno o MDT, describe la superficie justo en el nivel del suelo.
- Modelo Digital de Elevación o DEM, en términos geométricos, es equivalente a la MDT.

Se puede definir como una cuadrícula regular de la medición de la altura (generalmente con celdas cuadradas) organizado en un formato raster (Gomarasca, 2009). También se puede definir como 'un modelo digital del terreno que se ocupa de las elevaciones sobre el nivel del mar' (Jedlička, 2009).

La representación del terreno por medio de modelos digitales de terreno, son un avance importante debido a que ha permitido pasar de la forma tradicional de modelar la superficie terrestre en dos dimensiones a una más cercana a la realidad que es en tres dimensiones. El MDT, tiene una utilidad para la caracterización cuantitativa del relieve, de manera que se obtienen varios parámetros que pueden entrar a alimentar los diversos modelos espaciales que se requieren para la toma de decisiones en aspectos ambientales, de planificación, uso, conservación, manejo de los recursos naturales y soporte para las obras civiles. Por medio de un MDT, se pueden calcular parámetros como altura, pendiente, forma de pendiente, curvatura, aspecto, índice de humedad topográfico, radiación solar, características hidrográficas (Li Zhilin *et al.*, 2005). Los MDT son una fuente de datos que permiten calcular parámetros de la superficie del terreno que son útiles en diferentes campos como hidrología, la geomorfología, los estudios de suelos, los riesgos y amenazas, el mapeo de la erosión, modelamiento de glaciares, climatología y en forma indirecta estudios de ecología, vegetación, agricultura y uso de la tierra, entre otros (Martínez, 2012).

La medición y toma de información de la forma y características del terreno es costosa, y demanda mucho tiempo para realizar todos los procesos hasta la obtención de resultados.

La calidad de los MDT determina la calidad del análisis geomorfométrico en muchos estudios a nivel de las ciencias de la tierra. Incluso el algoritmo geomorfométrico más sofisticado será incapaz de rectificar datos graves o erróneos en los MDT de entrada (Hengl, 2009). La calidad de los parámetros y objetos de la superficie terrestre y las aplicaciones dependen de varios factores, la rugosidad de la superficie de la tierra, la densidad de muestreo, la resolución de la cuadrícula o el apoyo de muestreo, el algoritmo de grillado, la resolución vertical y el tipo de análisis (Florinsky, 1998).

### **1.1.1. Representación de la superficie del terreno**

Los pobladores han intentado por todos los medios conocer y representar su entorno y los componentes del terreno con los que han estado familiarizados, y la pintura puede ser la representación más antigua. Una pintura ofrecía información muy general sobre la forma y localización del terreno que representaba; luego se representaron las características del terreno sobre mapas que han tenido un rol importante en el desarrollo de las sociedades, mejorando la métrica de calidad (o exactitud) usándola para proyectos de ingeniería.

Los mapas topográficos usan por medio de un plano en 2D y con ayuda de las curvas de nivel, una representación de la tierra en 3D. Tal vez por ese elemento se cree que el mapa de contorno o curvas de nivel, es uno de los inventos más importantes en la historia de la cartografía, debido a su conveniencia y a la intuición para percibir la información de la altura. Desde 1849 las fotografías y más tarde las fotografías aéreas se han utilizado por medio de la fotogrametría para la representación del terreno. Luego desde 1970 los sistemas de satélites toman imágenes superpuestas del terreno de modo que estas imágenes también se puedan utilizar para construir modelos 3D.

‘Desde mediados del siglo 20, diversas técnicas de representación digitales del terreno se han desarrollado con la incorporación de la tecnología de la informática, las matemáticas modernas, y ordenadores gráficos. De hecho, las computadoras se han convertido en un medio importante para la representación digital de la superficie del terreno.’ (Li Zhilin, *et al.*, 2005). En como representar la superficie del terreno, el MDT es uno de los conceptos más importantes, y se puede definir como: ‘Una representación estadística de la superficie continua de la tierra por un gran número de puntos seleccionados con coordenadas conocidas X, Y, Z en un campo de coordenadas arbitrario’ (Miller and Laflammer, 1958).



Pero el término modelo es usado para representar una situación, un propósito o una predicción de una situación. Por este motivo se puede definir un modelo como 'un objeto o un concepto que se utiliza para representar una cosa. Es la realidad simplificada y se convierte en una forma que podemos comprender' (Meyer, 1995). Es un proceso de modelado matemático. Estas funciones matemáticas se refieren generalmente a funciones de interpolación. En un proceso de este tipo, se muestrean puntos del terreno a ser modelado con una cierta exactitud en observación, densidad, y distribución; la superficie del terreno se representa entonces por el conjunto de puntos de muestra. 'Los atributos en ubicaciones se aplican a continuación mediante la formación de un MDT de los puntos de datos muestreados. Otros atributos podrían ser el valor de la altura, la pendiente y aspecto, y así sucesivamente' (Li Zhilin, *et al.*, 2005).

### **1.1.2. Muestreo en el terreno**

Para modelar una zona de la superficie terrestre se debe realizar un muestreo que se refiere a la selección de la ubicación, después con la medición se determinan las coordenadas de ubicación. Existen tres cuestiones importantes relacionadas con la fuente de datos adquiridos en el MDT: la densidad, la exactitud y la distribución. La exactitud se relaciona con las mediciones. La densidad y la distribución óptima están estrechamente relacionadas con las características de la superficie del terreno. Por ejemplo, si un terreno es plano, tres puntos en cualquier ubicación serán suficientes.

El terreno a muestrear tiene dos tipos de descriptores: cualitativos que son generales y cuantitativos o numéricos donde juntos expresan las características espaciales propias de la zona. Se encuentran entre ellos algunos descriptores irrelevantes para los modelos digitales de terreno. Los siguientes son algunos de los descriptores cualitativos: La vegetación, agua, desierto, tierra, nieve y las características hechas por el hombre. También los accidentes geográficos y la fisiografía. Como descriptores cuantitativos se pueden nombrar: el espectro de frecuencia donde una superficie puede ser transformada desde el dominio espacial, al dominio de frecuencia por medio de una transformación de Fourier. La dimensión fractal que es otro parámetro estadístico que puede usarse para caracterizar la complejidad de una curva o una superficie. La curvatura donde la superficie del terreno se puede sintetizar mediante la combinación de elementos de forma del terreno, definidos como unidad de alivio de curvaturas de planta y perfil homogéneos. La covarianza o grado de similitud entre los pares de puntos de la superficie puede describirse por una función de la correlación. El

semivariograma que es otro parámetro describía la similitud de una superficie de MDT(Li Zhilin *et al.*, 2005).

### **1.1.3. Toma de datos y métodos para generarlos**

Para modelar un tramo de la superficie del terreno, primero un conjunto de puntos de datos tiene que ser adquirido sobre ella. De hecho, la adquisición de los datos es la primera fase y más importante en el modelado digital del terreno. Se utilizan varias técnicas para la adquisición de datos:

- Topografía de campo utilizando teodolito y GPS estación total para la medición directa.
- Fotogrametría utilizando pares estereoscópicos de imágenes aéreas e instrumentos fotogramétricos.
- Digitalización cartográfica mediante el uso de mapas y digitalizadores existentes. (Zhilin Li, 2005).
- Radargrametría y el radar de apertura sintética SAR. Esta es la base para tres tipos de técnicas, es decir, radargrametría, interferometría, y radar clinometría.
- Un sistema remoto activo para recoger datos de barrido láser aerotransportado es el Light Detection and Ranging (LIDAR), cuyo uso con varios experimentos se da desde los años 60s y 70s. Presenta una serie de aplicaciones en las que los métodos tradicionales fallan o se vuelven demasiado caros, por ejemplo, en la adquisición de datos de elevación del terreno en áreas con vegetación densa.

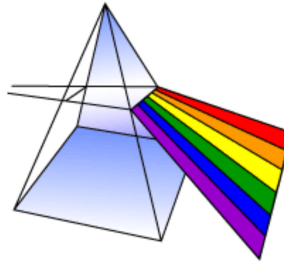
Para la generación de los Modelos Digitales del Terreno se requieren cuatro componentes principales: La adquisición de datos, el modelado, la gestión de datos y desarrollo de aplicaciones. Tradicionalmente los métodos más importantes para adquisición y generación de modelos digitales son por topografía y GPS, fotogrametría, Insar, radargrametría, Lidar y digitalización de mapas. Cabe señalar que estos métodos de adquisición de datos todos tienen ventajas y desventajas. Por lo tanto, a la hora de elegir un método, se deben considerar varios aspectos, tales como la finalidad, requisitos de exactitud, las condiciones de los equipos, y la disponibilidad de los materiales de base. Para ayudar en la toma de decisiones, una comparación entre estos métodos en varios aspectos, como la eficiencia, el costo y la exactitud serían muy útiles (Li Zhilin *et al.*, 2005).

## 1.2 Escáner Laser Terrestre (ELT)

### 1.2.1 Principios y funcionamiento de los levantamientos con laser

Dado que el Escáner laser se fundamenta en conceptos de luz es necesario hablar primero del espectro electromagnético. 'La razón porque vemos los objetos es porque emiten, reflejan o transmiten una parte visible del espectro que llamamos luz. Esta parte visible del espectro electromagnético está compuesta por los colores que podemos ver en el arco iris' (Lerma y Biosca, 2008). Los colores corresponden a longitudes de onda diferentes (Figura 1).

Figura 1. Prisma que descompone la luz blanca en los diferentes colores

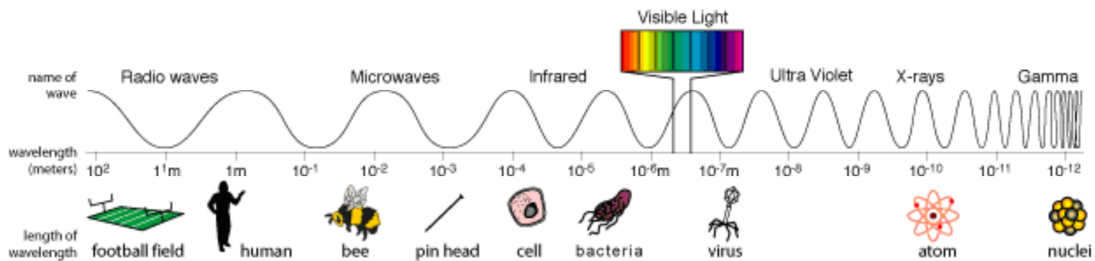


Fuente: (Lerma, 2008)

A continuación se muestra la variación de las longitudes de onda del espectro electromagnético ( $E$ ), (Figura 2). Este se expresa en términos de energía, longitud de onda o frecuencia con las siguientes ecuaciones en donde  $C$  = velocidad de la luz, 299.792.458 m/s;  $h$  es la constante de Planck,  $6.626069 \times 10^{-34}$  J.s.  $\nu$  representa la frecuencia y  $\lambda$  la longitud de onda.

$$C = \nu * \lambda \quad \text{y} \quad E = h * \nu = C / \lambda \quad (1)$$

Figura 2. Rango de las longitudes de onda



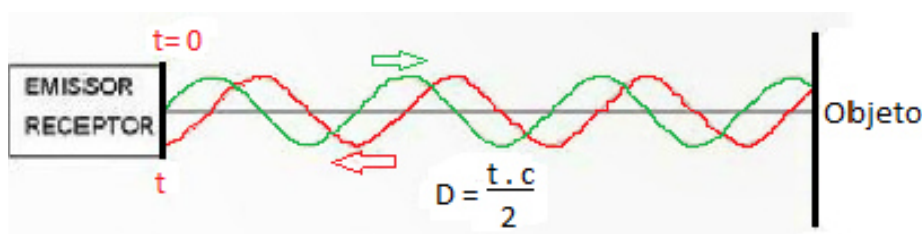
Fuente: (Lerma, 2008)

El Escáner Laser Terrestre (ELT) funciona por medio de la emisión de un haz de láser infrarrojo hacia el centro de un espejo giratorio. El láser es un instrumento capaz de generar ondas de luz usando una estrecha banda del espectro electromagnético. La palabra láser es el acrónimo en inglés de las palabras amplificación de la luz por emisión inducida de radiación (Lerma, *et al.*, 2008).

Para la medición basada en tiempo de vuelo, las ondas de luz viajan con una velocidad finita y constante a través de un medio, donde la distancia va a ser igual a la velocidad de la luz por el tiempo dividido en 2. Los escáneres de marca Optech, Leica, Riegl, Trimble y Callidus usan este método, no usan haces continuos, sino pulsos de láser. Estos equipos poseen relojes de alta precisión.

El escáner laser terrestre genera la luz láser y el espejo del equipo desvía el láser en rotación vertical alrededor del entorno que se escanea, luego la luz dispersada de los objetos circundantes se refleja en el escáner. Para medir la distancia, el Laser escáner utiliza la tecnología de desfase o de tiempo de vuelo. Esto significa que el haz del láser es modulado mediante ondas constantes de diferente longitud. Con la técnica basada en la medición del tiempo de transmisión del láser a partir del emisor, TOF (Time of Flight – Tiempo de Vuelo) reflejando en el objeto escaneado y retornando hasta el receptor, permite que el retorno del láser pueda ser controlado y se puedan almacenar varios retornos a partir de un único pulso, al ser controlado el retorno del láser. Para cada giro horizontal y/o vertical, calculado en función de la resolución requerida, es emitido un pulso donde tenemos entonces el tiempo medido y la distancia determinada por la velocidad concebida del láser (Rovane, 2012) (Figura 3).

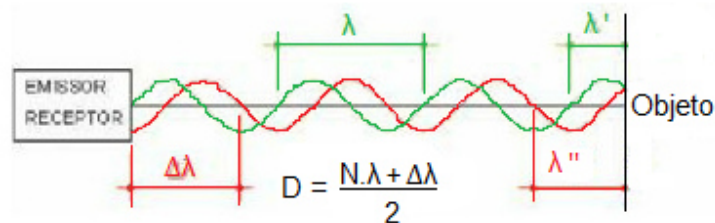
Figura 3. Esquema gráfico de la medición del tiempo



Fuente: Rovane, 2012

El otro principio de medición en tiempo es el que se basa en la fase, modulando la potencia del haz láser. La distancia del escáner al objeto se determina con exactitud al medir los desfases en las ondas de luz infrarroja, que se conoce como diferencia de fase (Phase Shift) – esta técnica emite el láser de forma continua (Figura 4) y, a través de la diferencia de fase ( $\Delta\lambda$ ), identifica las variaciones de distancia, cuya resta resuelve el número (N) de longitudes de ciclos internos ( $\lambda$ ) por un sistema de ecuaciones. La gran ventaja de esta técnica es la mayor exactitud en la medición (pudiendo llegar a décimos de milímetro en la distancia) y también la cantidad de puntos registrados, que actualmente llega a 1 millón de puntos por segundo. Estos equipos por ejemplo de marcas IQsun, Leica, Z+F y Faro están basados en la fase y son muy utilizados para industria, patrimonio histórico, arquitectura e ingeniería.

Figura 4. Esquema gráfico de la diferencia de fase



Fuente: Rovane, 2012

Existen unos escáneres que traen el sistema hipermodulación, esto mejora en gran medida la relación señal-ruido de la señal modulada con la ayuda de una técnica especial de modulación.

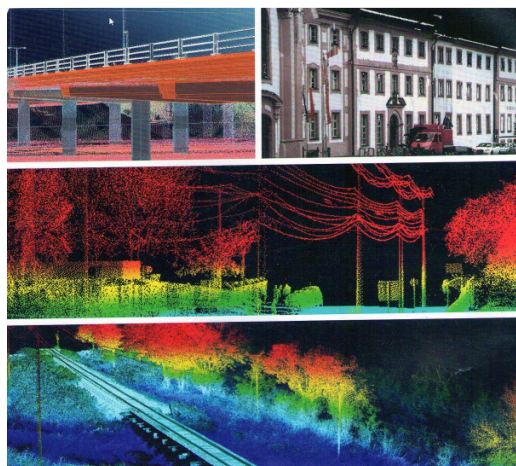
Los ELT miden básicamente coordenadas polares (ángulos y distancias) y almacenan las coordenadas rectangulares  $x$ ,  $y$ ,  $z$  de cada punto, estas se calculan utilizando codificadores de ángulos para medir la rotación del espejo y la rotación horizontal escáner láser. La PC a bordo permite que el escáner funcione sin necesidad de utilizar una computadora portátil. Después de hacer el escaneo, él puede desplazarse con facilidad por una vista 3D en la que puede inspeccionar y analizar la totalidad de los datos de escaneo.

Los escáneres pueden alcanzar hasta 400 m, son rápidos y precisos ya que crean una copia virtual de la realidad con una exactitud milimétrica, algunos alcanzando una

velocidad de hasta 976.000 puntos de medición por segundo. Los nuevos sensores incluyen pantalla táctil para las funciones de control y escaneo, brújula, sensor de altura y compensador de eje dual. Con diseños portátiles permiten funcionamientos sin dispositivos externos, son pequeños y compactos con pesos que llegan hasta los 5.0 kg, permitiendo buena movilidad.

Con el control remoto WiFi le permite iniciar, detener, ver o descargar escaneos de forma remota. Los escaneos 3D se pueden observar con realismo fotográfico gracias a la cámara a color integrada. Las baterías de iones de litio proporcionan hasta cinco horas de funcionamiento y algunas pueden cargarse durante el servicio. Los datos se almacenan en tarjetas SD que permiten su transferencia fácil y segura a un PC. Las nubes de puntos representan imágenes detalladas de los objetos tomados como lo indica la Figura 5.

Figura 5. Imágenes y nube de puntos tomadas con Escáner Optech



Fuente: Cripps, 2012

La exactitud de las coordenadas obtenidas en cada punto, depende, de la exactitud que el equipo disponga, para la medición de la distancia, y la misma angular que contenga.

### 1.2.2 Métodos de Levantamiento y equipo

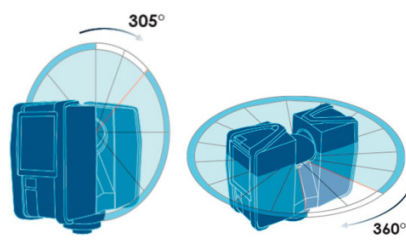
El escaneo láser es una técnica de teledetección activa donde el pulso de luz láser se emite y se dispersa en un objetivo. El tiempo que tarda la luz para volver se registra y marca la distancia entre el objeto y el sensor (Faro, 2010). Los escáneres de medición

basados en tiempo son escáneres activos que miden un intervalo de tiempo entre dos sucesos. El sistema Escáner Láser Terrestre, es una tecnología que permite obtener datos tridimensionales (X, Y, y Z) de nube de puntos que pueden ser georreferenciados usando el Global Navigation Satellite System (GNSS).

La industria del escáner ocupa un rango amplio de estos equipos, que abarca desde los escáner del tipo médico, los de documentos, los de barras que diariamente vemos en supermercados, y también los llamados escáner de vehículos, que fundamentalmente es una caja computarizada que prueba y verifica todas las partes funcionales del automóvil, todos ellos de naturaleza e índole completamente diferente (Márquez, 2010).

Un Escáner Laser Terrestre es un dispositivo, ajustado sobre un trípode, que recorre por medio de un Laser, los elementos del espacio a  $360^\circ$  en la horizontal y algunos a  $305^\circ$  en la vertical de acuerdo a la ventana que se le ajuste (Figura 6). Así se logra que a cada punto del objeto explorado se le asigne las coordenadas reales que está ocupando el escáner en el sistema coordinado de representación espacial. El dispositivo gira a pequeños incrementos angulares de izquierda a derecha, tomando la medida del ángulo horizontal del escáner, un espejo giratorio, se mueve de abajo hacia arriba, y va disparando el Laser a intervalos predeterminados, calculando con esos disparos, la distancia entre el escáner y el punto, donde la luz láser se refleja y se devuelve (Manual Faro, 2010).

Figura 6. Rotación vertical y horizontal del equipo



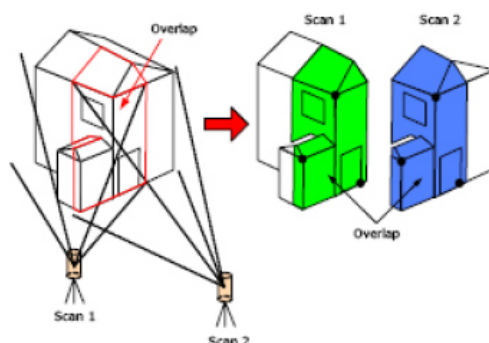
Fuente: (FARO, Manual Faro Laser Escaner Focus 3D, 2010)

Existe otra una tecnología que permite determinar la intensidad y la distancia a un objeto o superficie usando pulsos láser, es el más conocido como Lidar (Light Detection And Ranging) para captura de datos topográficos encontrándose instalado desde Satélites, también aerotransportado y terrestre. Esta tecnología e instrumento de medición precisa, produce imágenes fotorrealistas tridimensionales de geometrías y entornos complejos, permite capturar de manera discreta pero a muy alta resolución cualquier elemento en

tres dimensiones (3D), de modo que pueda ser analizado digitalmente en un entorno CAD, SIG o Base de Datos.

Se pueden clasificar los ELT en Estático y Móvil. El equipo Estático es colocado sobre un punto haciendo el escaneo del área a trabajar. Cada punto ocupado es llamado “escena”, donde para medir toda el área de interés, es necesario ocupar varias escenas (Figura 7). Las escenas son unidas analíticamente por puntos en común, generando la nube de puntos. Tienen como ventaja la accesibilidad (usa como soporte trípode convencional) y precisión posicional (compensadores que garantizan la verticalidad del equipo) (Rovane, 2012).

Figura 7. Puntos en común con dos escenas estáticas



Fuente: Rovane, 2012

El levantamiento Estático esta compuesto por escenas y estas se deben unir con puntos en común para integrar una sola nube de puntos. Para aumentar la calidad de los registros en el trabajo de campo, se utilizan puntos en común o referencia llamados Targets, que púeden ser planos, esféricos y adhesivos como lo muestra la Figura 8.

Figura 8. Ejemplos de targets



En el objetivo o target plano, su centro se identifica por el contraste entre los colores impresos. Puede instalarse sobre madera, bastón o base de nivelación para poderlo articular en horizontal como en vertical. El esférico ofrece mayor agilidad en el posicionamiento de las esferas ya que son fácilmente identificables en la imagen y que



pueden ser medidos en direcciones opuestas porque el escáner toma los puntos que ve sobre la superficie de la esfera, calcula el centro que se integra a la escena escaneada a nivel de pixel, para en esta forma dar precisión a la orientación del equipo. Los adhesivos son impresos con un patron de cuadros en una hoja adhesiva y se colocan en una superficie plana y lisa, no poseen articulación limitando que se escaneen escenas opuestas o con inclinación. Un mayor número de Targes que se solapen y su distribución da una mayor confianza para registros de calidad y consistencia, posibilitando el montaje posterior de los escaneos de puntos en una nube de puntos global.

### **1.2.3 Utilidades**

El sistema láser terrestre está siendo utilizado en diversos sectores de la sociedad en áreas como ingeniería, cartografía, arquitectura, investigaciones forenses y de tránsito, geología, arqueología, etc. Además de obtener datos tridimensionales y de ser georeferenciados, se puede añadir informaciones de textura y color gracias a la cámara fotográfica acoplada al equipo.

El uso del ELT para Modelos Digitales de Afloramiento (MDA) fue introducido en trabajos de campo para estudios geológicos, favoreciendo la interpretación, comparación y cuantificación de flujos de sedimentos. Los arqueólogos tienen hoy en día una amplia gama de herramientas de Geomática y técnicas disponibles para ayudarles en su trabajo. Estas herramientas modernas permiten a los arqueólogos grabar el patrimonio con mayor precisión y más rápido que nunca con abundantes datos espaciales para la visualización y análisis. Un sistema modular que le da al usuario la posibilidad de explotar el potencial de escaneo láser para medir el cambio y la mejora de la seguridad minera, utilizada normalmente en minas a cielo abierto para el seguimiento de la estabilidad permanente o periódica de altos muros. Un escáner láser moderno está ayudando en el norte del Reino Unido, a la policía para abrir las carreteras más rápido después de colisiones graves, minimizando así la congestión y por tanto la interrupción de los demás usuarios. El láser 3D, se utiliza para grabar la evidencia esencial en la escena. Estos datos vitales son utilizados por investigadores de colisiones para producir una reconstrucción virtual en 3D del sitio, incluyendo gráficos de alta calidad y los planes detallados, para su uso en investigaciones posteriores y los casos judiciales.

A continuación se describen algunos temas de los que se han realizado acercamientos y trabajos prácticos, según una revisión bibliográfica. Estudios sobre exactitud y precisión del láser escáner terrestre, comparación de la forma de onda Lidar de huella pequeña huella y larga para la caracterización de la superficie terrestre, mediciones de brillo y calibración con escáneres láser aerotransportado y terrestre, análisis de pendiente, caracterización de la rugosidad del suelo, análisis de carreteras generando nubes de puntos móviles terrestres, estudios de humedad del suelo según su rugosidad del suelo, estimación del LAI de un árbol con datos de escáner, levantamiento y análisis de patrimonio arquitectónico, datos 3D para sector forestal, índice de recuperación efectivo del área foliar en bosques, características mineras, grabación y modelado de cuevas paleolíticas, estimación del parámetro de inventario forestal, deslizamiento de tierra, monitoreo ambiental, detección de vegetación en entornos urbanos. Se han hecho trabajos con algunos equipos de escáner en la isla de Malasia, sobre análisis del gradiente de pendiente con una resolución diferente mediante escáner láser terrestre (Wan *et al.*, 2012), en España en estimación de la incertidumbre en las mediciones terrestres (Polo *et al.*, 2012).

En estudios sobre resoluciones hay documentos en trabajos realizados en China sobre terrenos en deslizamiento y resoluciones (Zhu Ling *et al.*, 2008); se toman estos equipos como procesos diferentes del método de toma de datos tradicional. El ELT no sólo se involucra en la precisión de la posición de un solo punto, sino también hace hincapié en la exactitud del modelado de la superficie 3D. La resolución regula el nivel de detalles de identificación dentro de las nubes de puntos escaneados” (Zhu Ling *et al.*, 2008).

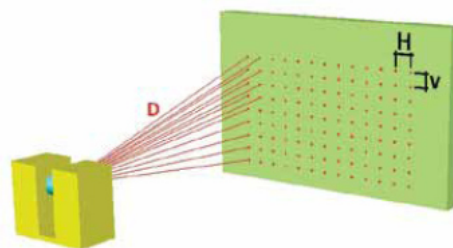
Se aplica el sistema láser escáner en infraestructura, mantenimiento y administración de obras y proyectos de ingeniería generando: ‘mapas tridimensionales precisos y actualizados para optimización de proyectos y procesos de construcción. Simulación de impactos ambientales para ayudar a encontrar soluciones de efecto adverso mínimo al uso de la tierra, vegetación e hidrología. Condiciones en la inspección de vías y aeropuertos, suministrando resolución vertical suficiente para detectar deformaciones en las superficies (Dalmolin *et al.*, 2013)

### 1.2.4 Resolución

Un elemento a seleccionar muy importante al planear un trabajo con escáner laser terrestre es definir una correcta resolución. La resolución se define como “la distancia entre dos puntos medidos consecutivamente, y de esta manera determina la densidad de puntos en la nube” (Lerma y Biosca, 2008). La mayoría de los sistemas de medición poseen especificaciones técnicas con respecto a la resolución y al concepto de precisión. La exactitud también denominada como margen de error se puede definir como “la proximidad de coincidencia entre el resultado de la medición y un valor real de la magnitud concreta que se está midiendo (Faro, 2014). En la realidad nunca se puede conocer el valor verdadero de la magnitud medida. Con estas dos definiciones, aunque tienen cierta relación, se da por cierto que no se puede confundir resolución con exactitud. El detalle de menor tamaño que se necesita evidenciar o registrar en el resultado final determina la resolución.

Un escaneo puede contener varios millones de puntos, en especial si se registraron con resoluciones altas, aumentando el tiempo de toma y el tamaño de los datos. “Lo que define el valor del giro para la medición de cada punto es la resolución configurada por el usuario. La resolución se determina por el espacio horizontal (H) y vertical (V) entre los puntos medidos en una determinada distancia (D) estandarizada (Figura 9). Por lo tanto, para definir la precisión posicional de un equipo ELT, no es suficiente saber la precisión lineal, sino también la precisión angular” (Rovane, 2012).

Figura 9. Resolución espacial (Horizontal y vertical)



Fuente: (Rovane, 2012)

Al utilizar los equipos de escáner lo primero que se debe hacer es definir los parámetros de escaneo (resolución y calidad). Estos se establecen para garantizar que los objetos de interés sean capturados de acuerdo con los resultados esperados. La resolución del escáner está definida para una cierta distancia desde él, al punto. Los parámetros de escaneo requeridos para la adquisición adecuada de objetivos pueden exceder las

necesidades de los parámetros requeridos para capturar el objeto de interés en ciertos casos, por tanto, es fundamental que los objetivos se ubiquen a distancias adecuadas relativas a su entorno (con luz solar, nublada, en interiores, etc.) y a la resolución especificada. Cuando se escanean puntos a distancias grandes generan una resolución menor, mientras que los puntos más cercanos tendrán una resolución más alta. Se pueden lograr distancias más grandes fácilmente aumentando el tamaño del objetivo o escaneando con una resolución mayor.

La resolución del escaneo, es medida en fracciones de la máxima resolución. Los parámetros de calidad influyen respectivamente en la calidad del ruido de los datos de escaneo. El ruido es el nivel de desviación de una nube de puntos respecto de una superficie real, provocado por el ángulo de inclinación, el tamaño de la huella del punto, la reflectividad, las condiciones atmosféricas, etc (Lerma y Biosca, 2008).

### 1.2.3.1 Resolución y calidad

Muestra la resolución seleccionada en megapuntos y el nivel de calidad seleccionado.

En función de la resolución seleccionada y de la configuración de calidad seleccionada, debe mantener una distancia mínima para evitar el daño a la vista si mira el haz del láser en forma directa sin utilizar gafas de protección contra radiación láser. De acuerdo con la norma europea “Seguridad de productos láser Parte 1: Clasificación y requisitos de los equipos” (IEC 60825-1: 2007), se distingue entre la distancia segura para la vista axial y radial. El área de riesgo resultante alrededor del escáner se puede describir como un cilindro a lo largo del eje de rotación Z del escáner, donde la distancia segura para vista radial equivale al radio del cilindro; y la distancia segura para la vista axial equivale a la línea central proveniente del centro del espejo del escáner, como lo muestra la Figura 10.

Figura 10. Lectura axial del escáner



Fuente: (FARO, Manual Faro Laser Escaner Focus 3D, 2010)

En lo que respecta a la seguridad de la vista, puede considerarse que la radiación láser del escáner utilizado, Focus3D proviene de una fuente láser pulsada. La distancia segura para la vista depende de la resolución del escaneo solicitado y del factor de calidad, y se muestra en el software operativo del escáner. En la Tabla 1, se enumera la frecuencia de repetición y la duración del pulso para las combinaciones disponibles de configuración de resolución y calidad.

Tabla 1. Frecuencia de repetición y duración del pulso según configuración

<i>Resolución</i>	<i>Calidad</i>	<i>Frecuencia de repetición [Hz]</i>	<i>Duración del pulso [s]</i>
1/1	1x	24	0.00067
1/1	2x	12	0.00134
1/1	3x	6	0.00267
1/1	4x	3	0.00534
1/2	1x	48	0.00033
1/2	2x	24	0.00067
1/2	3x	12	0.00134
1/2	4x	6	0.00267
1/2	6x	3	0.00534
1/4	1x	95	0.00017
1/4	2x	48	0.00033
1/4	3x	24	0.00067
1/4	4x	12	0.00134
1/4	6x	6	0.00267
1/4	8x	3	0.00534

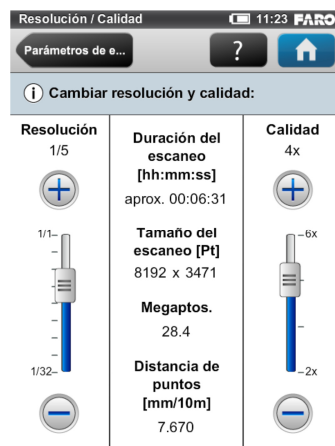
<i>Resolución</i>	<i>Calidad</i>	<i>Frecuencia de repetición [Hz]</i>	<i>Duración del pulso [s]</i>
1/5	2x	60	0.00027
1/5	3x	30	0.00053
1/5	4x	15	0.00107
1/5	6x	7.5	0.00214
1/8	2x	95	0.00017
1/8	3x	48	0.00033
1/8	4x	24	0.00067
1/8	6x	12	0.00134
1/8	8x	6	0.00267
1/10	3x	60	0.00027
1/10	4x	30	0.00053
1/10	6x	15	0.00107
1/10	8x	7.5	0.00214
1/16	3x	95	0.00017
1/16	4x	48	0.00033
1/16	6x	24	0.00067
1/16	8x	12	0.00134
1/20	4x	60	0.00027
1/20	6x	30	0.00053

1/20	8x	15	0.00107
1/32	4x	95	0.00017
1/32	6x	48	0.00033
1/32	8x	24	0.00067

Fuente: (FARO, Manual Scene LT 5.2., 2014)

Los rangos de resolución en el escáner utilizado son nueve (9) y se pueden elegir entre 1/1, 1/2, 1/4, 1/5, 1/8, 1/10, 1/16, 1/20 y 1/32. La variación modifica la duración del escaneo, su tamaño en puntos y el valor de megapuntos va ligado a los valores de calidad que son cuatro (4) rangos y van desde -6x hasta -2x, que es el menor. La figura 11 muestra los elementos de resolución y calidad.

Figura 11. Pantalla del escáner según parámetros de resolución y calidad



Fuente: (FARO, Manual Scene LT 5.2., 2014)

Calidad: Afecta la calidad del escaneo y el tiempo del escaneo con resoluciones de escaneo constantes. Permite equilibrar las necesidades de calidad y velocidad mediante el deslizador. Al colocar el deslizador hacia arriba, se reduce el ruido de los datos de escaneo y, de este modo, aumentará la calidad del escaneo, lo que provocará un mayor tiempo de escaneo. Al mover el deslizador hacia abajo, reducirá el tiempo de escaneo y aumentará la eficacia del proyecto de escaneo. El deslizador de calidad establece los niveles de calidad, ya sea por medio de diversas frecuencias de medición, o mediante la aplicación de compresión de ruido adicional. El escaneo contiene varios millones de puntos de escaneo, y cargar escaneos en la memoria de la computadora implica importantes requisitos de memoria, en especial si los escaneos se registraron con resoluciones altas (Scene LT 5.2, 2014).

Antes de iniciar el proceso de escaneo es necesario establecer la activación y configuración de varios sensores que posee el equipo.

Clinómetro: La mayoría de escáner utiliza un clinómetro que activa o desactiva el uso automático de la medición de la inclinación del compensador de eje doble incorporado

para el registro de escaneos. Los datos de este sensor siempre se miden y se adjuntan a cada escaneo. Para obtener los datos más confiables del compensador de eje doble, hay que asegurarse que la inclinación del escáner sea inferior a 5°.

Brújula: Del mismo modo que con el clinómetro, los datos de la brújula siempre se miden y se adjuntan a cada escaneo durante el escaneo y se utilizarán en forma automática para el registro de escaneos.

Altímetro: Como en el clinómetro, los datos del altímetro siempre se miden y se adjuntan a cada escaneo durante el escaneo y se utilizarán en forma automática para el registro de escaneos. Se puede ingresar una altura de referencia antes de comenzar su proyecto de escaneo. Esta altura de referencia luego será la base de todas las mediciones que se realicen con el altímetro.

### 1.3 Especificaciones Técnicas Mínimas para Trabajos Cartográficos

En esta investigación se trabajaron escalas grandes de mapas 1:50 a 1:5000, ya que el modelo digital que se generó está orientado para su uso en trabajos de topografía en ingeniería civil.

A la vez se utilizan dos términos de los cuales es importante ser consistentes y distinguir su terminología, estos son "exactitud" y "precisión". La exactitud es el grado en que la información en un mapa o en una base de datos digital coincide con los valores verdaderos o aceptados. Exactitud es una cuestión relativa a la calidad de los datos y el número de errores contenidos en un conjunto de datos o un mapa. En la discusión de una base de datos GIS, es posible considerar la exactitud horizontal y vertical con respecto a la posición geográfica, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS, 2005).

Para estimar la exactitud posicional el National Standard for Spatial Data Accuracy (NSSDA ) utiliza la raíz cuadrada de la media de error (RMSE). La ASPRS indica que la RMSE es la raíz cuadrada de la media del conjunto de diferencias al cuadrado entre el conjunto de datos de valores de coordenadas y valores de coordenadas de una fuente independiente de mayor exactitud de los puntos idénticos.

La Exactitud es reportada en las distancias del terreno al nivel de confianza del 95%. Esto significa que el 95% de las posiciones en el conjunto de datos tendrá un error con respecto a la posición verdadera razón de que es igual o menor que el valor de exactitud informada. Entonces, la exactitud denota una absoluta aproximación de las cantidades medidas a sus verdaderos valores (Wolf, 2008).

La precisión se refiere al nivel de medición y la certitud de la descripción en un conjunto de datos. Datos de localización precisos pueden medir la posición de una fracción de una unidad. Información de atributos precisa puede especificar las características de características con gran detalle. Es importante tener en cuenta, sin embargo, que los datos precisos, no importa cuán cuidadosamente medido, puede ser inexacta (ASPRS; 2005). Al recoger los datos el personal puede cometer errores o los datos podrán ser incorporados a la base de datos de forma incorrecta.

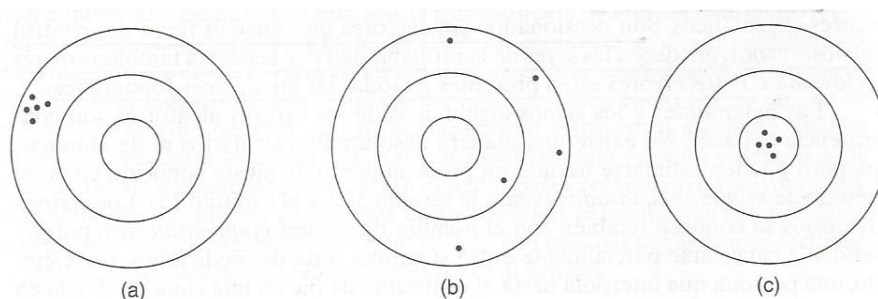
Cada aplicación de trabajos geográficos o ingenieriles requiere un nivel de precisión variable particular a cada estudio. Cuando se requieren datos altamente precisos son muy difíciles y costosos de recoger manualmente.



Alta precisión no indica elevada exactitud ni la alta exactitud implica una alta precisión, un levantamiento topográfico de un terreno puede ser preciso sin ser exacto. Una discrepancia es la diferencia entre dos valores medidos de la misma cantidad. Una discrepancia pequeña indica que probablemente no hay equivocaciones y que los errores aleatorios son pequeños (Wolf, 2008).

La diferencia entre exactitud y precisión se ilustra mejor en relación con el ejemplo del tiro al blanco. En la figura 12 se muestra (a) los resultados de los cinco tiros son precisos pero no exactos, (b) Los resultados no son ni precisos ni exactos, (c) Los resultados son tanto precisos como exactos.

Figura 12. Ejemplos de Precisión y Exactitud



Fuente: Wolf, 2008

Los estándares para la exactitud de los mapas, está unido a la presentación de la escala final tanto en la escala horizontal como en la vertical o relieve (intervalo de curvas de nivel o modelo digital de terreno). La exactitud de los planos se ha definido por la exactitud de la posición espacial de una característica gráfica representada sobre él y su posición “verdadera” en el terreno. La exactitud estándar de un mapa se cumple cuando estadísticamente presenta un cierto nivel de precisión. Para la mayoría de proyectos de ingeniería, la exactitud deseada se indica sobre la base de la escala de desarrollo final del mapa o plano, (escala horizontal), y por el relieve o escala vertical (especificando el intervalo de las curvas de nivel, o el modelo digital de elevación).

Aunque para trabajos con escáner laser no se ha generado una norma técnica específica sobre levantamientos y generación de modelos digitales de terreno las normas siguientes pueden regular los trabajos realizados con estos equipos. La primera es la resolución

número 64 de 1994 del IGAC y la segunda del American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, ASPRS.

### **1.3.1 Resolución número 64 de 1994 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi**

Por la cual se establecen las especificaciones técnicas mínimas que deben cumplir las personas naturales o jurídicas para realizar trabajos fotogramétricos y cartográficos en el territorio nacional.

Normas de precisión final: Los procesos y los instrumentos utilizados para la restitución fotogramétrica deben ser tales que los mapas finales cumplan con las normas mínimas que se dan a continuación.

Precisión Planimétrica: El 90 % de los puntos extraídos del mapa, con excepción de aquellos que necesariamente son desplazados por la exageración de la simbología, deben estar localizados dentro de 0.5 mm. a escala de plano de sus posiciones verdaderas. El error medio cuadrático correspondiente es de 0.30 mm a la escala del mapa.

Precisión Altimétrica: El 90 % de las curvas de nivel y de las elevaciones interpoladas a partir de dichas curvas de nivel deben estar dentro del  $\frac{1}{2}$  intervalo básico. Si "c" es este intervalo, el error medio cuadrático es de 0.3 c. Normalmente, se adopta que el intervalo básico es de  $1\text{mm} * Em$  (siendo Em el módulo de escala), en cuyo caso el valor de la precisión altimétrica para el 90 % indicado es de  $0.5\text{mm} * Em$ . El error medio cuadrático correspondiente es de  $0.30\text{mm} * Em$ . No hay restricción para fijar intervalos de curvas menores, siempre y cuando la norma de precisión se cumpla.

Por ejemplo, un mapa urbano a escala 1:2000 con curvas de nivel cada 2m, tendrá una exactitud planimétrica y altimétrica de 1 metro, para el 90% de los puntos.

Las precisiones indicadas se refieren al producto final. Cada una de las etapas intermedias del proceso debe a su vez tener precisión suficiente de tal forma que la suma cuadrática de todas ellas sea igual o menor a la precisión final (IGAC, 1994).

### 1.3.2 La American Society for Photogrammetry and Remote Sensing ASPRS.

Esta organización recomienda las "Normas de exactitud de los mapas de escalas grandes", para la información topográfica producto de técnicas de radiación con teodolitos, estaciones totales, GPS/GNSS cinemático, escáner láser, fotogrametría, o barrido de puntos con sensores remotos ubicados en plataformas espaciales, aéreas, o terrestres, y que son publicadas por la Federal Geographic Data Committee, FGDC. La norma es aplicable a proyectos que aplican topografía a escalas grandes de ingeniería. La ASPRS, da los criterios de exactitud horizontal y vertical para estos trabajos. Muchas entidades en Colombia como Ingeominas siguen las recomendaciones de la ASPRS.

‘El estándar planimétrico (ASPRS, 1990), compara el error medio cuadrático (RMSE) del promedio de las diferencias al cuadrado o las diferencias en los valores de las coordenadas entre el mapa y un levantamiento topográfico, de alta exactitud, independiente. El error medio cuadrático es definido en términos de metros a la escala terrestre y en milímetros a la escala del mapa original. El resultado es una relación lineal entre RMSE y la escala del mapa; a medida que la escala del mapa crece, el RMSE se incrementa linealmente. El RMSE es el resultado acumulativo de todos los errores, incluyendo aquellos producidos por el levantamiento de puntos de control, recopilación de mapas, y la extracción de dimensiones terrestres usando el mapa estudio. La Tabla 2 presenta las precisiones en metros para las diferentes clases de mapas, donde las clases indican la exactitud horizontal planimétrica con que se desea trabajar, dependiendo de la escala. Por ejemplo, en la digitalización de un mapa original a escala 1:10000 se espera un error medio cuadrático de 5 metros en la clase 2, que equivale a una exactitud de 0.5 mm de la escala del mapa’ (Ingeominas, 1999).

Tabla 2. Requisitos ASPRS de exactitud topográfica en planimetría

<i>Escala del Mapa Original</i>	<i>RMSE (m)</i>		
	<i>CLASE 1</i>	<i>CLASE 2</i>	<i>CLASE 3</i>
<b>RADIO, m/m</b>			
<b>1:50</b>	0.0125	0.025	0.038
<b>1:100</b>	0.025	0.05	0.075
<b>1:200</b>	0.050	0.10	0.15
<b>1:500</b>	0.125	0.25	0.375
<b>1:1,000</b>	0.25	0.50	0.75
<b>1:2,000</b>	0.5	1.00	1.5
<b>1:2,500</b>	0.63	1.25	1.9
<b>1:4,000</b>	1.0	2.0	3.0
<b>1:5,000</b>	1.25	2.5	3.75

Fuente: (Ingeominas, 1999 resumen de ASPRS, 1990)

La exactitud vertical, ha sido tradicionalmente definida con relación al intervalo de las curvas de nivel requeridos por un mapa. En los casos que se generan Modelos Digitales de Terreno, un intervalo de curva equivalente se puede especificar basándose en la exactitud digital de elevación requerida del punto analizado. 'El estandar vertical ASPRS usa también la estadística RMSE, pero sólo para elementos que se encuentran bien definidos entre contornos que contienen elevaciones interpretativas o puntos de elevación. La prueba para el cumplimiento vertical del mapa, también es ejecutada por métodos de inspección de exactitud terrestre independientes, georreferenciados a la red altimétrica establecida por el IGAC, donde existen tres niveles, para referenciar la exactitud altimétrica donde el de primer orden es el de mayor exactitud (nivelación geodesica)' (Ingeominas, 1999). La Tabla 3 presenta los valores de intervalos y las clases.

Tabla 3. Exactitud topográfica en elevación ASPRS

<i>Intervalo de Contorno Original</i>	<i>Clase 1</i>	<i>Clase 2</i>	<i>Clase 3</i>
<b>1</b>	0,33	0,67	1
<b>2</b>	0,67	1,33	2
<b>4</b>	1,33	1,67	4
<b>5</b>	1,67	3,33	5
<b>10</b>	3,33	6,67	10
<b>25</b>	8,16	16,58	25,00
<b>50</b>	16,27	33,14	50,00
<b>100</b>	32,48	66,24	100,00

Fuente: Ingeominas, 1999 resumen de ASPRS, 1990.

Las normas ASPRS, 2014 Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data estan más referidas a datos Lidar tomados desde una aeronave. Y ASPRS, 2005 Lidar Guidelines horizontal accuracy reporting con la norma ASPRS, 2004 vertical accuracy reporting mantinene los mismos parámetros para mapas a escala grande mostrados en la nomra ASPRS 1990.

### **1.3.3 La Norma NTC 5205 y NTC 5043**

La norma NTC 5205 de precisión (exactitud) de datos espaciales (PDE), tiene aplicación en los mapas totalmente georreferenciados y los datos digitales geoespaciales puntuales, en formato vector o raster, obtenidos de fuentes como las fotografías aéreas, imágenes de satélite y levantamientos terrestres. Describe la manera como se debe expresar la utilidad de un dato o un conjunto de datos e incluye los estándares de calidad,

estimación, de exactitud y de documentación de los datos.

Para estimar la precisión espacial, el PDE utiliza el error raíz media cuadrática (RMSE): éste consiste en la raíz cuadrada del promedio de las diferencias al cuadrado entre los valores de las coordenadas de los datos y los valores de las coordenadas provenientes de una fuente independiente de mayor precisión (exactitud) para puntos idénticos. (NTC 5205, 2003).

La norma técnica colombiana NTC 5043 tiene como objeto proporcionar “los conceptos básicos para describir la calidad de los datos geográficos disponibles en formato digital y análogo; presenta un modelo conceptual que facilita el manejo de la información sobre la calidad de dichos datos geográficos (NTC 5043, 2010). El valor de los datos es directamente proporcional a su calidad. Los datos geográficos se pueden compartir, intercambiar y usar para propósitos diversos, muchas veces más allá de la intención inicial de quien los produce. Algunas aplicaciones requieren gran exactitud mientras que otras no, el usuario determina la aptitud del producto para ser usado.

#### Exactitud de posición

Los componentes de la descripción de la calidad pueden aplicarse a un conjunto de datos que puedan ser medidos cuantitativamente. Uno de los componentes para describir la calidad de un conjunto de datos son los elementos y subelementos de la calidad. “El propósito de estos elementos es identificar las inconsistencias de un conjunto de datos con respecto a sus especificaciones técnicas del producto” (NTC 5043, 2010). Uno de los elementos que se usan para describir los aspectos cuantitativos de la calidad es el de exactitud de posición. Este describe la cercanía en posición de los objetos en el conjunto de datos, respecto a sus posiciones verdaderas (o las asumidas como verdaderas). Esta exactitud debe ser definida en términos de los componentes horizontal y vertical. El componente horizontal se refiere a los valores de las coordenadas X y Y, mientras que el componente vertical hace referencia a las coordenadas Z, según el sistema de referencia. (NTC 5043, 2010). Este elemento que es aplicable a las posiciones verticales y horizontales se subdivide en subelementos que se deben usar para describir la calidad de un conjunto de datos y que son exactitud absoluta o externa y exactitud relativa o interna. “Los objetos se pueden ubicar, o georreferenciar; es decir, determinar su posición respecto a un sistema de referencia previamente asumido. Para cartografía a escala grande se utilizan proyecciones cartesianas locales (Niño, 2010)

- Exactitud absoluta o externa.

Es la exactitud con respecto a su posición del conjunto de objetos del modelo o mapa respecto a su posición real en el terreno. Se toma como la diferencia que existe entre las coordenadas que tienen los objetos digitales con las que tienen en el terreno. La Norma define como la “cercanía de los valores de coordenadas informados respecto a los valores verdaderos o considerados como verdaderos en un sistema de referencia. Se refiere a la exactitud de la posición de un elemento o conjunto de elementos respecto a un sistema de referencia externo. Posición respecto a su entorno, su vecindad” (NTC 5043, 2010).

- Exactitud relativa o interna.

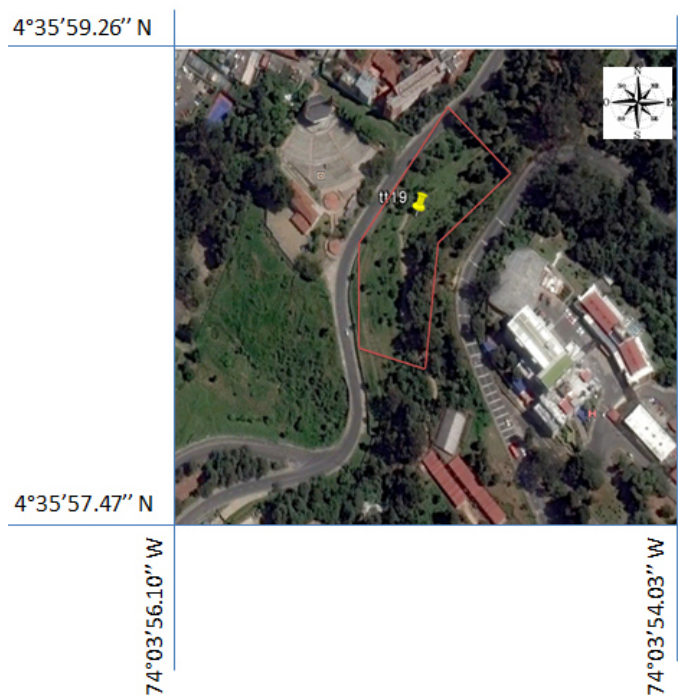
Con esta exactitud se pretende determinar la consistencia interna del modelo o mapa. Si se toma una medida de distancia X en el modelo o mapa, sea el mismo o uno muy cercano de su correspondiente distancia en el terreno. La Norma define como “cercanía de las posiciones relativas de los objetos en un conjunto de datos, respecto a las posiciones relativas aceptadas como verdaderas. La posición relativa o interna se refiere a la posición de un elemento o conjunto de elementos respecto a la posición de los demás elementos de este conjunto” (NTC 5043, 2010).

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Área de estudio y características

El área de estudio está ubicada en la Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales de la Universidad Distrital en Bogotá y fueron utilizadas dos zonas para cumplir los objetivos. La primera localizada en el lote A cerca al edificio natura y a la cancha deportiva, sobre una zona dura para determinar las resoluciones del escáner laser terrestre para la confiabilidad de los datos, se desarrolló en el sitio con las coordenadas  $4^{\circ}35'48.7''\text{N}$ ,  $74^{\circ}03'51.9''\text{W}$ , en el andén de 25 m de largo 2 m de ancho. La segunda comprende el terreno ubicado en el lote B donde se escaneó el terreno vegetal, para desarrollar el proceso del modelo digital del terreno, comprendido entre las coordenadas  $4^{\circ}35'57.47''$  y  $4^{\circ}35'59.26''$  Lat. N;  $74^{\circ}03'54.03''$  y  $74^{\circ}03'56.10''$  Long. W., con una pendiente aproximada del 35% y elevación promedio de 2686 msnm. Se selecciona un corredor de aproximadamente 200 m de largo por 40 m de ancho. En esta zona, (figura 13) se presenta un paso peatonal, escalera en zona dura para los estudiantes y personas que acceden a la Universidad, capa vegetal y algunos árboles.

Figura 13. Área de estudio escaneada en la Universidad Distrital, Bogotá.



Fuente: Google Earth, de 3/14/2015.

## 2.2 Equipos y software

Los equipos que se emplearon son propiedad de la Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales de la Universidad Distrital, como: Estación Total Pentax 425 Precisión (ISO17123-3) a los 5", Nivel de precisión Topcon, Software Scene, Software Global Mapper y Autocad.

**Escáner laser terrestre:** Se utilizó el escáner de la firma comercial Faro Laser Escáner Focus 3D (Figura 14), es un dispositivo de medición precisa que produce imágenes foto realistas tridimensionales (Manual Faro, 2010).

Figura 14. Escáner laser terrestre Faro 3D



Las principales características del escáner laser terrestre utilizado son: hipermodulación, alta precisión, alta resolución, alta velocidad, control intuitivo a través de la pantalla táctil incorporada, gran movilidad gracias a su tamaño reducido, peso liviano, batería de carga rápida integrada, cámara color integrada para registrar escaneos con color. El Focus 3D funciona por medio del envío de un haz de láser infrarrojo hacia el centro de un espejo giratorio. El espejo desvía el láser en rotación vertical alrededor del entorno que se escanea, y luego la luz dispersada de los objetos circundantes se refleja en el escáner. Precisión de distancias hasta +- 3mm, alcance de 0.6 m a 130 m, reducción de ruido 50%, Velocidad de medición: hasta 976,000 puntos/segundo, Cámara a color integrada hasta 70 megapíxeles, Multi-Sensor con GPS, Brújula, Altimetro, Compensador de eje dual.

Para medir la distancia, el Focus 3D utiliza la tecnología de desfasaje. Esto significa que el haz del láser es modulado mediante ondas constantes de diferente longitud. La distancia del escáner al objeto se determina con exactitud al medir los desfasajes en las ondas de luz infrarroja. La hipermodulación mejora en gran medida la relación señal-ruido de la señal modulada con la ayuda de una tecnología especial de modulación.



Las coordenadas X, Y y Z de cada punto se calculan utilizando codificadores de ángulos para medir la rotación del espejo y la rotación horizontal del Focus3D (Manual Faro, 2010).

**Software Scene 5.5.** SCENE está especialmente diseñado para el FARO Focus<sup>3D</sup>. SCENE procesa y administra datos de escaneo de forma sencilla y eficiente, empleando el reconocimiento automático de objetos, registro de escaneos y posicionamiento (Manual Faro, 2015).

Una vez que SCENE ha preparado los datos de escaneo, puede comenzar inmediatamente el análisis y el procesamiento. Además, tiene a su disposición una completa gama de funciones de fácil uso, desde sencillas mediciones y visualizaciones 3D hasta la unión de escenas y la exportación en diversos formatos CAD y de nube de puntos. Ahora los proyectos de escaneo pueden publicarse en un servidor web pulsando un botón. El nuevo WebShare permite compartir los proyectos de escaneado en Internet.

Este software fue utilizado para la visualización de la nube de puntos, georreferenciación de los puntos de amarre y unión de las escenas tomadas en las diferentes posiciones. Se realizó un pre filtrado de los puntos que se encontraban sobre la superficie del terreno y se tomaron las coordenadas de los puntos y se midió tomando las distancias, horizontales, verticales e inclinadas entre ellos.

**Software Cloud compare.** Es una herramienta de uso libre, referencia 2.6.2, diseñado para comparar y realizar estudios sobre nubes de puntos. Ha sido propuesto para llevar a cabo la comparación entre dos nubes de puntos 3D, tales como las obtenidas con un escáner laser o entre una nube de puntos y una malla triangular. Uno de los objetivos principales de estas comparaciones es realizar estimaciones sobre las diferencias entre dos mediciones de un mismo objeto o grupo de objetos, de esta forma es posible determinar por ejemplo deformaciones, etc.

Los principales formatos que recibe son: BIN Cloud Compare formato binario propio, ASCII (un punto por x,y,z), PLY nube o malla, OBJ, VTK, LAS, E57, SHP, PTX; FLS, FWS.

Por la fácil manipulación de la nube de puntos se realizó el filtrado de los puntos que estaban por encima de la superficie del terreno borrando árboles, personas y mobiliario urbano.

**Software Global Mapper.** Combina una gama completa de herramientas de tratamiento de datos espaciales con acceso a una variedad de formatos de datos como E57, lidar point cloud format, lidar las, pts, etc.. Desarrollado tanto para profesionales SIG como para iniciados, este software versátil es también idóneo como herramienta independiente de gestión de datos SIG, o como complemento a un SIG existente.

Global Mapper incluye la posibilidad de acceder directamente a varias fuentes en línea de imágenes, mapas topográficos, y los datos DEM/DSM. Esto incluye el acceso a las imágenes de color de alta resolución de DigitalGlobe para el mundo entero (con marca de agua para su uso gratuito), mapas detallados de calles de OpenStreetMap.org, y el acceso a la base de datos completa de TerraServer-USA/MSRMaps.com imágenes de satélite y mapas topográficos de la USGS libre de-cargo. Global Mapper también tiene la capacidad de acceder fácilmente a fuentes de datos WMS, que incorpora en el acceso a los datos de elevación e imágenes de color para el mundo entero, y para ver la elevación y datos vectoriales en 3D real, con la superposición de cualquier dato cargado sobre ellas. Con datos importados de elevación puede generar vistas perspectivas en 3D, sombreados personalizados, análisis de cuencas, cuencas visuales y línea de vista, además de la generación de curvas de nivel personalizadas.

La triangulación de Voronoi (o polígonos de Thiessen) es una de las herramientas más empleadas por los GIS para crear de una forma racional áreas a partir de una determinada nube de puntos. Se suelen emplear en la distribución de recursos, ya que con este método se establecen correctamente regiones formadas por los lugares más próximos a cada uno de los puntos. Con este software se generó el modelo digital del terreno, perfiles y las curvas de nivel.

**AutoCad Civil 3D** es una herramienta específica para diseño gráfico de vías, carreteras, cálculo, perfiles, movimiento de tierras, cálculo topográfico, replanteo de información, etc. Está diseñado para que todos los componentes del diseño estén relacionados, los objetos al ser modificados automáticamente regeneran el diseño y recalculan la información en tablas y perfiles.

## **2.3 Metodología**

La metodología está dividida en cuatro fases que incluyen: Definir el área de estudio, luego establecer cuál es la mejor resolución que se debe configurar en el equipo para realizar el escaneo y así mismo establecer las distancias de las esferas y targets, y determinar cuál es la posición del escáner. Paso siguiente es determinar la exactitud absoluta y relativa de los datos digitales. A continuación se documenta el método propuesto para la generación del modelo. Después se aplican los datos del modelo, coordenadas y curvas de nivel generadas en el diseño de un tramo de vía. Se realiza un análisis de resultados y se generan unas conclusiones. El diagrama de flujo, figura 15, muestra la secuencia del trabajo.

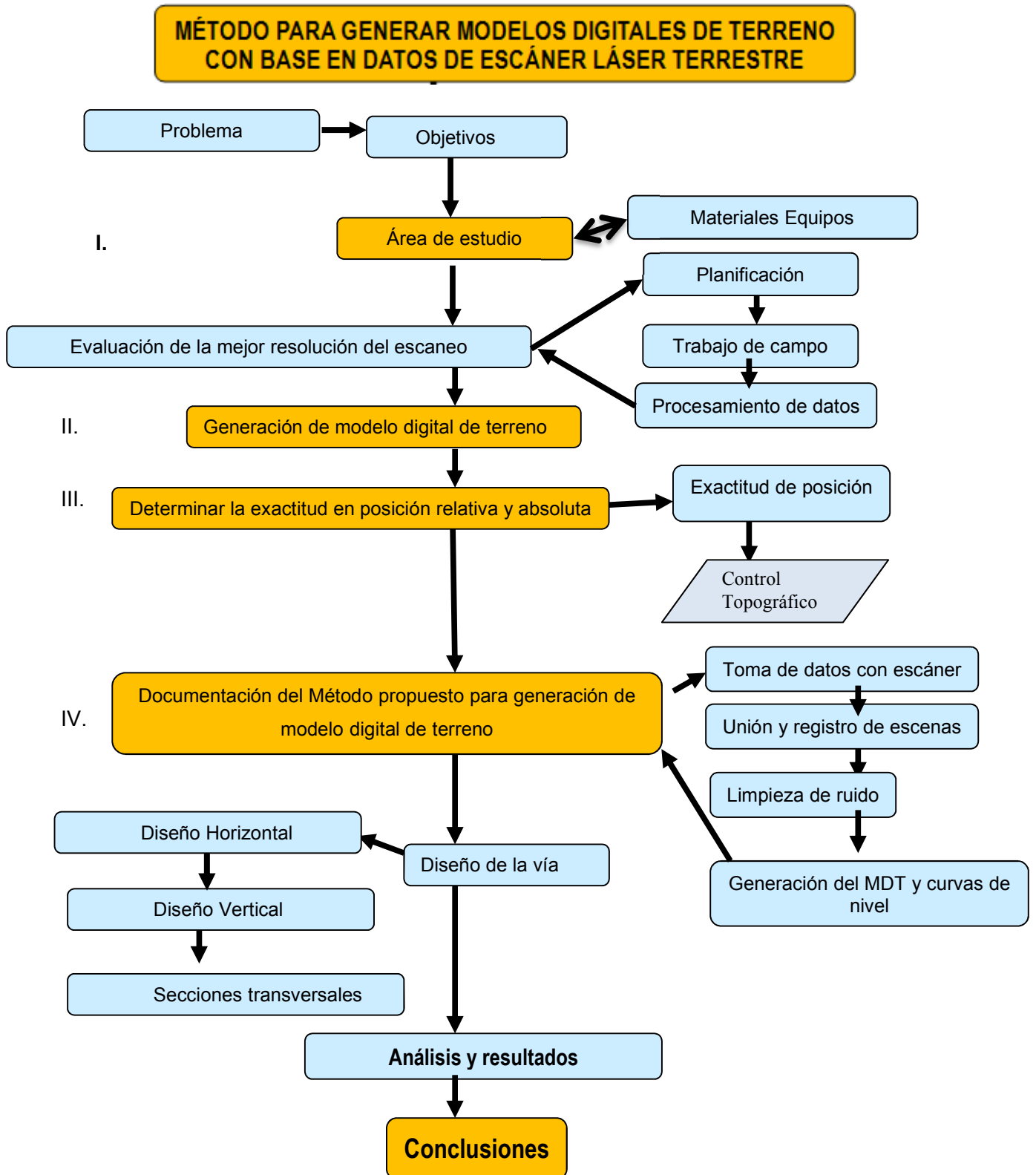
### **2.3.1. Evaluación de la resolución del escaneo - Planificación**

Con el fin de determinar cuál es la resolución que al medir puntos a cierta distancia horizontal pueda permitir cambios de posición del escáner láser terrestre, para la confiabilidad de los datos según los estándares de exactitud en mapas de escalas grandes.

El propósito de la planificación es poder plantear un diseño de unos ejes que se puedan plasmar en el terreno a cierta distancia, para luego ser medidos con el escáner láser terrestre tomando sus distancias en diferentes resoluciones. Esta planificación plantea encontrar un terreno que desde una sola posición el equipo pueda tomar información de todos los ejes. La metodología planteada para desarrollar este objetivo, fue colocar y georreferenciar varios puntos en el terreno con procedimientos de topografía de precisión del cual se obtengan datos de coordenadas X, Y y Z, desde dos placas topográficas. A continuación, utilizando un nivel de precisión y con el dato de una placa con cota o altura conocida, dar los valores de cotas de cada uno de los puntos. Luego se procede a colocar el escáner láser terrestre en una posición desde donde se observen todos los puntos materializados, y se comienza la toma de datos desde el mismo punto con tres (3) diferentes resoluciones, alta de 1/1, media de 1/8 y baja de 1/20.

Primero se preparó un diseño para realizar pruebas en terreno montañoso, en donde se establecieron dos bases con longitudes y colocaron varias estacas por el método de intersección de visuales con dos equipos de topografía con lectura al segundo y precisión a los 5 segundos. Se descarta este proceso al notarse que las estacas no son visibles

Figura 15. Diagrama de la investigación



desde el punto donde se desea colocar el escáner para la toma de datos, lo cual conllevaría a realizar cambios de la posición del equipo y lo que se plantea es que desde un mismo punto se puedan tomar todos los datos, que fueron colocados por procedimiento topográfico, para realizar sobre ellos toma de información en diferentes resoluciones. En la Figura 16 se muestra el primer terreno, que fue descartado por falta de visual.

Figura 16. Terreno montañoso donde se realizó la prueba 1



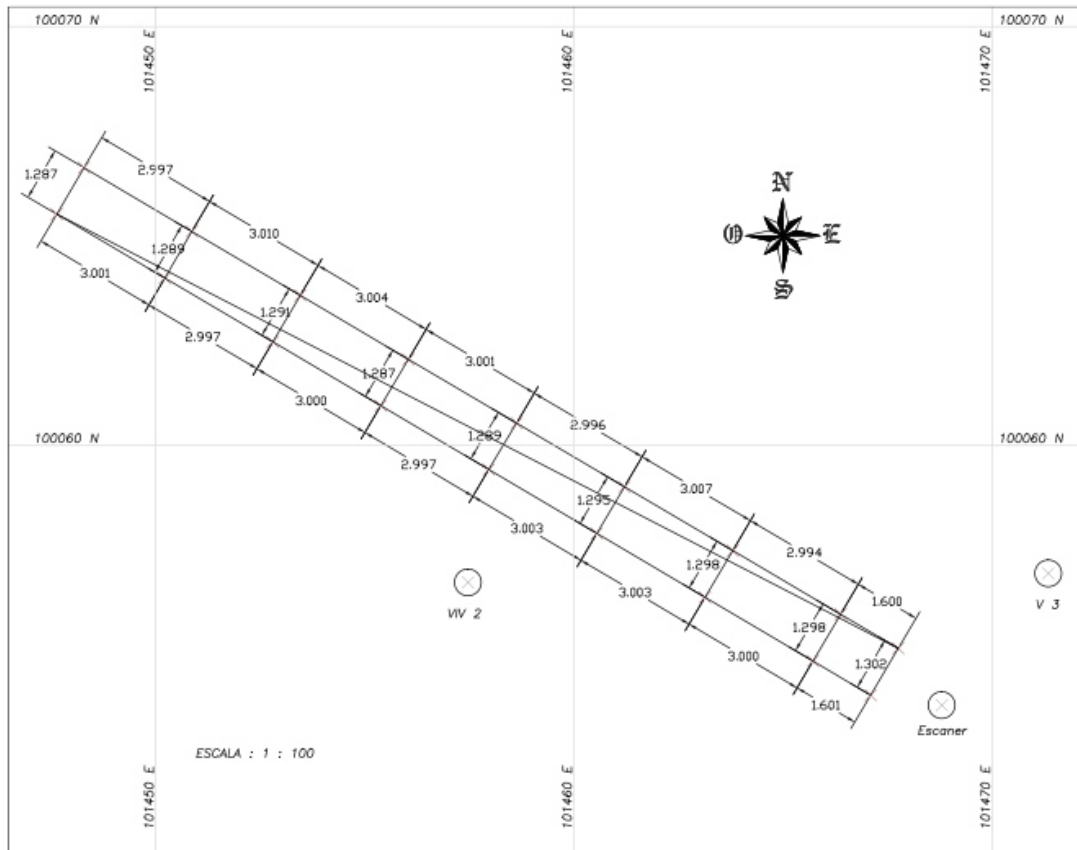
Se decide cambiar a un terreno inclinado donde se puedan observar todos los puntos de la malla. Además se selecciona una zona dura (Figura 17), dentro de la Universidad Distrital, cuyas coordenadas de localización se expusieron anteriormente, desde donde se puedan colocar firmemente los puntos para la posterior toma de datos con el escáner.

Figura 17. Vista general y detalle de la zona de localización de la malla



Se diseña una cuadrícula con una longitud cercana a los 20 m, que es el alcance mayor que se puede configurar en el equipo de marca Faro para lectura en exteriores. Esta cuadrícula está en el primer tramo separada 1.60 m y desde allí cada 3 m, sobre dos ejes separados 1.30 m, como lo indica la Figura 18.

Figura 18. Diseño y separación de la cuadrícula



### 2.3.2 Trabajo de Campo

En esta etapa se buscaba poder materializar puntos sobre dos ejes en el terreno a cierta distancia, para luego comparar y medir con topografía de precisión, y sobre la nube de puntos que el escáner tomó desde una posición estática en diferentes resoluciones. Con la Estación Total, ángulos y distancias del diseño, estos puntos se materializan en la zona dura del estudio, el primer eje es numerado como T1 hasta el T9 y el segundo eje desde el T10 hasta el T18. Es un área que presenta una pequeña pendiente, y es un corredor en donde se puede trabajar con seguridad, buena visibilidad, con características de poder

materializar los puntos sin que sean movidos, como lo muestra la Figura 19, en las dos direcciones, cercanos a dos placas topográficas VI, V2 y V3.

Figura 19. Zona dura en donde son materializados los ejes T1 a T18



Este diseño es materializado con una Estación Total de marca Pentax con lectura al segundo y precisión de 7 segundos. Se materializa la base con dos puntillas de acero sobre la zona dura, con una separación de 3 m. Centrado y nivelado el equipo sobre la puntilla número uno se hace  $0^{\circ}0'0''$  sobre la puntilla dos y se marca el primer eje con las distancias de diseño establecido. Luego se cambia el equipo al segundo eje y se traza haciendo  $0^{\circ}00'00''$  al eje 1 y girando  $90^{\circ}$  para trazarla paralela al primero con sus respectivas distancias. Se realizan procedimientos de control, realizando varias lecturas desde la estación y nivelando muy bien el bastón del prisma por medio de una base nivelante (Figura 20), y controlada su perpendicularidad con plomada y flexómetro.

Figura 20. Base nivelante y control de perpendicularidad del prisma



El eje es controlado con la Estación Total manteniendo el ángulo recto y con ayuda de dos cadeneros, que son guiados por la visual y distancia dada el láser al prisma colocan el punto al milímetro. Se aconseja colocar un nylon alineado sobre los ejes e ir

supervisando las distancias electrónicas con cinta métrica metálica. En la Figura 21 se observan detalles de la materialización de los puntos

Figura 21. Materialización de puntos y control de la línea eje



Localizados los 18 puntos sobre los dos ejes, se colocaron cuidadosamente con escuadra, los targets, objetivos de tablero cuadrículado de 7.4x4.4 cm, que fueron diseñados para el proyecto, sobre cada uno de ellos para poder ser visualizados mejor con las diferentes escaneadas a diferentes resoluciones que se toman. La Figura 22, muestra los targets sobre los dos ejes y la posición del escáner para la toma de información.

Figura 22. Los dos ejes con los targets colocados con respecto al escáner



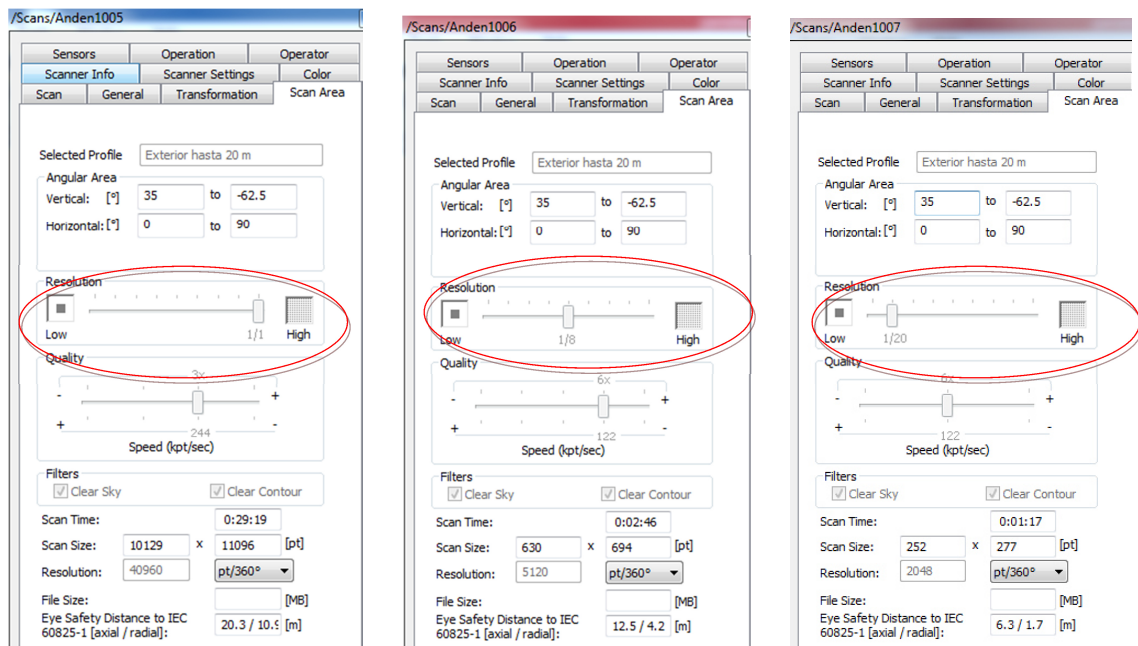
Se arma el escáner sobre un punto al que se le darán coordenadas y desde donde se puedan escanear todos los targets. Se mide la altura del equipo, de los targets con



respecto del nivel del suelo y se realiza una configuración en resolución baja, para hacer una prueba y poder determinar los ángulos horizontales y verticales. Así se evita tomar mucha información que no es relevante para el proyecto, ya que solo se necesita el corredor en donde están los target sobre los puntos. Esto evita manejar archivos muy pesados en el software Scene y se disminuye el tiempo de toma. Para el ejercicio se toma una resolución de 1/16 y calidad 4x.

Definido el ángulo horizontal y vertical, se toman los datos con el escáner laser terrestre del corredor y los puntos en las resoluciones de 1/1 la más alta, 1/8 media y 1/20 la más baja. La figura 23, muestra los detalles de las tres resoluciones que se tomaron en campo en donde se regula el ángulo, la resolución, la calidad, etc.

Figura 23. Detalles de la configuración de las tres resoluciones 1/1, 1/8 y 1/20



En la toma de datos con las diferentes resoluciones el tiempo utilizado por cada uno de ellos, y limitados en los ángulos horizontales y verticales, se observa que el de mayor resolución dura 29.19 minutos y el de menor resolución 1. 17 minutos. Los tamaños de escaneo de los puntos de cada uno de ellos es también muy diferente, desde 10129x11096 en resolución 1/1 a 252x277 en resolución 1/20, como lo muestra el resumen en la Tabla 4.

Tabla 4 Configuración de las características de los escaneos

Nombre Archivo	Resolución	Calidad	Tamaño Escaneo (Puntos)	Angulo Vertical	Angulo Horizontal	Tiempo Minutos	Fecha
Anden1005	1/1 40960	3x	10129x11096	35° a -62°.5	0° a 90°	29.19	28.02.2015
Anden1006	1/8 5120	6x	630x694	35° a -62°.5	0° a 90°	2.46	28.02.2015
Anden1007	1/20 2048	6x	252x277	35° a -62°.5	0° a 90°	1.17	28.02.2015

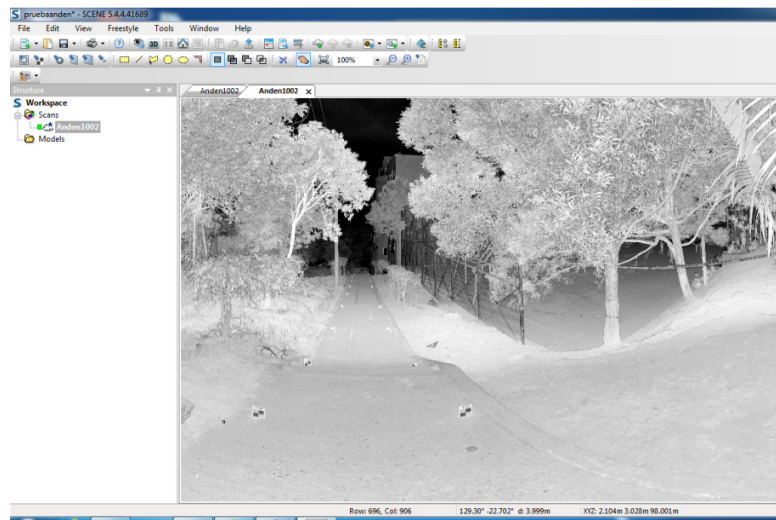
Por seguridad del equipo, del trabajo y de las personas que están cerca del sitio con respecto a la seguridad de la vista por el láser generado, se aísla el lugar con cinta de seguridad (Figura 24).

Figura 24. Cinta de seguridad y escáner



En el software Scene del escáner láser terrestre, se observa la zona escaneada y los dos ejes con la nube de puntos de la configuración programada, para revisar en campo los detalles de la toma de datos, Figura 25.

Figura 25 Nube de puntos tomados con escáner láser terrestre y targets



El proceso topográfico de campo se concluye con la determinación de la altura de los puntos realizada con nivel electrónico para la determinación de las cotas, valor de Z y con estación total para las coordenadas X y Y (Figura 26).

Figura 26. Detalle de nivelación con nivel electrónico



Siempre se fue controlando la constante del prisma con diferentes medidas y cintas métricas y con la base nivelante o bípode para su proyección ortogonal al punto a medir. La visual del ángulo fue tomado directamente al punto y al hilo de la plomada. Armado y centrado el equipo topográfico sobre la placa VIV 2 (Figura 27) se hizo el amarre a la placa V3, y por el método de radiación se leyeron con la Estación Total, azimuth y distancia a los puntos de los dos ejes para su posterior cálculo de coordenadas.

Figura 27. Toma de azimut y distancia de los puntos sobre los ejes



### 2.3.3 Análisis estadísticos

Para el cálculo de la mejor resolución se trabajó estadísticamente con los conceptos y formulas siguientes:

El comportamiento de una variable,  $Y$ , se puede explicar a través de una variable  $X$ ; lo que se representa mediante (Ezequiel, 1985):

$$Y = f(X) \quad Y_t = \beta_1 + \beta_2 X_t + u_t \quad (2)$$

Si se considera que la relación  $f$ , que liga  $Y$  con  $X$ , es lineal, entonces se puede escribir así:

$$Y = \beta_1 + \beta_2 X_t \quad (3)$$

Como quiera que las relaciones del tipo anterior raramente son exactas, sino que más bien son aproximaciones en las que se han omitido muchas variables de importancia secundaria, se debe incluir un término de perturbación aleatoria,  $u_t$ , que refleja todos los factores, distintos de  $X$ , que influyen sobre la variable endógena, pero que ninguno de ellos es relevante individualmente. Con ello, la relación quedaría de la siguiente forma:

$$Y_t = \beta_1 + \beta_2 X_t + u_t \quad (4)$$

La expresión anterior refleja una relación lineal, y en ella sólo figura una única variable explicativa, recibiendo el nombre de relación lineal simple. El calificativo de simple se debe a que solamente hay una variable explicativa. Si se dispone de  $T$  observaciones de la variable  $Y$  ( $y_1, y_2, \dots, y_t$ ) y de las correspondientes observaciones de  $X$  ( $x_1, x_2, \dots, x_t$ ). Si se

hace extensiva a la relación entre observaciones, se tiene el siguiente conjunto de T ecuaciones:

$$Y_t = \beta_1 + \beta_2 X_1 + u_1 \quad (5)$$

$$Y_t = \beta_1 + \beta_2 X_2 + u_2$$

... ..

$$Y_T = \beta_1 + \beta_2 X_T + u_T$$

El objetivo principal de la regresión es la determinación o estimación de  $\beta_1$  y  $\beta_2$  a partir de la información contenida en las observaciones de que se dispone.

### Desviación estándar

Es la raíz cuadrada de la varianza. Es decir, la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de las puntuaciones de desviación. La desviación estándar se representa por  $\sigma$  y mide cuánto se separan los datos. La varianza es el cuadrado de la desviación estándar:  $\sigma^2$ , se define así: Es la media de las diferencias con la media elevadas al cuadrado. La desviación estándar se utilizó para medir el grado de dispersión del conjunto de datos. Midiendo la diferencia entre cada valor del conjunto de datos y la media del conjunto de datos. Sumando todas estas diferencias individuales para dar el total de todas las diferencias. Dividiendo el resultado por el número total de observaciones (normalmente representado por la letra "n") para llegar a un promedio de las distancias entre cada observación individual y la media. Este promedio de las distancias es la desviación estándar y de esta manera representa dispersión.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}} \quad (6)$$

### Cuartiles

Los cuartiles son los tres valores de la variable que dividen a un conjunto de datos ordenados en cuatro partes iguales. Q1, Q2 y Q3 determinan los valores correspondientes al 25%, al 50% y al 75% de los datos. Q2 coincide con la mediana.

En el cálculo de los cuartiles se debe primero ordenar los datos de menor a mayor y segundo buscar el lugar que ocupa cada cuartil mediante la expresión:

$$(K * N) / 4, K = 1, 2, 3 \quad (7)$$

Se utilizaron para permitir conocer otros puntos característicos de la distribución que no son los valores centrales.

La **Raíz del Error Cuadrático Medio** o **RMSE** (*Root Mean Squared Error*) es una medida de desempeño cuantitativa utilizada comúnmente para evaluar métodos de pronóstico de demanda. En este contexto, RMSE consiste en la raíz cuadrada de la sumatoria de los errores cuadráticos. En comparación con la Desviación Media Absoluta o MAD, RMSE amplifica y penaliza con mayor fuerza aquellos errores de mayor magnitud. La fórmula de cálculo del RMSE se muestra a continuación:

$$\bar{X}_q = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N X_i^2 * n_i}{N}} \quad (8)$$

Se utilizó para medir el grado de variación entre los puntos de datos y la curva. Para cada punto de datos, la fórmula del RMSE calculó la diferencia entre el valor real de cada punto, y el valor de los puntos en la curva de mejor ajuste.

## 2.4 Generación del modelo digital de terreno

En la propuesta de método para generar modelos digitales de terreno que se desarrolla en este proyecto, el equipo del escáner es utilizado tradicionalmente para levantamientos arquitectónicos y poco utilizados para trabajos de ingeniería. El ELT se coloca arbitrariamente sobre el terreno y no sobre placas topográficas conocidas, pero si es importante que tenga dos puntos visados y capturados desde la primera estación, con coordenadas conocidas ya que sobre estos puntos de información es donde se colocaran las esferas para la correcta unión de escenas y su georreferenciación. Lo que se realiza en campo es un levantamiento topográfico a partir de puntos e imágenes tomadas por el escáner laser terrestre. Luego de realizar una limpieza eliminando los datos que se encuentran por encima de la superficie se procede a georreferenciar con base en los datos tomados en campo. El método propone que para terrenos con estructura vegetal o pasto colocar mínimo 20 puntos de control, en este caso se colocaron cilindros de concreto identificables en las imágenes y puntos sobre zonas duras, para el control estadístico de las coordenadas X, Y y Z y poder determinar los rangos de diferencias de error con el modelo digital de terreno. Es necesario exportar los datos en formatos .las o lidar E57, que son leídos, editados y manipulados por diversos software para generar modelos digitales de terreno y curvas de nivel. Para validar y proponer usos de este proceso, con base en la información topográfica generada con escáner se probó el método y el modelo propuesto, diseñando una vía secundaria sobre el modelo digital generado. En la vista en planta se diseñó una curva, espiral circular espiral simétrica, en el diseño vertical o perfil cinco curvas verticales.

Dependiendo del escáner se realiza el método tradicional de generación de modelo digital de terreno teniendo como base el levantamiento de la nube de puntos, en donde la mayoría de los equipos son colocados sobre una placa con coordenadas conocidas, o disponen de un receptor GPS (GNSS). Donde el escáner laser terrestre tiene el origen de su propio sistema de coordenadas, se coloca también un receptor GNSS calibrado para determinar su posición (Jimenez et al., 2011). Otros procedimientos de recolección de datos con el escáner laser terrestre requieren que cuando se hace un cambio realizar vistas atrás al sitio en donde estaba localizado el equipo y vistas adelante, Jiménez lo muestra en el documento diciendo que se emplazó un Punto de Vista Atrás o BS con el correspondiente registro de sus coordenadas geodésicas, para una georreferenciación

directa en el sistema de coordenadas global (GLCS) (Jimenez *et al.*, 2011) dando visual a otro punto de amarre que también contenga esta información. Esos equipos escáner cuentan con plomada laser para su centrado y nivelado del equipo, también solicitan tomar la medida de la altura instrumental. Luego se realiza una poligonal, en donde en cada estación se registran los targets o esferas colocadas en campo. Para cada estación es necesario conocer las coordenadas de su posicionamiento, para hacer luego una georreferenciación de la nube. Estos millones de datos capturados se exportan a un software donde incluyen la posibilidad de acceder a ellos para generar modelos digitales de terreno, pero sin estudios sobre la exactitud de los datos y orientación de los modelos generados.

Cada uno de los fabricantes de escáneres tiene su propio sistema de software de procesamiento de datos (Riegl RiScan Pro, Leica Cyclone, FARO Scene). Estos sistemas de software se centran en la estructura construida y no están diseñados específicamente para el análisis de la vegetación ni del terreno. Todas cuentan con herramientas para la visualización de datos, filtrado de puntos, manejo de la nube de puntos a las características específicas y la exportación de punto de coordenadas cartesianas (Newnham *et al.*, 2012). La característica más importante para el análisis de la vegetación es la posibilidad de exportar los datos en un formato que puede ser interpretado e incorporado a otros sistemas de software fácilmente, para el presente estudio los datos fueron exportados a E57.

El desarrollo del proyecto se muestra a continuación según la metodología siguiente: Determinando el alcance del proyecto, seleccionado la zona de trabajo, determinado el sistema de referencia, determinando la posición de los escaneos, esferas, etc.

#### **2.4.1 Determinación del alcance del proyecto**

Consiste en desarrollar una descripción del proyecto y del producto. Se definieron los puntos y áreas que entran y no entran en el proyecto refiriéndose a todos los requerimientos a satisfacer. Este proceso es fundamental para el éxito del proyecto porque define los límites de las zonas, tipo de terreno y como se encuentra la capa vegetal a registrar, además proporciona una aproximación a los tiempos de trabajo en campo y cálculos en oficina.

La siguiente es la información que servirá como guía a la hora de identificar el alcance:

- Ubicación del proyecto: Se identifica el tipo de terreno, plano, ondulado, montañoso o escarpado



- Tipos de datos que están dentro y fuera del alcance del terreno a levantar. Dependiendo de la resolución que se va a tomar se determina el corredor o área para determinar el número de escaneos y el tiempo del levantamiento.
- Número aproximado de posiciones del escáner y tiempo de registro. Según las distancias calculadas en el objetivo dos, se planifican cinco estaciones del equipo.

#### **2.4.2 Selección de la zona de trabajo**

Para la evaluación de la mejor resolución se trabajó sobre un corredor de una zona dura, ahora para este nuevo objetivo se localiza otra zona de los cerros orientales de Bogotá que es mostrada en la Figura 12, teniendo en cuenta que es una zona topográfica montañosa, adecuada con poca vegetación alta, para realizar los análisis requeridos. La extensión geográfica de la prueba es aproximadamente de 4400 m<sup>2</sup>, la nube de puntos se recolecta sobre terreno montañoso con un escáner Faro. El área evaluada se delimita por las coordenadas cartesianas 100400 m Norte, 101410 m Este, en la esquina superior derecha y 100300 m Norte, 101315 m Este, en la esquina inferior izquierda.

#### **2.4.3 Determinación del sistema de referencia o georreferenciación del proyecto en terreno.**

Es necesario definir un sistema de referencia local, materializando placas o puntos topográficos distribuidos dentro del área a escanear, para que sirvan como control en el estudio y replanteo de la localización del diseño y construcción del proyecto. El sistema MAGNA SIRGAS es el sistema de referencia en Colombia y presenta la información de los puntos en coordenadas geográficas, planas Gauss y planas Cartesianas. En el presente proyecto se utilizaron planas cartesianas de las placas materializadas TT20, TT19 y TT11. Se materializaron y georreferenciación por topografía convencional, siete mojones o cilindros de concreto distribuidos estratégicamente en el área para poder ser identificados fácilmente en la nube de puntos ya que la zona está cubierta de pasto y vegetación baja. Estos cilindros identificables en la nube de puntos son indispensables para el control del RMSE.

La Figura 28 muestra la placa TT20 y la visual desde la placa TT19 en la posición al cilindro No. 3, durante el proceso del levantamiento topográfico.

Figura 28. Placa TT20 y visual desde TT19 al cilindro No. 3



Las coordenadas Norte, Este, fueron obtenidas por medio de una poligonal con estación total Pentax 425 y las cotas por medio de una nivelación de precisión.

Con las coordenadas de las placas y cotas se calcularon diferencias de altura, azimuts y distancias entre ellas, para realizar control en campo, (Tabla 5).

Tabla 5. Coordenadas, cotas, azimuts y distancias entre puntos

DIFERENCIAS DE NIVEL, AZIMUT Y CONTRAZIMUT

Estación	Coordenadas		COTAS	▲h	Azimut	Contraazimut	Distancias
	Norte (m)	Este (m)					
TT20	100366.9	101376.53	2693.788				
				1.608	234°37'19.73"	54°37'19.73"	25.755
TT19	100351.989	101355.531	2692.18				
				8.897	229°50'2.06"	49°50'2.06"	48.938
TT11	100320.424	101318.134	2683.283				
				-6.929	46°47'34.08"	226°47'34.08"	85.368
Cilindro 1	100378.87	101380.357	2690.212				
				1.041	247°49'16.5"	67°49'16.5"	12.040
Cilindro 2	100374.325	101369.208	2689.171				
				-2.27	209°42'2.76"	29°42'2.76"	19.654
Cilindro 3	100357.253	101359.47	2691.441				
				0.099	228°4'53.46"	48°4'53.46"	24.848
Cilindro 4	100340.653	101340.981	2691.342				
				3.27	247°56'10.72"	67°56'10.72"	8.519
Cilindro 5	100337.453	101333.086	2688.072				
				3.234	214°6'12.28"	34°6'12.28"	18.261
Cilindro 6	100322.332	101322.847	2684.838				
				-2.896	165°14'58.1"	345°14'58.1"	11.304
Cilindro 7	100311.401	101325.725	2687.734				
				0.941	330°45'10.3"	150°45'10.3"	2.370
POS 2	100313.469	101324.567	2686.793				

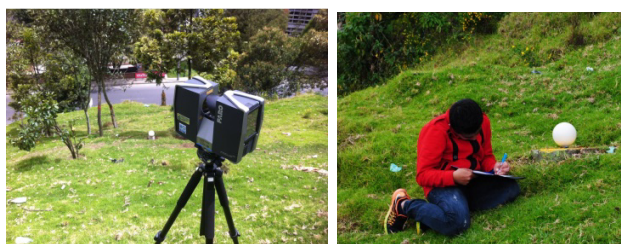
Estacion	Coordenadas		COTAS	▲h	Azimut	Contraazimut	Distancias
	Norte (m)	Este (m)					
TT20	100366.9	101376.53	2693.788				
				4.617	315°24'0.63"	135°24'0.63"	10.428
Cilindro 2	100374.325	101369.208	2689.171				

#### 2.4.4 Posición de escaneos, targets y esferas en terreno.

El lugar en el terreno donde se va a instalar el escáner es lo que se denomina posición de los escaneos. En los procedimientos de escaneo 3D, generalmente, se realizan múltiples escaneos desde diferentes posiciones con el objetivo de evitar zonas de sombra. Cada una de estas nubes de puntos, estará contenida en el sistema de coordenadas propio de cada posición, y después se realiza la fusión de todas las nubes de puntos. Se deben de tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

1. Colocación primera posición del escáner: Es necesario partir de dos (2) placas o puntos topográficos materializados con información de coordenadas y cotas. Situar las esferas sobre las placas o puntos topográficos. Esta colocación debe permitir que la primera posición el equipo escáner este a una distancia menor a los 20 m de los puntos con coordenadas en donde son colocadas las esferas o targets y que presenten buena visual sin obstáculos. Para la vista adelante deben observarse las esferas para el amarre de las escenas o tomas en su avance. En esta propuesta metodológica no es necesario ubicar y nivelar el equipo de escáner sobre ninguna de las placas con coordenadas, se debe configurar y colocar el escáner laser en cualquier punto intermedio desde donde se observe la totalidad de las dos (2) esferas. Se utilizó la placa TT20 100366,9 mN, 101376,53 mE y el cilindro 2 100374,325 mN 101369,208 mE, (Figura 29).

Figura 29. Escáner con visual a cilindro 2 y registro de esfera en placa TT20

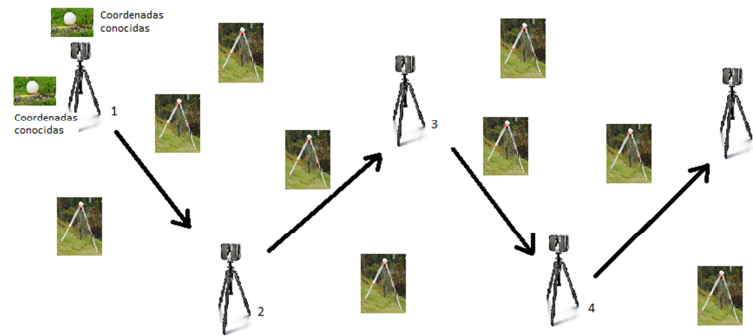


2. Separación entre la posición de los escaneos: Según los resultados de los estudios de resoluciones con respecto a las distancias, se recomienda que la distancia entre escaneos no sea mayor a 40 m para las resoluciones entre 1/1 y 1/8. Tener otros puntos de control terrestre sobre el terreno con datos topográficos. Trasladar el escáner a un punto adelante donde haya visibilidad total de las esferas y target colocados adelante y atrás del recorrido de avance y que no sea mayor a la distancia recomendada según la resolución a configurar. En cada posición el escáner láser terrestre va adquiriendo datos masivos, reportando una

nube de puntos generada tridimensional, a partir de la medición de distancias y ángulos, mediante un rayo de luz láser a nivel detallado de los elementos naturales y culturales que hagan parte del paisaje y que estén sobre el terreno, a nivel del suelo y sobre él (Vías, hidrografía, zonas duras, perímetros de manzana, árboles y ejes viales en zonas urbanas). Parte importante en la propuesta metodológica es colocar el escáner en un punto cualquiera, no sobre las placas con coordenadas conocidas como lo realizan otros métodos.

3. En la Figura 30 se observan 5 posiciones del escáner recomendada para terreno montañoso para cubrir toda el área. La posición del escáner debe garantizar claramente los quiebres del terreno, por esto es recomendable que su colocación presente posiciones en zigzag, para abarcar las diferencias de altura en terreno montañoso.

Figura 30 Posición recomendada de escaneos y esferas en terreno montañoso



4. Libre de obstáculos: Los sitios seleccionados para la colocación del equipo deben estar libre de obstáculos, sobre una superficie estable revisando que el trípode quede seguro, a buena altura y con visual al sitio en donde son colocadas las esferas y targets para que el registro sea óptimo.
5. Según el tipo de escáner el radio de captura de datos está relacionada con la resolución. Para este estudio la resolución fue para el terreno con vegetación de 1/5 y 4x abarcando un radio aproximado de 20 m, obteniendo información confiable para el modelo a desarrollar. A su vez el equipo también captura información a distancias de 120 m, pero que no serán tomadas en cuenta debido a la precisión necesitada para el área del corredor.

La posición de las esferas es muy importante para el proceso de registro y unión de las escenas. Por lo cual es determinante su buena colocación y distribución en el campo. Para determinar estas posiciones las recomendaciones que se deben tener en cuenta son:

Placas con coordenadas conocidas: Se deben colocar los targets o esferas sobre mínimo 2 placas o puntos con coordenadas conocidas al iniciar la primera escaneada. Si se presentan condiciones de visibilidad y distancia la colocación de otro punto con las mismas condiciones facilitará mejor la georreferenciación. En cada escaneo deben registrarse mínimo 3 esferas o targets atrás y 3 adelante que sean comunes en el avance, para lograr una buena unión de escenas y georreferenciación de la nube de puntos. La conexión de las exploraciones se lleva a cabo a través de objetivos y esferas. Las esferas no tienen coordenadas, que sólo se utilizan para crear un modelo continuo. Los objetivos tienen coordenadas, y con ellos se georreferencia el modelo (Pérez, 2014).

Visual: La colocación de cada esfera debe permitir y asegurar que tenga una excelente visual con el escáner y que no se confunda con el terreno u otro objeto. Por tal motivo como la escaneada se realizaba sobre capa vegetal, se colocaron las esferas sobre trípodes o bípodes y no sobre el terreno, (Figura 31). Los targets se situaron a unos 10 cm de altura sobre el suelo, para su correcta identificación y orientadas de frente al escáner para las dos posiciones de registro de información.

Figura 31. Vista de escáner, posición de targets y esferas sobre trípode



Distancia de esferas y targets: Los targets y esferas deben estar entre 15 m a 20 m para resoluciones entre 1/8 y 1/1, esto permitirá identificarlas correctamente en la nube de puntos.

Geometría de las esferas y targets: En el campo deben ser colocadas espacialmente con buena geometría y no en línea recta sin descuidar la visibilidad al escáner, (Figura 32).

Figura 32. Vista de escáner y esferas sobre trípode



Movimiento: Deben estar fijas y seguras, restringiendo su movimiento ya que serán tomadas en su posición desde dos puntos diferentes.

#### 2.4.5 Configuración del escáner y captura de información

Se configuró el escáner láser terrestre según resolución establecida en el objetivo 1 con un valor de 1/5, valor intermedio entre las resoluciones 1/1 y 1/8. La calidad que es el número de veces que el rayo láser pasa sobre el mismo punto fue de 4x. Se ajustaron los parámetros de configuración de escaneo directamente, como ángulo horizontal 0° a 360°, vertical 90° a 62.5°, distancia máxima 120, fotografías a color, perfil seleccionado dependiente de las condiciones climáticas. Es recomendable contar con mínimo cuatro personas en el proceso de escaneo, uno que opera el equipo y tres en el proceso de colocación de targets o esferas y su cuidado. En la Figura 33 se observa la resolución y calidad utilizada.

Figura 33. Vista de resolución 1/5 y calidad 4x



La mayoría de equipos de escáner hacen su lectura o giro en el sentido horario de las manecillas del reloj hasta 180° ya que su lente desvía el rayo de luz en ambos sentidos. Si está escaneando con color, el escáner continuará girando hasta 360° para tomar imágenes. Al cambiar de posición el escáner, se recomienda no apagarlo. Si lo enciende en cada escaneo disminuirá la productividad del equipo.

#### 2.4.6 Procesamiento de los datos

El resultado del escaneo a través del escáner láser terrestre es un conjunto de puntos en coordenadas X, Y, Z que muestra la distribución espacial de un objeto en el sitio llamado "nube de puntos". Para la generación de modelos tridimensionales a partir de los datos de escaneo, se requiere hacer un tratamiento especializado de la nube de puntos que consiste en varias etapas entre las cuales se destacan: el registro y la georreferenciación,

la segmentación, la clasificación de los objetos contenidos de la nube de puntos y el modelado 3D de estos objetos (Porrás *et al.*, 2012). Este proceso se muestra detalladamente en la documentación del modelo digital del terreno.

#### **2.4.7 Limpieza del ruido con software Cloud compare.**

Con el software Cloud Compare de procesamiento de nube de puntos 3D tales como las obtenidas con el escáner láser y que fueron importadas con la extensión E57, facilitó el manejo de nubes de puntos de alta densidad. Con el conjunto de herramientas básicas se editó manualmente la nube de puntos en 3D eliminando los árboles, arbustos, elementos arquitectónicos como postes, canecas y personas, presentes en la imagen. En resumen los elementos que están sobre la superficie del suelo. Este proceso es muy importante para la exactitud del trabajo y requirió de un buen tiempo y detalle, moviendo la nube de puntos para observarlos en diferentes vistas, e ir eliminando puntos, hasta dejar lo más próximo el corte a nivel del terreno.

En la Figura 34 y Figura 35 se observan dos vistas en donde aparecen los puntos de la superficie del terreno, de los árboles, arbustos y postes.

Figura 34. Vista de la nube de puntos a eliminar sobre la superficie del terreno

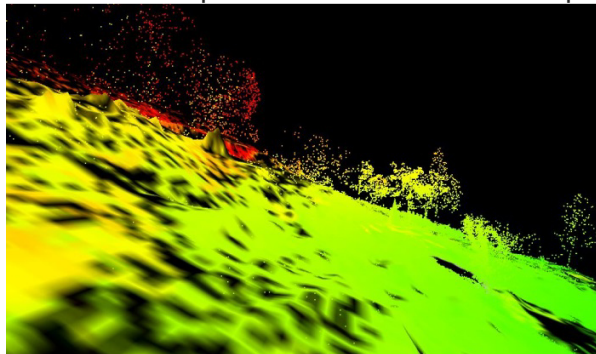
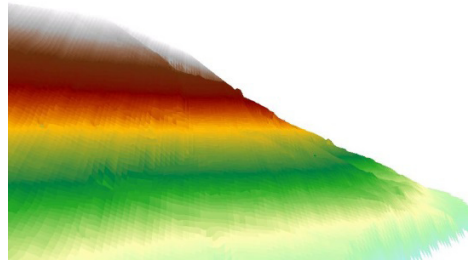


Figura 35. Vista de la nube de puntos de árboles y postes sobre la superficie del terreno



Luego de realizar este proceso de limpieza eliminando el ruido, el resultado final es la presencia de la capa superficial vegetal de puntos más cercanos al terreno, como lo muestra la Figura 36.

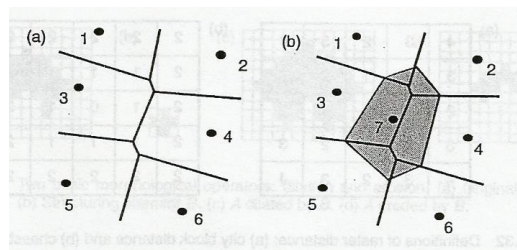
Figura 36. Capa superficial



#### 2.4.8 Modelo digital de terreno

El software Global Mapper permite realizar un cálculo para modelar la superficie utilizando los polígonos de Voronoi/Theissen para entidades y puntos cargados. La reconstrucción de superficies está basado en las triangulaciones de Delanuy, que consiste en la generación de una red irregular de triángulos (TIN) a partir de los puntos de datos de las escenas. Delanuy también pueden construirse indirectamente de los diagramas de Voronoi, ya que tienen una relación dual (Li et al., 2005). Los polígonos de Voronoi, son herramienta muy importante a la hora de estudiar áreas de influencia ya que es el mejor método para la triangulación manual de los datos (Li et al., 2005), este se puede implementar dinámicamente mediante la inserción de puntos en el diagrama de Voronoi existente como lo ilustra la Figura 37.

Figura 37. Inserción de un punto en un diagrama de Voronoi



Los polígonos de Voronoi se basan en la distancia euclídea, sirven para dividir un espacio en un número determinado de regiones. Especifican un conjunto de puntos (puntos generadores) y cuando se hace el diagrama, estos quedan divididos por los polígonos, un punto en cada región. Las regiones se denominan celdas o polígonos de Voronoi. Se trata de hacer una partición del plano, a partir de unos puntos que se pueden llamar puntos generadores. El límite de Voronoi del punto está formado por mediatrices entre este y sus vecinos cercanos, la distancia es un concepto clave en la generación de diagramas de



Voronoi (Li et al., 2005). La distancia euclídea entre dos puntos  $P_1(x_1, y_1)$  y  $P_2(x_2, y_2)$  está definida como sigue:

Donde:

$$D(P_1, P_2) = f(x_1, x_2, y_1, y_2) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (9)$$

Esta partición del plano en regiones tiene la peculiaridad de que desde cualquier punto dentro de una región determinada, la distancia al punto generador correspondiente es siempre menor que la distancia a cualquier otro punto generador externo. Por tanto, las fronteras de las regiones son equidistantes de dos o más puntos generadores. Cada polígono corresponde al área de influencia, por decirlo de algún modo, el punto que contiene.

Los fenómenos que ocurren son continuos, pero la información cuantificable que de ellos se dispone, son en su mayoría discretos. La Interpolación permite crear mapas continuos a través de un número de observaciones discretas.

El objetivo de la interpolación es predecir valores para las celdas de un ráster a partir de una cantidad limitada de puntos de datos de muestra. Los valores desconocidos de un dato geográfico como elevación para generar curvas de nivel, precipitación, se puede prever ya que los objetos distribuidos espacialmente están correlacionados espacialmente. Las cosas que están cerca tienden a tener características similares, esta es la base de la interpolación.

En este estudio con el software Global mapper se utilizó la interpolación para crear una superficie de elevación a partir de un conjunto de mediciones de muestra.

La herramienta que utiliza el software es Ponderación de Distancia Inversa IDW. Este es un método de interpolación que estima los valores de las celdas calculando promedios de los valores de los puntos de datos de muestra en la vecindad de cada celda de procesamiento. Cuanto más cerca está un punto del centro de la celda que se está estimando, más influencia o peso tendrá en el proceso de cálculo del promedio ([help.arcgis.com](http://help.arcgis.com)). Es un método matemático de interpolación que usa una función inversa de la distancia, presupone que la variable que se representa cartográficamente disminuye su influencia a mayor distancia desde su ubicación de muestra. Parte del supuesto que las cosas que están más cerca son más parecidas por lo tanto tienen más peso e influencia sobre el punto a estimar (Morillo *et al.*, 2012). Su fórmula se compone de un Z (So) que es el valor a predecir, N es el número de muestras alrededor del punto a

predecir,  $\lambda_i$ , son los pesos asignados a cada punto vecino y  $Z(S_i)$  son los valores medidos:

$$Z(S_o) = \sum_{i=1}^N \lambda_i * Z(S_i) \quad (10)$$

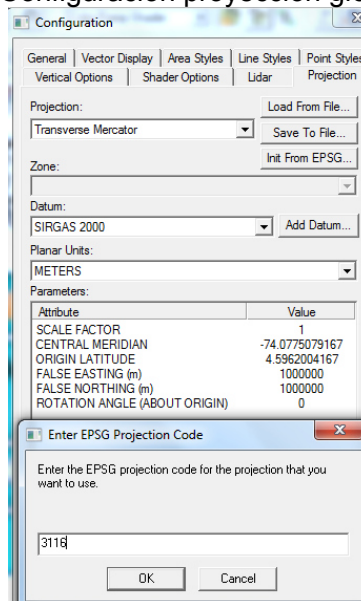
Los pesos de los puntos vecinos estan dados por:

$$\lambda_i = (d_{io}^{-p}) / (\sum_{i=1}^N d_{io}^{-p}) \quad (11)$$

En el cual  $d$ , es la distancia entre el lugar de predicción ( $S_o$ ) y el lugar muestral ( $S_i$ );  $P$  es un factor de reducción de pesos, cuyo valor se encuentra minimizando el error cuadrático medio o error de predicción (Morillo *et al.*, 2012).

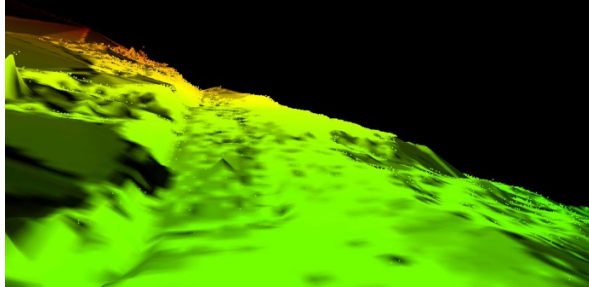
En el software global se ajustan las herramientas de estos conceptos, además los ajustes de proyecciones en UTM, se coloca 3116 para el EPSG, que es un conjunto de datos estructurado de coordenadas de referencia y transformación de coordenadas. Además se debe seleccionar la zona del hemisferio norte, (Figura 38).

Figura 38 Configuración proyección global mapper



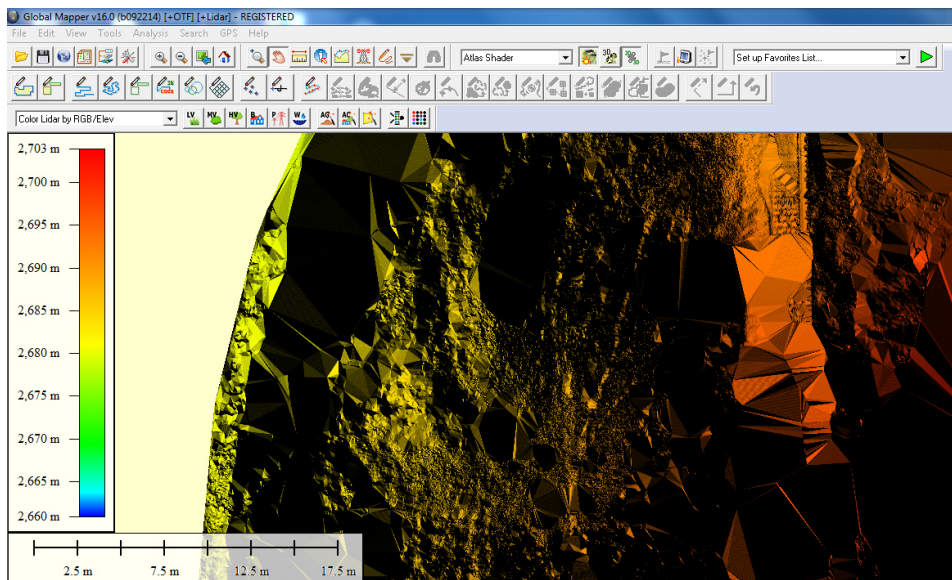
Con la herramienta análisis del menú, se crea la cuadrícula de elevación 3D. La Figura 39 muestra el modelo digital generado utilizando esta herramienta. Allí se observan unas zonas donde los triángulos sobresalen de la superficie debido a la interpolación y zonas donde el escáner no registro información.

Figura 39. Modelo digital generado con Global Mapper



Global Mapper genera el modelo digital de terreno como lo muestra el detalle de la Figura 40, con la escala de colores altimétrica según los rangos determinados, se observan zonas de terreno homogéneas y triángulos en los bordes.

Figura 40. Modelo digital de terreno



## **2.5 Determinar la exactitud en posición absoluta y relativa de un modelo digital de terreno según la resolución obtenida.**

En esta parte se hace referencia a los materiales y métodos que se aplicaron para determinar la exactitud absoluta y relativa de los datos que generaron el modelo digital de terreno según la resolución recomendada. Aplica la metodología estadística para estimar la exactitud posible de las posiciones de puntos sobre datos digitales geoespaciales, mostrando las características físicas de la superficie terrestre, mediante un modelo digital del terreno, elaborado por adquisición de nube de puntos por medio de escanografía laser terrestre con respecto a puntos terrestres de referencia con mayor exactitud. Se aplican las recomendaciones de la norma NTC 5205 de precisión (exactitud) de datos espaciales y la NTC 5043 sobre conceptos básicos de la calidad de los datos geográficos.

### **2.5.1 Metodología para las pruebas de exactitud**

Para la prueba de exactitud es necesario tener datos de campo y datos digitales. Los materiales utilizados son los equipos topográficos y los datos digitales capturados por el escáner que se miden sobre un software de nube de puntos.

**Toma de datos en terreno.** Para realizar esta metodología es necesario generar datos de un levantamiento topográfico y datos de una nube de puntos.

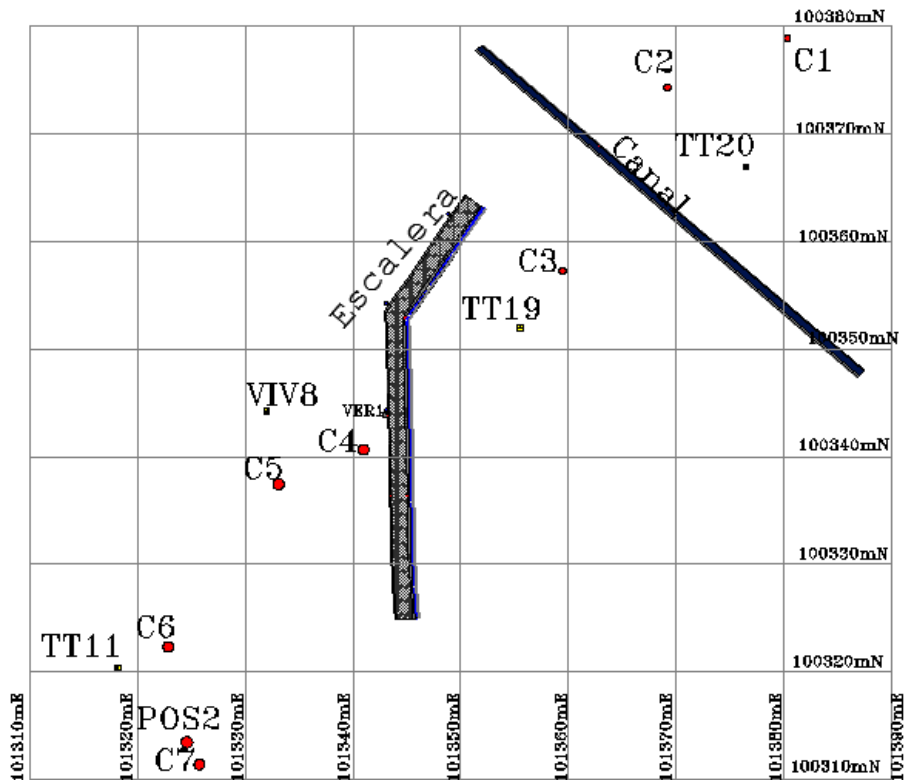
Datos del levantamiento topográfico: Como es necesario emplear una fuente independiente de mayor exactitud para la verificación de las posiciones, la ASPRS (2004) recomienda que los datos utilizados como referencia sean por lo menos tres veces más exactos que los datos del escáner. Atendiendo esta recomendación, para la captura de datos topográficos de referencia se utilizó una poligonal cerrada con estación Pentax 425 la cual tiene una exactitud de ( $\pm 5\text{mm} + 2\text{ ppm}$ ), la exactitud horizontal se prueba mediante la comparación de las coordenadas planimétricas planas cartesianas de puntos bien definidos en un amarre, en el conjunto de datos con coordenadas de las placas TT20 100366,9 mN, 101376,53 mE y TT19 100351,989 mN, 101355,531 mE de los mismos puntos a partir de la exactitud más alta obtenida por el levantamiento de una poligonal. En total se recolectaron 20 puntos sobre el terreno para ser utilizados como referencia para obtener el 95 % del nivel de confianza según lo recomienda la NTC 5205. Como se necesitaba que los puntos identificados en terreno estuvieran bien medidos se tomaron lecturas de los cilindros en tres oportunidades como lo muestra la Tabla 6.

Tabla 6. Coordenadas y cotas de cilindros

Punto	Fecha	Armada	Coordenadas		NORTE			Este			Distancia Del rango	Coordenadas		COTAS	Punto
			Norte	Este	Vmin-Promedio	Vmax-Promedio	RANGO	Vmin-Promedio	Vmax-Promedio	RANGO		Norte	Este		
Cilindro 1	11/08/2015	TT19	100378,869	101380,371											Cilindro 1
	28/09/2015	TT20	100378,864	101380,354											
	28/09/2015	TT19	100378,878	101380,347	-0,006	0,008	0,014	-0,010	0,014	0,024	0,028	100378,870	101380,357	2690,212	
Cilindro 2	11/08/2015	TT19	100374,328	101369,212											Cilindro 2
	28/09/2015	TT20	100374,319	101369,199											
	28/09/2015	TT19	100374,328	101369,212	-0,006	0,003	0,009	-0,009	0,004	0,013	0,016	100374,325	101369,208	2689,171	
Cilindro 3	11/08/2015	TT19	100357,263	101359,477											Cilindro 3
	28/09/2015	TT20	100357,234	101359,456											
	28/09/2015	TT 19	100357,263	101359,477	-0,019	0,010	0,029	-0,014	0,007	0,021	0,036	100357,253	101359,470	2691,441	
Cilindro 4	11/08/2015	Poligonal	100340,657	101340,986											Cilindro 4
	28/09/2015	TT20	100340,645	101340,973											
	28/09/2015	TT 19	100340,657	101340,984	-0,008	0,004	0,012	-0,008	0,005	0,013	0,018	100340,653	101340,981	2691,342	
Cilindro 5	11/08/2015	C4	100337,455	101333,093											Cilindro 5
	28/09/2015	C4	100337,457	101333,090											
	28/09/2015	TT11	100337,447	101333,075	-0,006	0,004	0,010	-0,011	0,007	0,019	0,021	100337,453	101333,086	2688,072	
Cilindro 6	11/08/2015	TT11	100322,340	101322,852											Cilindro 6
	28/09/2015	C4	100322,317	101322,840											
	28/09/2015	TT11	100322,339	101322,849	-0,015	0,007	0,022	-0,007	0,005	0,013	0,026	100322,332	101322,847	2684,838	
Cilindro 7	11/08/2015	TT11	100311,427	101325,734											Cilindro 7
	28/09/2015	C4	100311,377	101325,722											
	28/09/2015	TT11	100311,397	101325,719	-0,010	0,010	0,020	-0,006	0,009	0,015	0,025	100311,401	101325,725	2687,734	
POS 2	11/08/2015	TT11	100313,481	101324,561											POS 2
	28/09/2015	C4	100313,466	101324,574											
	28/09/2015	TT11	100313,460	101324,566	-0,009	0,012	0,021	-0,006	0,007	0,014	0,025	100313,469	101324,567	2686,793	
VIV 8	11/08/2015	Poligonal	100344,223	101331,996											VIV 8
	28/09/2015	C4	100344,218	101331,985											
	28/09/2015	TT11	100344,220	101331,997	-0,002	0,003	0,005	-0,008	0,004	0,012	0,013	100344,220	101331,993	-	

Se generó un plano en planta que muestra la ubicación de los cilindros y puntos tomados en terreno con sus coordenadas, la ubicación de la escalera y el canal en concreto, como lo muestra la Figura 41.

Figura 41. Posiciones de cilindros y placas en el plano



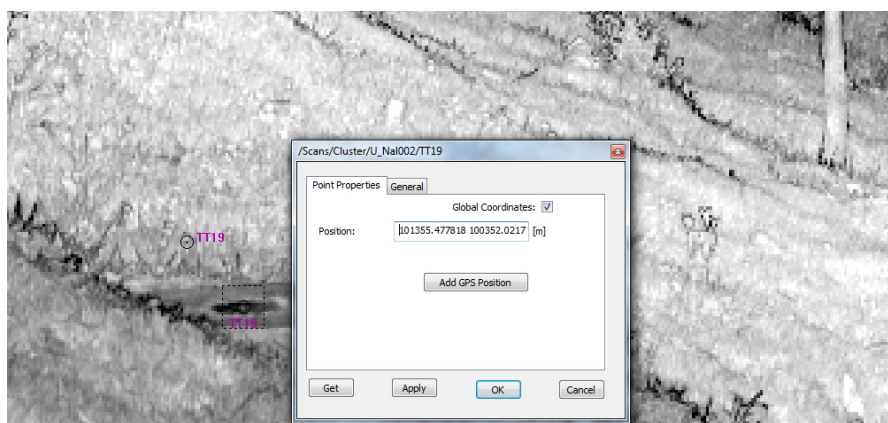
En cuanto a la posición vertical la fuente se obtuvo y probó mediante una nivelación de exactitud con un equipo electrónico digital Leica sprinter 50 que minimiza los errores humanos ya que los datos son visualizados inmediatamente evitando errores de lectura. La nivelación es un “término genérico que se aplica a cualquiera de los diversos procedimientos a través de los cuales se determinan elevaciones o diferencias entre las mismas” (Wolf, 2008). La comparación de las elevaciones en el conjunto de datos de elevaciones de los mismos puntos determinados se realizó a partir de una nivelación geométrica o compuesta para ser utilizada como fuente de mayor exactitud. En la nivelación geométrica “se utiliza un telescopio con una amplificación adecuada para leer estadales (miras) graduadas, situadas sobre puntos fijos. Se establece una línea visual horizontal dentro de un telescopio mediante un tubo de burbuja o un compensador automático” (Wolf, 2008). En este método “el aparato no permanece en un mismo sitio sino que se va trasladando a diversos puntos, desde cada uno de los cuales se toman nivelaciones simples, que van ligándose entre sí por medio de los llamado puntos de cambio. El punto de cambio se tiene que escoger de modo que sea estable y de fácil identificación; es un BM de carácter transitorio (Torres & Villate, 2009). El BM es un punto del cual se conocen su localización y elevación donde su cota, ha sido determinada por una nivelación de exactitud.

**Toma de datos sobre la nube de puntos.** Las coordenadas y alturas son tomadas de la nube de puntos, debido a que los cilindros no son identificables en el modelo digital de terreno por las triangulaciones generadas. Para desarrollar la metodología para las pruebas de exactitud se realiza la evaluación de una nube de puntos topográficos obtenidas con escáner laser terrestre, desde donde se emiten haces de luz láser o pulsos dirigidos hacia la superficie terrestre registrando la energía que es reflejada hacia el escáner por los objetos existentes, sobre zonas duras y terreno natural. Los rayos de luz que retornan conforman una nube de puntos que por medio de un pos proceso se pueden obtener mediciones X, Y y Z de la zona.

Para la generación de productos topográficos con escáner laser terrestre, es necesario descartar de la nube de puntos aquellos retornos que no pertenecen al terreno natural, lo que se conoce como eliminar el ruido, mediante una edición manual con el software del equipo. Esta nube de puntos debe estar georreferenciada, para así permitir una verdadera orientación en cada una de las escenas tomadas y poder tomar medidas sobre la nube para poder compararlos con los datos del levantamiento topográfico. Este proceso

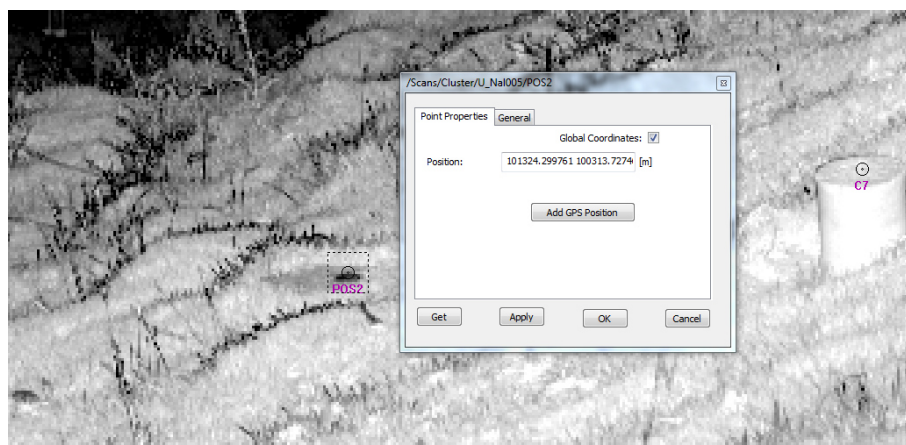
de georreferenciación y eliminación del ruido ya fue descrito. La Figura 42 muestra la toma de lectura de posición de coordenadas sobre la imagen digital. Esta toma de medidas sobre la imagen es muy importante y de mucho cuidado ya que se aconseja realizar un buen acercamiento sobre el detalle a medir.

Figura 42. Lectura de posición de coordenadas y alturas Placa TT19 en la imagen



Al identificar y picar el punto aparecen sus coordenadas en posición y en altura sobre la ventana, apareciendo primero las Este y luego las Norte. Colocando el cursor sobre los números mostrados se corre hacia la parte derecha, para buscar la lectura en el valor de altura. La Figura 43 muestra la toma de coordenadas de posición del punto PS2 y se observa el cilindro C7.

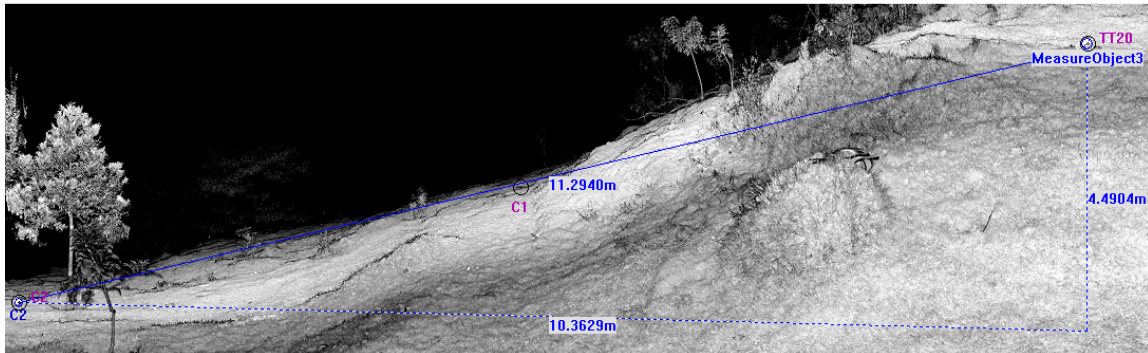
Figura 43. Coordenadas punto PS2



El otro dato que se tomó y que se utilizó para calcular la exactitud relativa fue la distancia entre puntos internos. Ya que la posición relativa o interna se refiere a la posición de un

elemento o conjunto de elementos respecto a la posición de los demás elementos de este conjunto (NTC 5043). Sobre la imagen digital se midió el valor de distancia en cada uno de los catetos generados del triángulo, al picar los dos puntos a medir. Así como lo muestra la Figura 44, entre el cilindro C2 y la placa TT20 hay una distancia horizontal de 10.3629 m, la distancia inclinada es 11.2940 m y la diferencia de altura 4.4904 m.

Figura 44. Medida de distancias entre C2 y TT20



Estos datos se tomaron sobre la imagen digital correspondiendo a los mismos puntos que fueron localizados por topografía.

A continuación se presentan las fórmulas para obtener el exactitud RMSE horizontal X y vertical RMSE Y.

$$RMSE_x = \sqrt{\frac{\sum(x_{dato,i} - x_{control,i})^2}{n}}$$

$$RMSE_y = \sqrt{\frac{\sum(y_{dato,i} - y_{control,i})^2}{n}} \quad (12)$$

En donde:  $X_{dato, i}$ ,  $Y_{dato, i}$  son las coordenadas del 'iésimo' punto en el conjunto de datos.

$X_{control, i}$ ,  $Y_{control, i}$  son las coordenadas del 'iésimo' punto de control en la fuente independiente de exactitud más alta.

N = el número de puntos de control verificados

$i$  = un entero que varía entre 1 y n

Para calcular el valor z de la exactitud vertical se utiliza la siguiente fórmula.



$$RMSE_z = \sqrt{\frac{\sum (z_{datoi} - z_{controli})^2}{n}} \quad (13)$$

En donde:  $Z_{dato i}$ , es la coordenada vertical del  $i$ ésimo punto en el conjunto de datos  
 $Z_{control i}$ , es la coordenada vertical del  $i$ ésimo punto de control en la fuente independiente de exactitud más alta.

$n$  = número de puntos que se están probando

$i$  = un entero entre 1 y  $n$ .

### 3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

#### 3.1 Evaluación de las diferentes resoluciones espaciales del escáner laser

Con base en tres resoluciones del escáner alta 1/1, media 1/8 y baja 1/20 se determinó la resolución para una determinada distancia.

Los resultados del procesamiento y cálculo de los datos obtenidos con la estación total y nivel de exactitud de los puntos T1 al T18, fueron calculados por una cartera de radiación partiendo del azimut verdadero y la cartera de nivelación de la cota conocida. Todos los instrumentos de medición electrónica de distancias miden distancias inclinadas entre dos estaciones (Wolf, 2008). Las distancias inclinadas se tienen que corregir primero colocando las condiciones instrumentales y atmosféricas en el equipo de estación total, porque de esta forma se corrige la distorsión del haz de luz provocada por la refracción atmosférica, ya que la velocidad a la que viaja la luz por el aire varía en función de la temperatura y de la presión. Este equipo da información de la distancia horizontal, vertical e inclinada y con la medición de los ángulos se calcularon las coordenadas. En la Tabla 7 se observan las coordenadas norte, este y cota, estos datos son los que se toman como base de los análisis estadísticos.

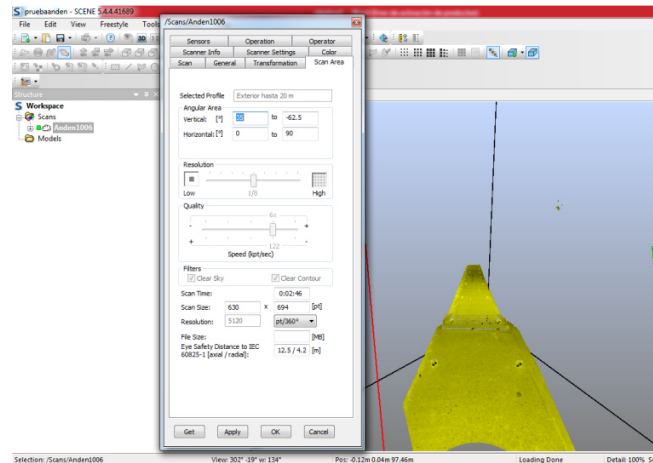
Tabla 7. Coordenadas y cota (m) de los puntos T1 a T18 sobre los ejes

Punto	ESTE	NORTE	COTA	Punto	ESTE	NORTE	COTA
T1	101467,757	100055,138	2729,712	T10	101467,097	100054,016	2729,708
T2	101466,380	100055,951	2729,245	T11	101465,720	100054,833	2729,258
T3	101463,801	100057,472	2728,404	T12	101463,136	100056,357	2728,41
T4	101461,210	100058,997	2727,943	T13	101460,550	100057,883	2727,952
T5	101458,629	100060,520	2727,463	T14	101457,966	100059,414	2727,501
T6	101456,044	100062,043	2727,029	T15	101455,385	100060,938	2727,049
T7	101453,460	100063,575	2726,603	T16	101452,802	100062,464	2726,599
T8	101450,867	100065,103	2726,16	T17	101450,221	100063,987	2726,157
T9	101448,287	100066,627	2725,737	T18	101447,638	100065,515	2725,716

Utilizando el software Scene del escáner se abren los archivos de las diferentes resoluciones y con los detalles de los target que fueron georeferenciados se realiza un filtrado de detalles de la nube de puntos, para que el archivo quede menos pesado y se puede manipular más fácilmente, dejando solo el área de interés que en este caso es la zona dura del andén. La Figura 45 muestra el filtro realizado en el área de escaneado con

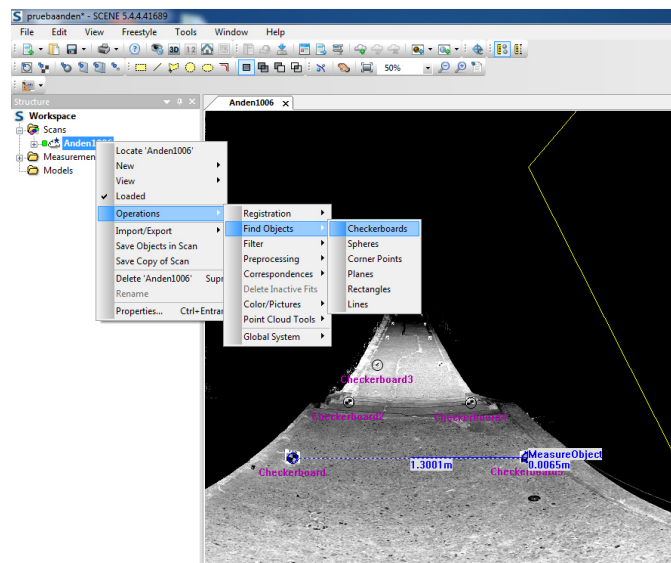
resolución 1/8 y se observa solo el andén y la ubicación de los targets. Manipulando las tres resoluciones ya se va observando como los pixelados de las imágenes son diferentes en cada uno de los targets.

Figura 45 propiedades del área de escaneado y nube de puntos con filtro



Los centros de los targets son localizados por la herramienta checkerboards, y con la herramienta medir se toman las distancias entre cada uno de los puntos entre sí. Este proceso debe ser muy cuidadoso buscando el centro de los targets, ya que el software muestra las distancias, horizontales e inclinadas y altura entre los centros de los puntos. Y son los valores que se toman para el análisis estadístico de cada resolución. La Figura 46 muestra el proceso para buscar los centros de los targets y la medida de separación entre ejes.

Figura 46. Búsqueda de objetos de tablero y medida entre los puntos



Como el objetivo es determinar cuál es la mejor resolución para la confiabilidad de los datos, se toman las relaciones entre las distancias de los puntos georeferenciados T1 a T18, y las de los mismos sobre cada una de las tres resoluciones. Se realiza una matriz con las distancias de los puntos colocados por el método topográfico calculando por la fórmula de Pitágoras las distancias entre uno y todos, y todos y uno, tomando los datos de las coordenadas planas Norte y Este. Por ejemplo de T1 a T2 hay una distancia de 1.600m, entre T1 y T3 hay 4.594m, entre T1 y T4 7.600, como lo muestra la Tabla 8. Las distancias más largas están entre T1 -T9 de 22.608m y T1 - T18 con 22.638m.

Tabla 8. Distancia con base en las coordenadas entre cada uno de los puntos

DISTANCIAS(m)		DISTANCIAS(m)	
T1-T2	1.600	T1-T3	4.594
T2-T3	2.994	T1-T4	7.600
T3-T4	3.007	T1-T5	10.596
T4-T5	2.996	T1-T6	13.597
T5-T6	3.001	T1-T7	16.601
T6-T7	3.004	T1-T8	19.611
T7-T8	3.010	T1-T9	22.608
T8-T9	2.997	T1-T10	1.302
T10-T11	1.601	T1-T11	2.060
T11-T12	3.000	T1-T12	4.779
T12-T13	3.003	T1-T13	7.713
T13-T14	3.003	T1-T14	10.684
T14-T15	2.997	T1-T15	13.664
T15-T16	3.001	T1-T16	16.654
T16-T17	2.997	T1-T17	19.643
T17-T18	3.001	T1-T18	22.638

Luego, por medio de la herramienta medir distancias del software Scene, se toman de la misma forma las medidas de las distancias horizontales, entre cada uno de los puntos T1 a todos y todos a T1, pero esta vez punteados sobre los targets que se colocaron en terreno, los cuales según la resolución y la distancia al escáner son identificables. Estos datos son registrados también sobre una cada una de las matrices. Hay que tener cuidado de tomar la distancia horizontal de separación entre los puntos T, ya que se generan también la distancia inclinada y la vertical

En el proceso de análisis se comparan todos los datos de las diferentes resoluciones en distancia con respecto al tomado con topografía de exactitud, se plantean tres matrices que relacionen todos los puntos entre sí. Para luego determinar la variación de distancias entre la más cercana al dato dado, y el de mayor separación. Primero se analizan todos los datos topográficos entre sí y luego en su complemento de matriz, los datos tomados de las medidas, en las nubes de puntos para cada una de las resoluciones como los muestran las Tablas 9,10 y 11.

Tabla 9. Matriz de distancias topográficas y de resoluciones 1/1

		LEVANTAMIENTO TOPOGRAFICO Distancias (m)																	
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18
RESOLUCIÓN 1/1 Distancias (m)	T1		1,600	4,594	7,600	10,596	13,597	16,601	19,611	22,608	1,302	2,060	4,779	7,713	10,684	13,664	16,654	19,643	22,638
	T2	1,597		2,994	6,001	8,997	11,998	15,002	18,011	21,008	2,063	1,298	3,269	6,142	9,098	12,073	15,060	18,047	21,041
	T3	4,600	3,004		3,007	6,003	9,004	12,008	15,017	18,014	4,775	3,263	1,298	3,277	6,149	9,102	12,079	15,062	18,054
	T4	7,602	6,002	3,001		2,996	5,997	9,001	12,011	15,007	7,711	6,139	3,268	1,295	3,270	6,140	9,095	12,069	15,056
	T5	10,594	8,995	5,994	2,993		3,001	6,005	9,014	12,011	10,677	9,089	6,135	3,262	1,289	3,271	6,144	9,095	12,073
	T6	13,598	11,999	8,997	5,996	3,004		3,004	6,014	9,010	13,660	12,067	9,090	6,132	3,257	1,287	3,270	6,139	9,095
	T7	16,601	15,002	12	9,000	6,006	3,002		3,010	6,006	16,653	15,058	12,072	9,092	6,133	3,265	1,291	3,265	6,137
	T8	19,605	18,006	15	12,005	9,012	6,007	3,006		2,997	19,655	18,058	15,067	12,078	9,097	6,145	3,272	1,289	3,255
	T9	22,602	21,003	18	15,001	12,007	9,005	6,003	2,996		22,646	21,048	18,055	15,061	12,071	9,097	6,141	3,272	1,287
	T10	1,300	2,060	4,778	7,708	10,670	13,654	16,646	19,65	22,636		1,601	4,601	7,604	10,607	13,604	16,605	19,601	22,602
	T11	2,064	1,303	3,269	6,137	9,089	12,063	15,053	18,05	21,04	1,597		3,000	6,003	9,006	12,003	15,004	18,001	21,002
	T12	4,789	3,271	1,296	3,265	6,131	9,088	12,067	15,06	18,047	4,598	3,002		3,003	6,006	9,003	12,004	15,001	18,002
	T13	7,717	6,147	3,275	1,296	3,259	6,130	9,090	12,07	15,052	7,602	6,005	3,004		3,003	6,000	9,001	11,998	14,999
	T14	10,684	9,100	6,143	3,267	1,300	3,258	6,136	9,092	12,066	10,602	9,005	6,004	3,000		2,997	5,998	8,995	11,996
	T15	13,660	12,070	9,09	6,132	3,270	1,29	3,266	6,144	9,097	13,595	11,998	8,997	5,993	2,993		3,001	5,997	8,998
	T16	16,650	15,059	12,07	9,09	6,144	3,267	1,292	3,266	6,137	16,598	15,000	12,000	8,996	5,996	3,003		2,997	5,998
	T17	19,641	18,046	15,05	12,065	9,096	6,139	3,265	1,288	3,27	19,594	17,998	14,997	11,992	8,995	6,000	2,997		3,001
	T18	22,633	21,036	18,04	15,049	12,063	9,085	6,127	3,237	1,284	22,594	20,996	17,997	14,991	11,985	8,997	5,989	3,000	

En la resolución 1/8 que se muestra en la Tabla 10, se nota que los targets T9 y T18 que son los que se encuentran más lejos del escáner, más o menos 22.638 m de distancia, ya su pixelado no dejó tomar los datos de las distancias entre ellos y el resto de puntos. Las distancias topográficas y las de resolución 1/8, se encuentran en blanco por falta de información entre estos puntos.

Tabla 10. Matriz de distancias topográficas y de resolución 1/8

		LEVANTAMIENTO TOPOGRAFICO Distancias (m)																			
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18		
RESOLUCIÓN 1/8 Distancias (m)	T1		1,600	4,594	7,600	10,596	13,597	16,601	19,611	22,608	1,302	2,060	4,779	7,713	10,684	13,664	16,654	19,643	22,638		
	T2	1,598		2,994	6,001	8,997	11,998	15,002	18,011	21,008	2,063	1,298	3,269	6,142	9,098	12,073	15,060	18,047	21,041		
	T3	4,602	3,006		3,007	6,003	9,004	12,008	15,017	18,014	4,775	3,263	1,298	3,277	6,149	9,102	12,079	15,062	18,054		
	T4	7,605	6,008	3,002		2,996	5,997	9,001	12,011	15,007	7,711	6,139	3,268	1,295	3,270	6,140	9,095	12,069	15,056		
	T5	10,596	8,997	5,992	2,993		3,001	6,005	9,014	12,011	10,677	9,089	6,135	3,262	1,289	3,271	6,144	9,095	12,073		
	T6	13,596	11,997	8,992	5,990	2,998		3,004	6,014	9,010	13,660	12,067	9,090	6,132	3,257	1,287	3,270	6,139	9,095		
	T7	16,602	15,004	11,995	8,996	6,004	3,007		3,010	6,006	16,653	15,058	12,072	9,092	6,133	3,265	1,291	3,265	6,137		
	T8	19,609	18,010	15,005	12,004	9,011	6,030	3,008		2,997	19,655	18,058	15,067	12,078	9,097	6,145	3,272	1,289	3,255		
	T9										22,646	21,048	18,055	15,061	12,071	9,097	6,141	3,272	1,287		
	T10	1,300	2,054	4,779	7,709	10,671	13,652	16,647	19,644				1,601	4,601	7,604	10,607	13,604	16,605	19,601	22,602	
	T11	2,065	1,300	3,273	6,142	9,090	12,065	15,057	18,052				1,596		3,000	6,003	9,006	12,003	15,004	18,001	21,002
	T12	4,783	3,372	1,300	3,269	6,134	9,087	12,069	15,060				4,598	3,002		3,003	6,006	9,003	12,004	15,001	18,002
	T13	7,720	6,148	3,275	1,293	3,261	6,126	9,085	12,069				7,603	6,007	3,004		3,003	6,000	9,001	11,998	14,999
	T14	10,684	9,099	6,139	3,262	1,288	3,258	6,133	9,091				10,598	9,003	6,002	2,996		2,997	5,998	8,995	11,996
	T15	13,658	12,068	9,086	6,124	3,274	1,301	3,272	6,145				13,590	11,996	8,994	5,989	2,993		3,001	5,997	8,998
	T16	16,656	15,063	12,061	9,091	6,145	3,277	1,285	3,257				16,600	15,005	12,001	8,996	6,002	3,006		2,997	5,998
	T17	19,644	18,049	15,053	12,064	9,096	6,144	3,264	1,265				19,596	18,001	14,998	11,993	8,998	6,005	2,997		3,001
	T18																				

En la matriz que presenta la Tabla 11 generada de las diferencias de distancias topográficas y de la medida de la nube de puntos, se observa que entre los diferentes targets en la resolución 1/20, los ubicados en T8, T9, T17 y T18 que son los más alejados del escáner, no permitieron por su pixelado, ubicar el centro de los targets, así que no se pudo determinar la distancia entre ellos y los otros puntos.

Tabla 11. Matriz de distancias topográficas y de resolución 1/20

		LEVANTAMIENTO TOPOGRAFICO Distancias (m)																			
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18		
RESOLUCIÓN 1/20 Distancias (m)	T1		1,600	4,594	7,600	10,596	13,597	16,601	19,611	22,608	1,302	2,060	4,779	7,713	10,684	13,664	16,654	19,643	22,638		
	T2	1,598		2,994	6,001	8,997	11,998	15,002	18,011	21,008	2,063	1,298	3,269	6,142	9,098	12,073	15,060	18,047	21,041		
	T3	4,606	3,008		3,007	6,003	9,004	12,008	15,017	18,014	4,775	3,263	1,298	3,277	6,149	9,102	12,079	15,062	18,054		
	T4	7,605	6,007	2,999		2,996	5,997	9,001	12,011	15,007	7,711	6,139	3,268	1,295	3,270	6,140	9,095	12,069	15,056		
	T5	10,584	8,986	5,978	2,979		3,001	6,005	9,014	12,011	10,677	9,089	6,135	3,262	1,289	3,271	6,144	9,095	12,073		
	T6	13,594	11,995	8,987	5,988	3,009		3,004	6,014	9,010	13,660	12,067	9,090	6,132	3,257	1,287	3,270	6,139	9,095		
	T7	16,907	15,308	12,300	9,301	6,323	3,313		3,010	6,006	16,653	15,058	12,072	9,092	6,133	3,265	1,291	3,265	6,137		
	T8										2,997	19,655	18,058	15,067	12,078	9,097	6,145	3,272	1,289	3,255	
	T9										22,646	21,048	18,055	15,061	12,071	9,097	6,141	3,272	1,287		
	T10	1,301	2,058	4,779	7,707	10,658	13,647	16,945					1,601	4,601	7,604	10,607	13,604	16,605	19,601	22,602	
	T11	2,301	1,299	3,268	6,141	9,077	12,060	15,355					1,596		3,000	6,003	9,006	12,003	15,004	18,001	21,002
	T12	4,785	3,277	1,297	3,267	6,121	9,079	12,364					4,598	3,002		3,003	6,006	9,003	12,004	15,001	18,002
	T13	7,683	6,112	3,242	1,314	3,282	6,150	9,414					7,564	5,969	2,967		3,003	6,000	9,001	11,998	14,999
	T14	10,682	9,097	6,133	3,258	1,289	3,244	6,420					10,598	9,002	6,000	3,033		2,997	5,998	8,995	11,996
	T15	13,633	12,044	9,058	6,103	3,258	1,272	3,556					13,565	11,969	8,967	6,000	2,967		3,001	5,997	8,998
	T16	16,439	14,878	11,882	8,905	5,972	3,084	1,284					16,416	14,821	11,819	8,852	5,819	2,852		2,997	5,998
	T17																				3,001
	T18																				

Las tres Tablas 9, 10,11 de las matrices presentan las distancias medidas por el proceso topográfico entre todos los targets T1 a T18 y su correspondiente distancia calculada por coordenadas entre todos los puntos de los targets. Los datos de distancia medidos sobre cada una de las resoluciones alta, media y baja del escáner Faro Focus 3D de los targets cuadrículados T1 a T18 y entre cada uno de ellos. Debido a que el proceso topográfico fue el georreferenciado con varios controles de distancias al milímetro y lecturas de ángulos al segundo, se deja como base para poder compararlo con las otras tres resoluciones tomadas por el equipo para determinar cuál es la mejor resolución.

Otro proceso que se realizó y que se muestra a continuación en la Tabla 12, son los datos de las diferencias en metros de las distancias medidas en cada una de las resoluciones para cada uno de los puntos con sus respectivos errores. Por ejemplo en la medida de distancia del punto T2 con topografía fue de 1.600 m y del mismo punto con resolución 1/1 fue de 1.597 m, su diferencia fue de 0.003 m o sea 3 mm. Para el punto T9 con la medida topográfica fue de 22.608 m y con la misma resolución 1/1 de 22.602 m su diferencia fue de 0.006 m, (6 mm). En general se observa que las dos primeras resoluciones la 1/1 y la 1/8, presentan diferencias máximas de 6 mm y 7 mm y mínimas de 0 mm.

Tabla 12. Diferencias en distancias entre topografía y las tres resoluciones

	EJE 1				EJE 2		
	Res. 1/1	Res.1/8	Res.1/20		Res. 1/1	Res.1/8	Res.1/20
	diferencia	diferencia	diferencia		diferencia	diferencia	diferencia
T1				T10	0,006	0,002	0,001
T2	0,003	0,002	0,002	T11	0,002	-0,005	-0,241
T3	-0,006	-0,008	-0,012	T12	-0,004	-0,004	-0,006
T4	-0,002	-0,005	-0,005	T13	-0,004	-0,007	0,300
T5	0,002	0,000	0,012	T14	-0,004	0,000	0,002
T6	-0,001	0,001	0,003	T15	0,000	0,006	-0,031
T7	-0,001	-0,001	-0,306	T16	0,004	-0,002	0,215
T8	0,000	0,002		T17	0,002	-0,001	
T9	0,006			T18	0,005		

El análisis estadístico que se realizó fue el de regresión simple luego de generar las matrices, para poder comparar cada una de ellas y poder calcular sus diferencias sobre el punto medido. Se decidió utilizar el análisis de regresión simple, ya que su objetivo es la estimación de los parámetros donde supone encontrar la ordenada en el origen y la pendiente de una recta que mejor se aproxime a los puntos. O sea, el comportamiento de una magnitud puede ser explicada a través de otra. La regresión lineal es de uso en el análisis de datos bivariados. Estos datos vienen configurados en pares ordenados que tienen componentes asociadas a la variable X y a la variable Y, en este estudio son los datos topográficos y los datos de cada una de las tres resoluciones. Se ordenaron los pares ordenados y se dispusieron en un plano cartesiano que definiera una nube de puntos y que correspondiera a un diagrama de dispersión. Se buscó que todos los puntos guardaran una estrecha relación con un perfil particular para poder definir fácilmente su comportamiento. El perfil fue una línea recta. Se pretendía que los puntos se acercaran en gran medida a la recta.

La regresión simple se realizó con el software R. Haciendo la regresión lineal simple se esperaba que las distancias reales fueran iguales a las distancias medidas por cada una de las tres resoluciones, es decir que Distancia Real (DR), sea  $DR=R_i$ , donde  $i=1, 2, 3$ . Para hacer estas regresiones DR fueron los datos reales, R1, R2 y R3 fueron las distintas resoluciones siendo R1 la mayor resolución y R3 la más baja. Utilizando el software R, se obtuvieron los siguientes resultados:

Con la resolución 1/1:

$DR=R1-3.120 \times 10^{-4}$  con  $R^2=1$ , y teniendo los 153 datos que se tomaron y que se requirieron, se concluye que ajusta el 100%, pero además se adquiere una regresión casi exacta a la esperada.

Con la resolución 1/8 se trabajó con 120 datos:

$DR= 1.0004260R2-0.0022007$  con  $R^2=1$ , es decir que aunque esta resolución es muy buena, el número de datos es más pequeño, dado que con esta se puede predecir muy cerca el valor real no se obtienen los resultados tan cercanos como con la primera resolución.

Con la resolución 1/20 se trabajó con 91 datos:

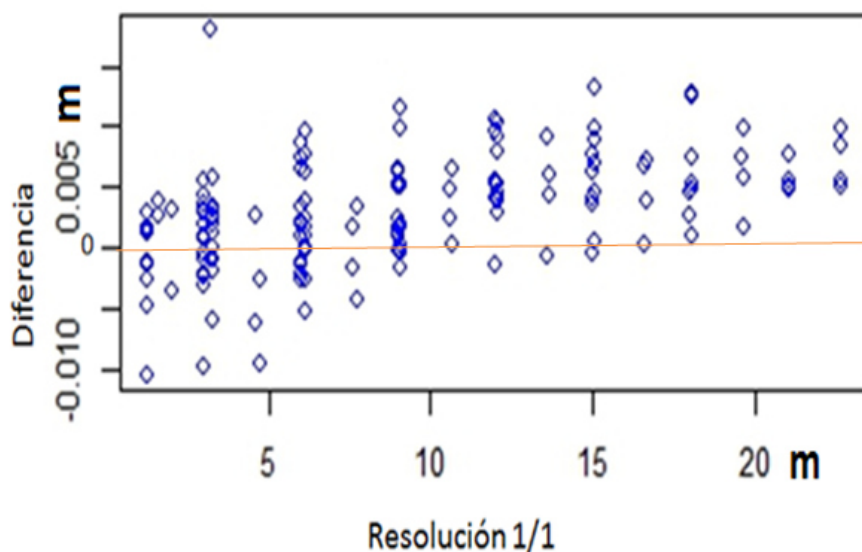


$DR=0.998132R^3+0.001874$  con  $R^2=0.9991$ , es decir que esta resolución, comparada con las otras dos no es buena, ya que no ajusta perfectamente con ellas y además los valores que se esperaban, se alejan más que con las anteriores.

Estadísticamente lo anterior fue lo que se hizo. Pero adicionalmente se hace un análisis gráfico teniendo en cuenta los errores en metros de cada resolución en el eje Y y en el eje X las distancias en metros. Visualmente se observa en las figuras de los diagramas de dispersión, donde muestra los datos reales versus cada una de las resoluciones, los puntos azules en rombos son la resolución 1/1 (Figura 47), los triángulos rojos son la resolución 1/8 (Figura 48), y las estrellas verdes son la resolución 1/20, (Figura 49).

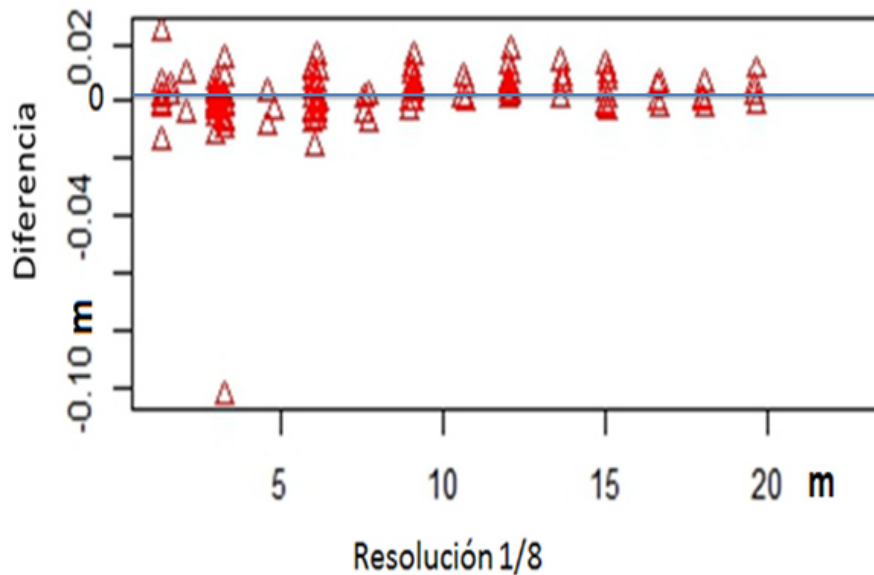
Como se observa en la Figura 47 de las diferencias de dispersión de los 153 datos y distancias en metros para cada escáner las separaciones de los datos no sobrepasan los 10mm de separación del punto cero. Con el escáner 1 o sea la de resolución 1/1, no pasa el valor del centímetro. Esto se presenta por la cercanía del escáner y su láser a los datos medidos. Se observa que a una distancia mayor de los 22 m los datos no están muy alejados de la línea de valor cero encontrándose entre los 5 mm y 10 mm de separación. La luz láser recoge en esta resolución buena información de los targets medidos. Los datos se encuentran concentrados cerca al valor cero en distancias pequeñas.

Figura 47. Diferencias de dispersión en distancia (m) de resolución 1/1 (153 datos)



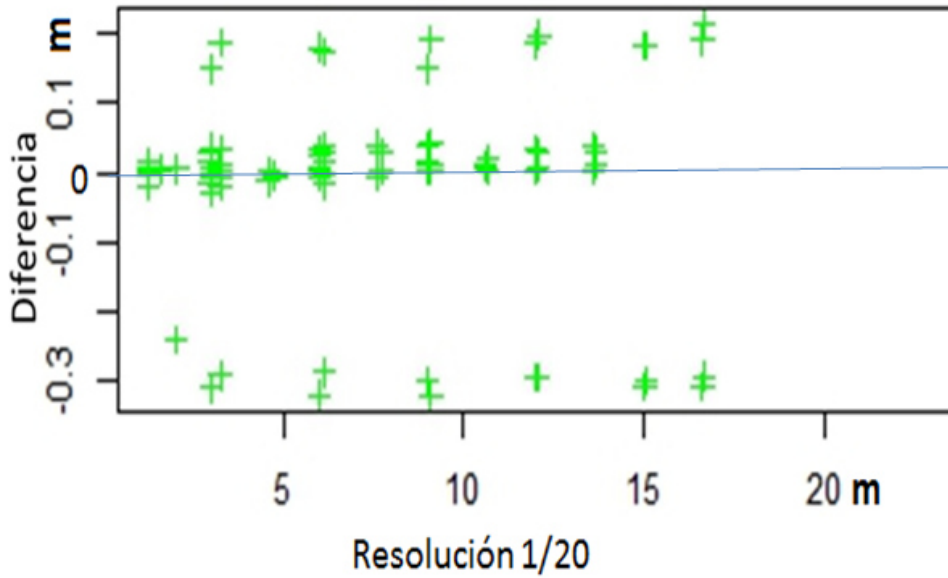
La Figura 48 que corresponde a la del scanner 2 con 120 datos, que es la resolución media de 1/8, a lo largo de toda la distancia muestra que las variaciones son muy pequeñas en los errores llegando a un rango de -0.02 m a +0.02 m en los mismos 20 m. En distancias pequeñas y a la mayor de 20 m las separaciones del punto cero son muy homogéneas.

Figura 48. Diferencias de dispersión en distancia (m) de resolución 1/8 (120 datos)



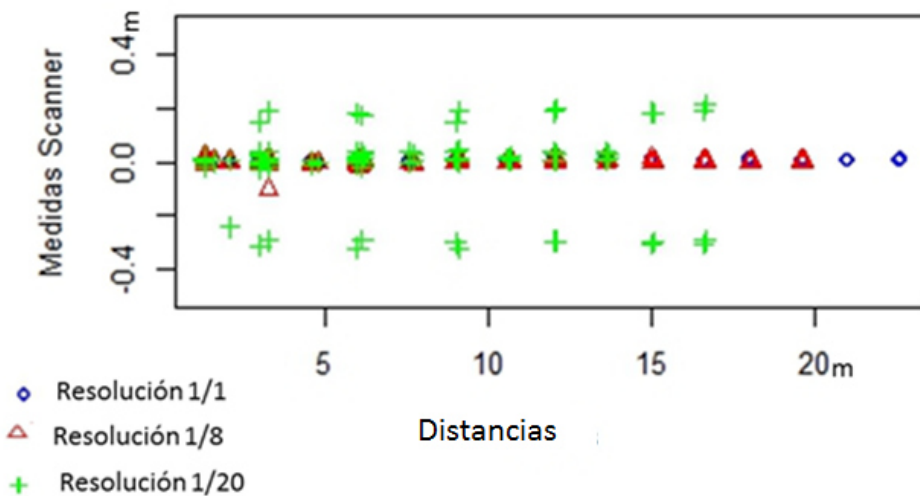
En la Figura 49 se presentan 91 datos de los resultados del scanner 3 de resolución más baja 1/20 donde la dispersión alcanza a los rangos de -0.30 m a +0.20 m. Se observa que en distancias menores a 15 m se presentan datos cercanos al valor cero, pero también en esas mismas distancias datos que están separados en 0.30 m del centro. No hay valores a distancias de 20 m o más. El grado de dispersión es alto, el láser recoge menos densidad de información.

Figura 49. Diferencias de dispersión en distancia (m) de resolución 1/20 (91 datos)



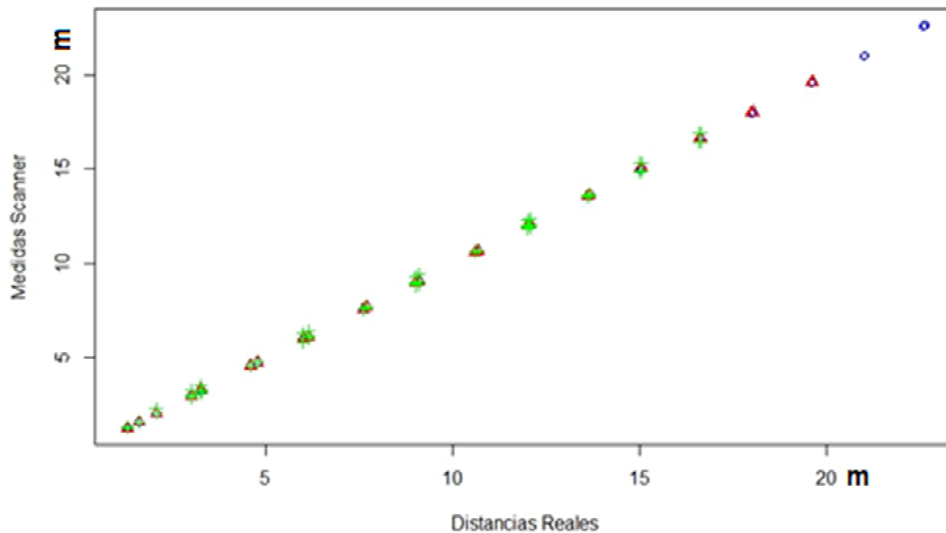
En la Figura 50 se muestra en conjunto todos los datos de errores, de las tres resoluciones. Lo que se observó es que los puntos azules rombos, se dispersan en menor distancia y se mantienen alrededor de cero y que los triángulos rojos mantienen el mismo comportamiento. En cambio las estrellas verdes se separan más del valor cero, aunque algunos a menor distancia en el eje X, no se dispersan tanto.

Figura 50. Gráfica con las diferencias de distancia en las tres resoluciones



Comparando las distancias reales con las medidas del escáner en las tres resoluciones Figura 51, dan una línea recta en donde solo la resolución alta de 1/1 obtuvo información de los puntos ubicados a 22 m, en todo caso se observa que el grado de dispersión no es muy alta, ya que no se alejan mucho de la recta estando los datos muy próximos a ella.

Figura 51. Medidas con escáner laser terrestre para distancia de 20 m y distancias reales



Las medidas de distancia y su separación son elementos importantes de analizar, ya que esta información es relevante para poder desarrollar el objetivo principal, porque delimita la distancia de colocación del escáner con respecto a los targets o puntos de unión de las escenas, al realizar los cambios del equipo para la poligonal, en el levantamiento o toma de información en el corredor que se desea trabajar, para la elaboración del modelo digital del terreno para los estudios de Geomática a escalas grandes.

Con respecto al tamaño de los archivos de escaneos generado en puntos y que están mostrados en la Tabla 4., para cada una de las tres resoluciones son bastante diferentes. Siendo la resolución 1/1 el 100% del tamaño, la resolución de 1/8 corresponde a un 12.5% de su tamaño y la resolución 1/20 es un 5% del tamaño de la resolución 1/1.

Estos porcentajes están muy relacionados con el tiempo que se muestran en la Tabla 4, de duración del escaneo, donde la resolución 1/1 es el 100% y la resolución 1/8 gastó un 8.4 % con respecto a la resolución 1/1 y la resolución 1/20 un 4% del tiempo de la resolución 1/1 en su duración.

Se analizó por otra parte y con base en los errores de medida presentados en la Tabla 13, el Error medio cuadrático (RMSE), de cada una de las resoluciones obteniendo los cálculos y tablas que se muestran a continuación en donde los valores de los errores de cada uno de los puntos están en mm. Esto con el fin de analizar también el estándar planimétrico ASPRS, donde se comparó con el error medio cuadrático del promedio de las diferencias al cuadrado en los valores de las distancias entre el levantamiento topográfico, de alta exactitud y la resolución. El RMSE es el resultado acumulativo de todos los errores, se comparó con la Tabla 2 en donde se presentan las precisiones en metros para las diferentes clases, donde las clases indican la exactitud horizontal planimétrica con que se desea trabajar, dependiendo de la escala. Con la fórmula para calcular el RMSE  $\bar{X}$  que se obtiene:

Tabla 13. Cálculos del error medio cuadrático RMSE para las tres resoluciones

Res. 1/1	Frec. Abs	Error <sup>2</sup>	
Error, xi (mm)	ni	Xi <sup>2</sup>	Xi <sup>2</sup> *ni
3	1	9	9
-6	1	36	36
-2	1	4	4
2	3	4	12
-1	2	1	2
0	2	0	0
6	2	36	72
-4	3	16	48
4	1	16	16
5	1	25	25
	17	suma	224

RMSE	4	mm
------	---	----

Res.1/8	Frec. Abs	Error <sup>2</sup>	
Error, xi (mm)	ni	Xi <sup>2</sup>	Xi <sup>2</sup> *ni
2	3	4	12
-8	1	64	64
-5	2	25	50
0	2	0	0
1	1	1	1
1	2	1	2
2	1	4	4
4	1	16	16
7	1	49	49
6	1	36	36
	15	suma	234

RMSE	4	mm
------	---	----

Res.1/20	Frec. Abs	Error <sup>2</sup>	
Error, xi (mm)	ni	Xi <sup>2</sup>	Xi <sup>2</sup> *ni
2,000	2	4	8
-12,000	1	144	144
-5,000	1	25	25
12,000	1	144	144
3,000	1	9	9
306,000	1	93636	93636
1,000	1	1	1
241,000	1	58081	58081
6,000	1	36	36
30,000	1	900	900
31,000	1	961	961
215,000	1	46225	46225
	13	suma	200170

RMSE	124	mm
------	-----	----

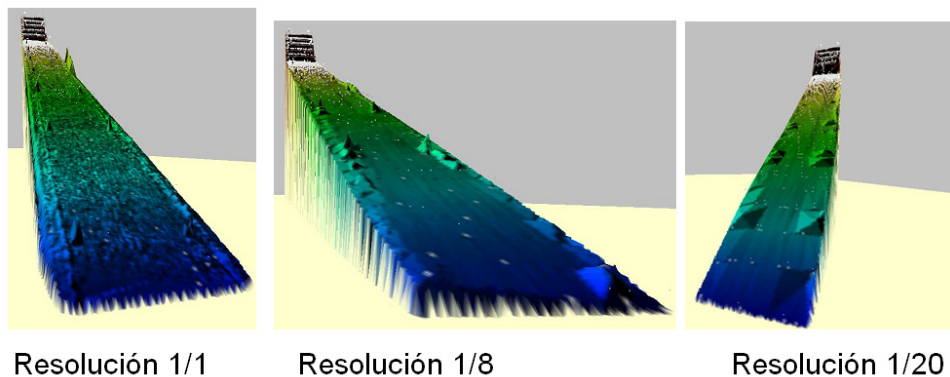
Para la clase 1 mostrada en la Tabla 2, que es la de mayor exactitud, se pueden trabajar mapas que para ingeniería y topografía van de escalas 1:50 a 1:2000, allí se presentan

rangos de valores que van de 0.0125 m a 0.5 m respectivamente. Los RMSE para las resoluciones 1/1 y 1/8 que fueron de 4 mm cumplen con estas escalas.

Se generaron las superficies con el software global Mapper de cada una de las tres resoluciones como lo muestra la Figura 52.

Siendo la Resolución 1/1 la que logra reunir debido a la densidad de puntos una mayor información sobre el terreno, como la textura y las características actuales que presenta el corredor de la zona rígida del andén. Entre tanto la resolución 1/8 presenta una semejanza a la resolución 1/1 en distancias cercanas al sensor láser pero en distancias mayores esta superficie debido al rayo láser se observan algunas pequeñas distorsiones, se puede decir que esta resolución resulta útil. En cuanto a la resolución 1/20 se muestran algunas deformaciones mayores de la zona, además de que su longitud se reduce ya que el sensor toma menos datos a cierta distancia, sin embargo esta resolución aporta información útil en cuanto a la topografía se refiere, dando una perspectiva cercana al terreno.

Figura 52. Superficies para las tres resoluciones



También se realizó un perfil, Figura 53, sobre cada resolución tomando para todos el eje izquierdo. Lo que se analiza es que las diferencias de altura para los tres perfiles no varían siendo el valor de 4.20m. Las distancias si varían, presentándose para la resolución 1/1 una de 22.66 m, 1/8 de 22.62 m y 1/20 de 22.25 m estos datos son importantes porque si realiza el cálculo de la pendiente del terreno sería de 18.53 %, 18.56% y una leve variación para el último de 18.87%.

Figura 53. Perfiles eje izquierdo (T10-T18)

