



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
"DR. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ"
FACULTAD DE GEOLOGÍA-MINAS

Trabajo de Diploma en opción al título de "Ingeniero de Minas"

*TEMA : PROCEDIMIENTO PARA LA
ELABORACIÓN DEL MODELO DIGITAL DE
ELEVACIONES MEDIANTE TECNOLOGÍA 3D
LÁSER ESCÁNER*

DIPLOMANTE: FABIÁN RICARDO OJEDA PARDO

**TUTORES: DR. C ORLANDO BELETE FUENTES
MSC. YORDANIS BATISTA LEGRÁ**

Curso 2012-2013

"Año 54 de la Revolución"



DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo, Fabián Ricardo Ojeda Pardo, autor del Trabajo de Diploma Procedimiento para la Elaboración del Modelo Digital de Elevaciones mediante Tecnología 3D Láser Escáner.

Certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Nuñez Jiménez”, el cual podrá hacer uso del mismo para fines docentes, educativos e investigativos.

Firma del autor

Los abajo firmantes, certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdos de la dirección del centro y el mismo cumple los requisitos que debe tener una investigación de esta envergadura, referida a la temática señalada.

Firma del tutor

Jefe del departamento de Minas

Jefe de la carrera “Ing. De Minas”





PENSAMIENTOS

“El principio de la sabiduría es el temor de Dios; los insensatos desprecian la sabiduría y la enseñanza”.

Proverbios 1-7

“Porque Dios da la sabiduría, y de su boca viene el conocimiento y la inteligencia”.

Proverbios 2-6

“Bienaventurado el hombre que halla la sabiduría y que obtiene la inteligencia”.

Proverbios 3-13





DEDICATORIA

Dedico este trabajo de diploma primeramente a Dios por haberme permitido cumplir una meta mas en mi vida, a mis padres por su apoyo, educación y amor hacia mi, a mis hermanos(as) sobrinos(as) en especial a mi sobrino Sammaelito quien en conjunto con mis Padres (Rosita y Benildo) han sido mi motivo mi fuerza y la razón de ser para yo cada día seguir adelante y alcanzar esta gran meta como lo es mi formación como profesional.

Le dedico también a quienes de una u otra forma me brindaron su apoyo incondicional.



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios todopoderoso por estar conmigo en todo momento y hacer que mi camino sea lleno de felicidad y de muchas bendiciones gracias Papá bendecido sea tu nombre.

A mis bellos padres (Benildo y Rosita) quienes a pesar de la distancia estuvieron y están siempre pendientes de mi, gracias papitos bellos porque me han sabido dirigir siempre por el camino del bien, los amo mucho que Dios los proteja .

A mis hermanos (Ramiro, Jackeline, Oliver, Wilmer, Johnny, Aracely, Gina) a mis sobrinos (Gissella, Rosita, Naty, Angie, John Steven, Sammaelito, Mathew, Dessire y Corinita) en especial a mi sobrinito Sammaelito porque tu junto con mis padres han sido mi fuerza y mi valentía para que yo cada día alcance nuevos logros y propósitos.

A todos los profesores del Departamento de Minas y de Geología, gracias por brindarme y transmitirme sus conocimientos de una forma correcta e incondicional y así formarme académicamente y permitirme culminar con éxito mi carrera y graduarme como un excelente profesional.

A mis tutores: Dr.C Orlando Belete Fuentes y MSc. Yordanis Batista Legrá gracias por haberme guiado y orientado en la culminación de este trabajo de diploma.

A la empresa de proyectos del níquel “Ceproníquel”, a la empresa minera Moa Níquel S.A Comandante “Pedro Sotto Alba”, gracias por permitirme realizar y vincular mi trabajo de diploma con la producción.

A mis amigos de distintos países y compañeros del aula en especial a Zariisse, Roilan, quienes más que mis amigos son mis hermanos quizá no de sangre pero si de espíritu porque somos hijos de un solo padre celestial Dios, gracias por estar siempre en los momentos en que mas los e necesitado.

A Gainza, Aracely, Martica y Rolando quienes han sido mis padres cubanos gracias por sus consejos los quiero mucho.

Doy mi agradecimiento especial a la Revolución Cubana por haberme dado la oportunidad de realizar mis estudios superiores y formarme como profesional en tan prestigiosa institución educativa como lo es el “Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa”.

Son muchas las personas a las que debo mi agradecimiento pero de manera general les agradezco a todos quienes han marcado huellas imborrables en mi vida en especial durante la estancia en este bello país a todos ustedes mil gracias que Dios les bendiga siempre.



RESUMEN

Este trabajo de investigación surge por la falta de un procedimiento para el empleo del 3D Láser Escáner en los yacimientos lateríticos, que permita crear los Modelos Digitales de Elevaciones (MDE) con precisión, por tal razón, surge como objetivo elaborar un procedimiento que permita a los Ingenieros de Minas y Topógrafos, utilizar la tecnología 3D Láser Escáner en la obtención de MDE.

Se elaboró un procedimiento que estuvo dirigido principalmente a evaluar las posibilidades reales de ejecutar los trabajos de obtención de un MDE empleando la tecnología de 3D Láser Escáner para incorporar en Cuba dicha actividad, con la finalidad de disponer de una nueva línea productiva para la minería.

Los resultados obtenidos en la aplicación del procedimiento demuestran que esta tecnología es la más productiva, eficiente y precisa para la obtención de los MDE en la minería.



SUMMARY

This investigation work arises for the lack of a procedure for the employment of the 3D Laser Scanner in the lateritic deposit that it allows to create the Digital Models of Elevations accurately, for such a reason, it arises as objective to elaborate a procedure that allows to the Engineers of Mines and Topographers, to use the technology 3D Laser Scanner in the obtaining of Digital Models of Elevations.

A procedure was elaborated that was directed mainly to evaluate the real possibilities to execute the works of obtaining of a Digital Model of Elevations using the technology of 3D Laser Scanner to incorporate in Cuba this activity, with the purpose of having a new productive line for the mining.

The results obtained in the application of the procedure demonstrate that this technology is the most productive, efficient and precise for the obtaining of the Digital Models of Elevations in the mining.



Indice

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I: ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL DE LA TECNOLOGIA 3D LÁSER ESCÁNER.....	4
1.1 Generalidades	4
1.2 Antecedentes de la tecnología 3D Láser Escáner.	4
1.3 Estado actual en el tratamiento del problema.	6
1.4 Descripción general del sistema 3D Láser Escáner.....	7
1.5 Tipos de Escáneres	8
1.5.1 Escáneres Terrestres y Aéreos	9
1.6 Precisión del sistema 3D Láser Escáner.....	10
1.7 Características de sistemas típicos.....	12
1.8 Modelo Digital de Elevaciones (MDE).....	14
1.8.1 Definición de modelo	14
1.8.2 Definición de Modelo Digital de Elevaciones	15
1.8.3 Método para la obtención de la información	15
CAPÍTULO II: PROCEDIMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DEL MODELO DIGITAL DEL TERRENO CON TECNOLOGÍA 3D LÁSER ESCÁNER	17
2.1 Generalidades.....	17
2.2 Planificación.....	17
2.2.1 Determinación de los objetivos.....	18



2.2.2 Análisis del área a levantar.....	19
2.3 Determinación de las posiciones óptimas del Láser Escáner.....	20
2.4 Determinación de las posiciones óptimas de los puntos de referencia.....	20
2.5 Gestión de los datos.....	21
2.6 Estacionamiento del Escáner.....	21
2.7 Conexión del Escáner al ordenador.....	22
2.8 Definición del área a escanear.....	23
2.9 Elección de la resolución.....	23
2.10 Toma de datos.....	26
2.10.1 Escaneado de la superficie del terreno.....	26
2.10.2 Escaneado de las dianas o puntos de referencia.....	26
2.11 Filtrado inicial.....	28
2.12 Medición de puntos de referencia o dianas.....	29
2.13 Comprobación de la toma de datos.....	29
2.14 Preparación de los datos.....	30
2.15 Registro y georreferenciación de datos.....	30
2.15.1 Registro y georreferenciación directa.....	31
2.15.2 Registro y georreferenciación indirecta.....	32
2.15.3 Aspectos generales del registro y la georreferenciación.....	33
2.16 Representaciones de las nubes de puntos.....	34
2.17 Filtrado del ruido y remuestreo.....	35
2.18 Modelado 3D de la superficie del terreno.Mallado y triangulación.....	36
2.19 Eliminación de vacíos.Optimización del modelo.....	37
2.20 Entrega del control de calidad.....	38



CAPÍTULO III: APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO EN LA NUEVA PLANTA DE PULPA DE LA EMPRESA COMANDANTE PEDRO SOTTO ALBA.....	40
3.1 Generalidades.....	40
3.2 Procedimiento para el modelado del terreno con 3D Láser Escáner.....	40
3.3 Caso de estudio.....	42
3.3.1 Trabajos de Campo.....	42
3.3.2 Trabajos de Gabinete.....	52
3.4 Análisis económico.....	55
3.4.1 Cálculo del costo del proyecto con Estaciones Totales.....	56
3.4.2 Cálculo del costo del proyecto con 3D Láser Escáner.....	56
3.5 Ventajas del sistema 3D Láser Escáner.....	58
3.6 Desventajas del sistema 3D Láser Escáner.....	58
CONCLUSIONES	60
RECOMENDACIONES	61
BIBLIOGRAFÍA	62
ANEXOS	64





INTRODUCCIÓN

Desde la antigüedad el hombre en su actividad multifacética como ser social, siempre necesitó y necesita hoy más aún, tener el conocimiento científico-filosófico del mundo material, incluida la tierra como planeta, Nuñez, Jover (2004).

Las aplicaciones más comprensibles por el ser social en general, relacionadas con la figura física real de la tierra y su representación, son los mapas. En los mismos se ubican e investigan la distribución espacial de la esencia y relaciones de la naturaleza, la sociedad humana y el pensamiento, así como sus variaciones en el tiempo mediante el empleo de diferentes modelos matemáticos fundamentalmente los Modelos Digitales de Elevaciones (MDE).

Los MDE que hoy en día se ejecutan en los yacimientos lateríticos cubanos, dependen en gran medida de la nueva tecnología de estaciones totales y sistemas de posicionamiento global (GPS) con el desarrollo científico técnico, el avance de la tecnología de instrumentos topográficos y la necesidad de optimizar los trabajos mineros con vista a mejorar la eficiencia y precisión, se hace necesario incorporar nuevas tecnologías que aporten al desarrollo minero, tal es el caso de la tecnología 3D Láser Escáner, un sistema que emplea las técnicas de la fotogrametría terrestre, utilizada con muy buenos resultados por compañías extranjeras en la Minería.

En Cuba, Las Fuerzas Armadas Revolucionarias (FAR) de conjunto con la Empresa Geocuba, adquirieron un Escáner de la marca Leica C-10, sin poder lograr la capacitación y solo han realizado escaneo en campo no han logrado el procesamiento de las nubes de puntos para crear el MDE, sin embargo en la Empresa de Proyectos del Níquel existen especialistas que trabajaron con esta tecnología de conjunto con topógrafos chilenos en trabajos realizados a la planta de Níquel Comandante “Pedro Soto Alba”.

Teniendo en cuenta la experiencia de los especialistas de la Empresa de Proyectos del Níquel, el apoyo de la Empresa Geocuba Habana, la capacitación en la Compañía Minera BIRA de Ecuador, la falta de un procedimiento de trabajo con esta tecnología, así como la necesidad de emplear el instrumento existente en el país y



preparar las bases para futuras inversiones en la industria del níquel, surge el tema de la investigación.

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Problema:

La necesidad de elaborar un procedimiento para la obtención de Modelos Digitales de Elevaciones mediante tecnología 3D Láser Escáner.

Objetivo general:

Elaborar un procedimiento que permita a los ingenieros de minas y topógrafos, utilizar la tecnología 3D Láser Escáner en la obtención de Modelos Digitales de Elevaciones.

Objetivos específicos:

1. Definir los antecedentes y estado actual de la tecnología 3D Láser Escáner.
2. Caracterizar los componentes de la tecnología.
3. Caracterizar los Modelos Digitales de Elevaciones.
4. Aplicar el procedimiento creado a un caso de estudio.

Hipótesis:

Si se conocen los antecedentes y estado actual de la tecnología 3D Láser Escáner y se caracterizan los Modelos Digitales de Elevaciones y los componentes de la tecnología, entonces es posible elaborar un procedimiento que permita la obtención de Modelos Digitales de Elevaciones.

Métodos empleados para dar solución al problema científico de la investigación:

- **Métodos empíricos:** Será imprescindible el empleo de la medición, como técnica: la observación científica y la entrevista, para el conocimiento de las características fundamentales del 3D Láser Escáner y los Modelos Digitales de Elevaciones.



- **Métodos teóricos:** Para la interpretación conceptual de los datos empíricos se utilizan los métodos: de **análisis y la síntesis** en el estudio de las partes del software Faro y el Modelo Digital de Elevaciones para comprender su comportamiento como un todo. Dentro de los métodos teóricos también será necesario la **inducción y deducción** como procedimiento para pasar de lo conocido a lo desconocido y de lo general a lo particular.
- **El método dialéctico:** Para conocer las relaciones entre los componentes del 3D Láser Escáner y los Modelos Digitales de Elevaciones.



CAPITULO I

ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL DE LA TECNOLOGÍA 3D LÁSER ESCÁNER.

1.1 Generalidades

En la actualidad, los 3D Láseres Escáneres son herramientas de gran utilidad en el diseño de ingeniería. Estos equipos permiten obtener objetos virtuales óptimos para realizar todas las simulaciones requeridas en un proceso de diseño. Estos Escáneres se utilizan a nivel mundial, basándose en los principios básicos de la fotogrametría terrestre, se aplica en muchas ramas de las ciencias y la producción, como Minería, Topografía, Geología, Geodesia, Criminalística, Ingeniería Civil, entre otras. Se toman registros de mediciones directas en campo en un tiempo muy inferior al que se realiza con los instrumentos de mediciones actuales (estación total, GPS, nivel Láser, etc.) Brenner, C. Aerial (2006). Nuestro propósito en este capítulo es tratar las condiciones actuales y perspectivas futuras de esta tecnología aplicada fundamentalmente a la rama de la minería.

1.2 Antecedentes de la tecnología 3D Láser Escáner

La tecnología 3D Láser Escáner ha venido evolucionando desde el surgimiento de la cámara fotográfica y la fotografía, posteriormente aparece la cámara de Polaroid y la fotografía instantánea y con ellas la necesidad de realizar mapificaciones de grandes áreas, Paz Marcela, Andrea Alejandra (2006). Los métodos directos para la creación de mapas y planos no eran suficiente para acometer estos trabajos que son de gran volumen, se estudia la posibilidad de realizar mediciones en fotografías aéreas y aparece la fotogrametría y con ella los levantamientos aéreos que resuelven la mapificación de grandes áreas. Se aplican los principios fotogramétricos a la fotogrametría terrestre con el fin de realizar estudios más detallados de una zona pequeña principalmente en fachadas de edificaciones, canteras, túneles, entre otros. Aparejado al desarrollo de la fotogrametría terrestre surgen instrumentos tales como: foteodolitos, cámaras fotográficas especiales, estaciones fotogramétricas. **Ver fotos 1.1 y 1.2.**



Foto 1.1 Fototeodolito



Foto: 1.2 Estaciones Fotogramétricas

Posteriormente surge la cámara digital y con ella la fotografía digital para realizar las tomas de imágenes con mayor resolución y calidad que las cámaras anteriores. Con el desarrollo científico y técnico se logra la automatización de la fotografía y con ello surge la fotogrametría digital y la cartografía digital, donde los procesamientos de la fotografía se realizan con alta calidad, menor tiempo y complejidad con respecto a los métodos antecesores. **Ver foto 1.3.**

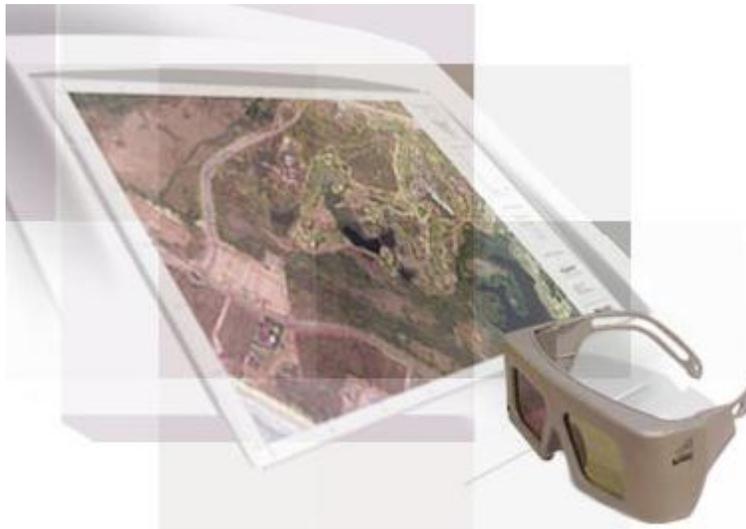


Foto 1.3 Fotogrametría Digital.

La tecnología 3D Láser Escáner. **Ver foto 1.4.** Se desarrolla con la implementación de la informática en la minería y la preocupación constante de los especialistas en tomar datos en campo con una mayor precisión y en un menor tiempo.



Foto 1.4 Tecnología 3D Láser Escáner.

En sus inicios, esta tecnología podía realizar escaneos a una distancia relativamente corta. Hoy en día se pueden realizar mediciones hasta 350 m, con una alta calidad y precisión. Los 3D Láseres Escáneres anteriores ejecutaban escaneos en los que posteriormente las imágenes se referenciaban con métodos directos (estación total, GPS). Los actuales, tienen un sistema de orientación interno que referencian las fotografías a un sistema de coordenada local. Brenner, C. Aerial (2006).

1.3 Estado actual en el tratamiento del problema

La industria del 3D Láser Escáner ocupa un rango amplio de estos equipos, abarca desde los Escáneres del tipo médico, los de documentos, los de barras que diariamente vemos en supermercados y también los llamados Escáneres de vehículos, que se materializan en una caja computarizada que prueba y verifica todas las partes funcionales del automóvil; todos ellos son de naturaleza completamente diferente. Se pretende con este estudio informar, sobre las bondades que ofrece este software para alcanzar mayores resultados en precisión y productividad, principalmente a los profesionales de la Topografía, Ingeniería de Minas, Civil, Mecánica Industrial, del Catastro, Sistemas de Información Geográficos, los que laboran en la Fotogrametría Terrestre, la preservación del Patrimonio Histórico y demás profesionales de las Artes o Ciencias, que necesiten de una representación fidedigna, con valores reales en coordenadas 3D de los diversos escenarios que integren un proyecto.



En Cuba, la única experiencia del empleo de la tecnología 3D Láser Escáner en la minería fue en el año 2008 en el proyecto expansión Moa Níquel, en que se obtuvo la participación de un conjunto de especialistas de la empresa del proyecto chileno HATCH y los topógrafos de CEPRONIQUEL; se generaron los Modelos Digitales de Elevaciones (MDE) en todo el área de la fábrica y las zonas destinadas para el movimiento de tierra de la nueva planta de pulpa que está proyectada para dicha empresa.

En Cuba se adquirió un solo instrumento por la FAR que lo emplean trabajadores de la Empresa GEOCUBA HABANA, pero que tiene la limitación de que no se ha podido procesar el MDE por la falta de capacitación. Pues las corrientes internacionales del comercio de estas tecnologías están en manos de los grandes países desarrollados, solo se limitan a la venta y no a la transmisión de conocimientos, por lo que es necesario preparar al hombre a partir de la investigación.

1.4 Descripción general del sistema 3D Láser Escáner

Según Brenner, C. Aerial (2006) un 3D Láser Escáner es un dispositivo por lo general montado sobre un trípode o plataforma estable que explora por medio de un fino haz de Láser los elementos del espacio circundante, en forma tal, que a cada punto del objeto explorado se le asigna las coordenadas reales que está ocupando en nuestro sistema de representación espacial. El dispositivo por lo general, se mueve a pequeños incrementos angulares de izquierda a derecha y entre cada incremento que representa una medida del ángulo horizontal del Escáner éste queda en forma estática y su telescopio o un espejo giratorio, se mueve de abajo hacia arriba y va disparando el Láser a intervalos predeterminados, calculando con esos disparos la distancia entre el Escáner y el punto donde la luz Láser se refleja y se devuelve. El margen del barrido vertical está de acuerdo con la ventana de exploración asignada. Este barrido de abajo hacia arriba o viceversa, representa el ángulo vertical de la observación, por lo tanto si se conocen las coordenadas asignadas al centro del Escáner y se conoce el ángulo horizontal, el ángulo vertical, y la distancia dada por el Láser, se calculan las coordenadas del punto explorado. Entonces es fácil entender que la precisión de las coordenadas obtenidas en cada



punto (para la medición de la distancia) depende de la precisión de que el equipo disponga y la precisión angular que el mismo exhiba.

1.5 Tipos de Escáneres.

Al definir los tipos de Escáneres se considera primero el rango de exploración o alcance máximo de su Láser y la tecnología empleada en el mismo para situarlos en un universo de aplicaciones. La variable más común es clasificarlos por la tecnología usada en la medición de distancia del Láser, Brenner, C. Aerial (2006). Estas tecnologías son principalmente, la medición por tiempo de vuelo y la medición por desplazamiento de fase.

El primer tipo o medidores por tiempo de vuelo de la señal se basan en la ecuación general de la velocidad y el espacio, se envían unos pulsos Láser que se reflejan en el objeto y se calcula el tiempo que tomó el pulso desde que salió del Escáner y regresó al mismo. Este tiempo representa el espacio de ida y vuelta, por lo que tomamos la mitad del mismo. El método necesita de relojes o bases de tiempo muy exactas ya que 1 nanosegundo (ns) representa 300mm de vuelo, lo que constituye un rango de 150 mm. La velocidad de muestreo en esta tecnología es moderada, los más modernos de este tipo trabajan a velocidades de hasta 128 KHz, es decir; toma de 128.000 puntos por segundo. El otro tipo de Escáner es los de medición por desplazamiento de fase. Una señal senoidal de unos 8 MHz, modula el Láser en amplitud y viaja hasta el objeto, se refleja y regresa hasta el Escáner, entonces bajo el principio de que un ciclo entero de fase, es decir 360° de la señal senoidal necesita recorrer el equivalente a la longitud de onda de la misma, se controlan las mediciones de fase en la salida y en la entrada del Escáner, por lo que en forma continua se tiene en un contador la distancia al objeto o punto explorado. Esta modalidad de medición por desplazamiento de fase permite un muestreo mucho más rápido que con el de tiempo de vuelo, muestreos de hasta 1.2 MHz (1.200.000 puntos por segundo). Se debe agregar que después de alcanzada la distancia de la longitud de onda de la señal senoidal moduladora, el contador de distancia se pone otra vez en cero, es decir; se encuentra con un proceso de ambigüedad. Estos equipos son muy precisos, y muchos de ellos son de precisión sub milimétrica pero



limitados por lo general a distancias de medición inferiores a los 100 m, han anunciado sistemas de fase con modulación de dos y tres señales al mismo tiempo que permiten al vuelo corregir la ambigüedad en rangos muchos más altos, estos sistemas son muy recientes pero prometen nuevas perspectivas en los diseños.

1.5.1 Escáneres Terrestres y Aéreos.

Según Paz Marcela, Andrea Alejandra (2006) existe una versión dinámica de los mismos, que es básicamente un sistema compuesto por uno o dos Escáneres montados sobre el techo de un vehículo, donde los Escáneres exploran a la derecha e izquierda del mismo, un corredor de unos 300 m de ancho con detalles milimétricos de todos los puntos del terreno que va recorriendo. Este vehículo lleva montado un sistema GNSS (GPS + GLONASS + GALILEO), conjuntamente con una plataforma inercial que mantiene la precisión en las coordenadas en los momentos de sombra, es decir; cuando los satélites son insuficientes para mantener el tiempo real en forma dinámica.

Además existen los Escáneres Aéreos o LIDAR, los cuales consisten en un dispositivo Láser montado sobre un helicóptero o en un avión, apuntando hacia abajo, que barre una ventana de 45° aproximadamente de derecha a izquierda y viceversa y con el movimiento de la nave sobre una ruta pre programada va tomando los puntos de un pasillo o corredor que de acuerdo a la altura de la aeronave presenta un mayor o menor ancho de cobertura exploratoria. Estos sistemas montados en helicópteros, cubren más o menos 200 m, lateralmente al eje de vuelo. Paz Marcela, Andrea Alejandra (2006).

Montado a bordo de aviones, se efectúan vuelos más altos y los pasillos o corredores pueden alcanzar el ancho de un kilómetro. También van equipados de un sistema GNSS por lo general en tiempo real o cinemático con post proceso, que proporcionan puntos de coordenadas con valores de error inferior a 2 cm. Estos sistemas, conjuntamente con una cámara digital son las bases de la fotogrametría moderna. Ya en varios países existen varias empresas que están levantando corredores para diseño de vías férreas o estudios de líneas eléctricas.



Con frecuencia, se suelen clasificar los Escáneres dependiendo de la ventana de visibilidad de los mismos que está asociada a su tecnología óptico-mecánica. Los tipos de Escáneres de acuerdo a la visibilidad son:

- **Tipo cámara.** Por lo general el cuerpo no gira horizontalmente y su campo de vista está limitado a ángulos desde 30 a 45° en la horizontal y unos 60° máximos en la vertical. Están bastante limitados a un ancho de escena específicos y consisten desde el punto de vista óptico en un espejo interno que incrementa su ángulo horizontalmente, para que otro espejo interno realice un barrido desde arriba hacia abajo o viceversa, disparando el Láser en los incrementos adecuados al sistema.
- **Híbrido.** El cuerpo del equipo gira a pequeños intervalos horizontales, en cada intervalo el espejo oscilante se mueve desde arriba hacia abajo en forma similar a los del tipo cámara, entre estos están: el F+Z, el cual es similar en forma a una estación total topográfica. Existen otros como por ejemplo los de RIEGL que tienen en vez del espejo oscilante un prisma giratorio poligonal a alta velocidad y realiza un barrido súper rápido, como es en el caso del RIEGL VZ-400 que toma puntos a velocidades de 128.000 m/s, siendo éste el más rápido en esta categoría. Con algunas limitaciones en el barrido vertical, puede girar 360° y tomar todo lo que tiene alrededor.
- **Panorámico.** Estos Escáneres giran horizontalmente, tienen a sus vez un espejo rotativo vertical de alta velocidad, que les permite tomar prácticamente todo lo que tienen a su alrededor exceptuando la parte inferior donde está situado el trípode. Suelen ser del tipo de desplazamiento de fase limitados en distancia, algunos como el Callidus o los de Faro, suelen muestrear a velocidades superiores al millón de puntos por segundo.

1.6 Precisión del sistema 3D Láser Escáner

Según José Luis Lerma García, Josep Miquel (2008), para determinar cuáles son las precisiones que se pueden alcanzar con un sistema 3D Láser Escáner se deben distinguir de forma clara las principales fuentes de error en el proceso de toma de datos, los cuales están asociados a las presiones de los componentes del sistema:



- Equipo GPS, a través del cual se define las coordenadas del punto de cada toma.
- La Unidad de Navegación Inercial (INU) tiene el objetivo de estimar la posición entre los puntos fijos GPS (puntos de referencia ubicados en la zona de estudio).
- La Unidad de Medida Inercial (IMU) esta controla la dirección en la que apunta el Láser.

En la fase de construcción de los MDE producidos a partir de observaciones con el 3D Láser Escáner se pueden distinguir las siguientes fuentes de error:

- Errores de cota del sistema de medida del sensor.
- Errores horizontales del sistema de medida del sensor.
- Errores del proceso de etiquetado procedente de la identificación de un retorno de suelo confundiendo con otro tipo de retorno.
- Variación de la presión en función del diámetro del rayo Láser.

Las presiones nominales son las siguientes:

- Precisión absoluta vertical (superficies planas):
±0.10 - 0.25m en superficies duras.
±0.25 - 0.30m en superficies blandas.
- Superficies accidentadas:
±0.30 - 0.50m en superficies blandas.
- Precisión absoluta horizontal (terreno extremadamente montañoso):
±0.75 – 1.0m.

Se puede decir que los errores están asociados a los componentes del sistema de posicionamiento.

La precisión, como en cualquier otro instrumento de medición, viene dada porque cerca está la medición realizada con el Escáner de la medición verdadera, expresada generalmente como la media cuadrática de las observaciones. **Ver figura 1.1.**

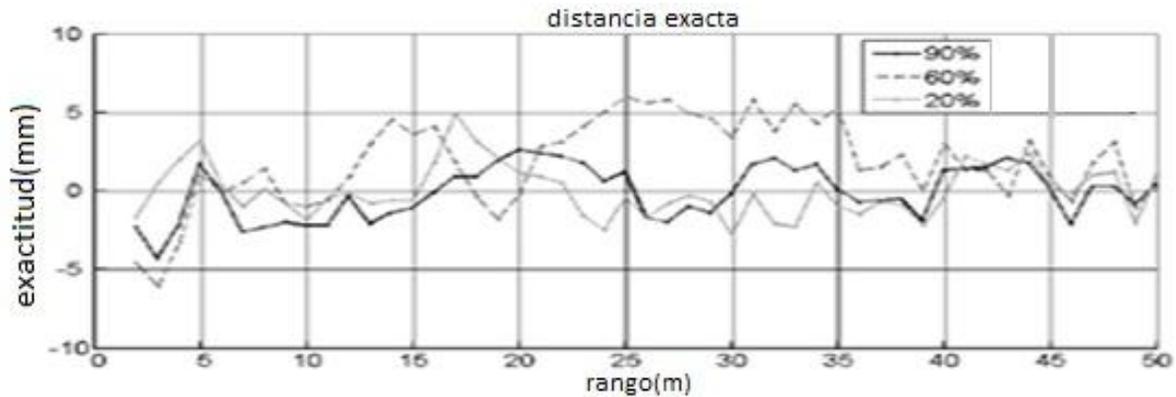


Figura 1.1. Representación gráfica de la precisión del Escáner.

De nuevo se establece el compromiso entre las diferentes tecnologías; el Escáner basado en el desplazamiento de fase con menor rango, son los más precisos, suelen estar por debajo de los 3 mm en todo su rango de medición. Los basados en tiempo de vuelo de la señal, exhiben a corta distancia una menor precisión, queda completamente compensada a distancias intermedias y largas. Típicamente estos Escáneres muestran precisiones entre 5 y 15 mm. Debido a que la precisión está asociada a la reflectancia de los objetos, es común que los fabricantes muestren la precisión bajo una reflectancia del 18%. José Luis Lerma García, Josep Miquel (2008).

1.7 Características de sistemas típicos.

Como ejemplo de estas especificaciones vamos a mostrar un producto que TOPCON ha presentado recientemente. **Ver foto 1.5.** La industria cubana del níquel pretende adquirir en el año 2013 este instrumento, con el objetivo de ejecutar el aseguramiento topográfico para la minería.



Foto 1.5 3D Láser Escáner GLS-1000

El GLS-1000 es un Escáner auto contenido de medio alcance con un poderoso sistema de comunicación WiFi que permite incluso controlarlo mientras nos encontramos sentados dentro del vehículo. Tiene un compensador de doble eje, una batería integrada y almacena en su propia memoria los datos.

Características del sistema GLS-1000

- Alcance máximo con reflectividad específica 330m al 90%, 150m al 18%
- Alcance calculado al 18% de reflectividad 150m.
- Mantiene el enfoque y la misma precisión desde 1m hasta 150 metros.
- Alcance Mínimo 1m.
- Precisión típica de un solo punto precisión en distancia: +4mm a 150m
- Precisión angular 5 s.
- Tecnología de Medición Pulsos, tiempo de vuelo de la señal.
- Color Invisible (Láser seguro al ojo humano) se puede usar inclusive en aeropuertos.
- Clase del Láser Clase 1 / El GLS-1500 tiene una matriz prismática que conserva el enfoque.
- Velocidad de escaneo GLS-1000 captura 3,000 puntos/segundo, y el GLS-1500 toma 30.000 puntos/segundo.
- Densidad del escaneo (Resolución) Punto Láser: 6mm en 40m, densidad máxima de muestreo: 1mm a 100m.



- Campo de visibilidad (Por escaneo) ----- Ventana de escaneo horizontal: 360° (máximo) vertical: 70° (máximo).
- Cámara digital (2.0 mega pixeles digital camera).

Propiedades eléctricas

- Fuente de Poder Batería en el propio aparato de Litio-ion BT-65Q x4.
- Consumo de Corriente <25W.
- Tiempo máximo de operación Aprox. 4.0 horas por 4 Pc.
- Intercambio de baterías en caliente remplazo sin apagar (2 por 2).

Ambientales

- Temperatura de Operación +32°F a +104°F (0°C a +40°C).
- Temperatura de Almacenamiento +14°F a +140°F (-10°C a +60°C).
- Sellado al Poli/Humedad IEC Especificación IP52.

Físicas

- Dimensiones 9.5 in. x 9.5 in. x 22.3 in. (240mm x 240mm x 566mm).
- Peso 35 lbs. (16kg) sin baterías y sin base niveladora.

1.8 Modelo Digital de Elevaciones (MDE)

1.8.1 Definición de modelo

Según la Real Academia Española (RAE) modelo se define como un "Esquema teórico, generalmente en forma matemática de un sistema o de una realidad compleja, como la evolución económica de un país que se elabora para facilitar su comprensión y el estudio de su comportamiento."

En el área de la cartografía, la modelación en tres dimensiones (3D), de la superficie terrestre y de elementos sobre esta permite un mayor entendimiento del terreno. La confección de modelos en forma automatizada ha permitido el manejo de mayor información en un periodo de tiempo menor, optimizando de esta forma el proceso involucrado en la obtención de dicho modelo, reproduciendo solo algunas propiedades del sistema original que se ve representado por otro sistema de menor complejidad, al momento de elaborar un modelo debe existir una relación de simetría



entre el objeto real y el modelo de manera reversible permitiendo obtener una simulación del terreno.

Se debe tener presente que un modelo al ser una simplificación de la realidad tiene asociados errores inherentes que pueden ser reducidos pero no eliminados.

Los modelos se clasifican en: modelo análogo, icónico y simbólico o matemático. El modelo a emplear en esta ocasión se refiere a un modelo simbólico o matemático que se define como:

Modelo simbólico o matemático

Son representaciones simplificadas de la estructura y el funcionamiento de un determinado sistema real, utilizando el lenguaje matemático para expresar las relaciones entre variables y operaciones matemáticas para obtener los conocimientos deseados, José Luis Lerma García, Josep Miquel (2008).

Los MDE se incluyen en esta última categoría y consecuentemente las relaciones de correspondencia que se establecen con el objeto, tienen la forma de algoritmos o formalismos matemáticos.

1.8.2 Definición de Modelo Digital de Elevaciones

"Un Modelo Digital de Elevaciones (MDE), se define como una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno", Felicísimo (2004).

La forma geométrica de representar un MDE es una función bivariable continua:

$$z=F(x, y) \quad (1.1)$$

Donde:

z-Representa la altitud del terreno en el punto de coordenadas x, y; (m).

F- Es una función que relaciona la variable con su localización geográfica.



En un MDE se aplica la función anterior sobre un dominio espacial concreto. En consecuencia, un MDE puede describirse genéricamente como $MDE = (D, F)$, (Felicísimo, 2004).

1.8.3 Método para la obtención de la información

La obtención de la información para la generación de un MDE es posible mediante variadas fuentes utilizando técnicas especializadas, la elección de la fuente de información tiene relación con la calidad del MDE según los requerimientos de un MDE: Métodos directos e indirectos.

Métodos directos

Este método captura la información a partir de mediciones que se realizan directamente sobre el terreno. Algunas tecnologías que utilizan este método son: GPS, levantamientos topográficos tradicionales y altimetría radar o Láser.

Altimetría (mediante radar o Láser transportados por plataformas aéreas o satélites). La mayor ventaja de estas tecnologías es que se trata de un método de captación remota de información por lo que la toma de datos no se encuentra limitada por la accesibilidad a la zona de interés. La tecnología 3D Láser Escáner mide de una forma directa puntos del terreno con densidad muy elevada dependiendo de la frecuencia de barrido etc. Una ventaja importante de esta técnica es la posibilidad de medir en zonas de vegetación debido a la capacidad de penetración del Láser.

Métodos indirectos

Estos métodos utilizan información de documentos analógicos o digitales pre existente para la medición de datos para la posterior generación de un MDE. Los métodos indirectos son:

- Restitución a partir de imágenes satelitales o fotografías aéreas.
- Interferometría radar.
- Digitalización de mapas topográficos.



CAPÍTULO II

PROCEDIMIENTO PARA LA ELABORACIÓN DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES MEDIANTE TECNOLOGÍA 3D LÁSER ESCÁNER.

2.1 Generalidades

Utilizar un 3D Láser Escáner en la elaboración de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) no es sólo presionar un botón y esperar a que se obtengan los resultados. Se requiere un profundo conocimiento del instrumento y del proceso de escaneado. Algunos pasos del proceso de escaneado son bastante automáticos mientras que otros todavía requieren una labor intensa. En este capítulo se describe el procedimiento del escaneado Láser terrestre el cual se divide en trabajos de campo y trabajos de gabinete.

Trabajos de campo

Es el proceso más sencillo del trabajo de campo, en comparación con otras tecnologías tales como: estaciones totales y GPS. Se divide en los pasos siguientes:

2.2 Planificación

En los resultados de la investigación no encontramos ningún proceso estándar para la planificación de un escaneado Láser terrestre, solo contamos con la experiencia práctica de los topógrafos de la Empresa de Proyectos HATCH, durante los trabajos para la Expansión de la Fabrica Comandante Pedro Soto Alba, así como los resultados de entrevistas realizadas a mineros chilenos, peruanos y ecuatorianos, donde todo el estudio coincide en que la planificación debe contener, como mínimo, los siguientes puntos: **Ver Figura 2.1.**

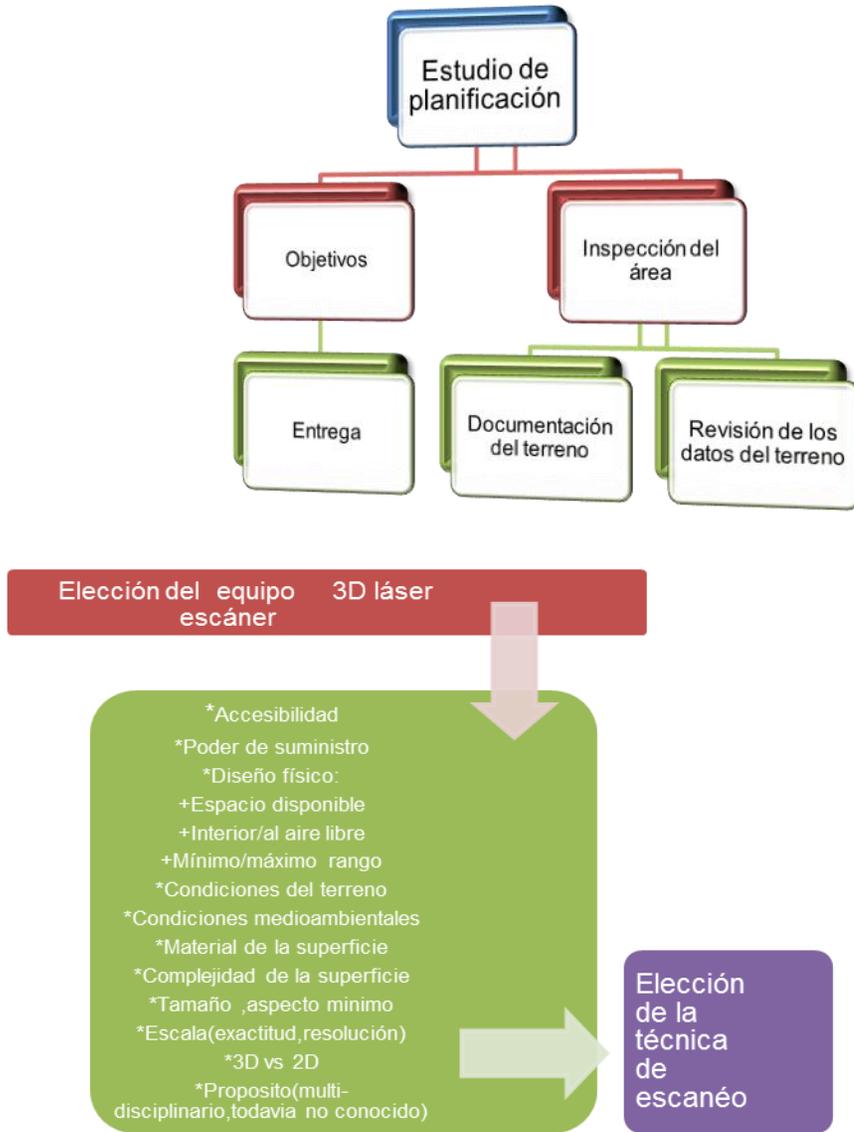


Figura 2.1 Diagrama de la planificación

2.2.1 Determinación de los objetivos

Cuando se escanea, uno de los puntos clave, para obtener un MDE, es la necesidad de los mineros. Primeramente. ¿Por qué el minero quiere que modele el terreno y qué quiere hacer con los datos?

La justificación de la necesidad de modelar una porción del terreno puede proporcionar una idea acerca de los requerimientos en los resultados y en la



precisión. En Cuba por ejemplo al utilizar esta tecnología nos encontramos con dos situaciones, el minero puede pensar que el escaneado Láser es la herramienta perfecta para su problema, porque ha escuchado que una buena compañía lo ha usado, por otra parte puede no estar seguro del escaneado Láser porque es escéptico y confía más en las técnicas tradicionales.

¿Qué resultados necesita?

En relación con la tarea a resolver a partir del MDE en la Mina, necesitamos definir los documentos a entregar. Estos documentos pueden ser planos con modelos 3D o incluso animaciones 3D. En algunos casos puede que el minero sólo quiera la nube de puntos cruda con la finalidad de archivarla. Particularmente importante es el nivel de detalle de los documentos a entregar (informe técnico) porque ello ayuda a determinar la resolución (densidad de puntos) no se utiliza la misma resolución y densidad de puntos para realizar el cálculo de volumen que para proyectar una cantera o camino minero.

2.2.2 Análisis del área a levantar

Recopilar la mayor cantidad de información sobre el terreno a modelar nos da una idea de la complejidad y del tiempo necesario para llevar a cabo la tarea. La resolución requerida y la precisión de la documentación vienen condicionadas por la escala del levantamiento o por la entidad mínima reconocible en los productos finales que se entregan: Notas de campo, informes, mapas, fotografías o videos del lugar, pueden ayudar a determinar los posibles riesgos del momento de captura de igual modo que levantamientos anteriores que pudieran haber sido realizados con otras técnicas de mediciones a mano, con GPS o con estación total. Paz Marcela, Andrea Alejandra (2006).

El terreno puede estar emplazado en un lugar de difícil acceso, debido a las labores mineras: con obstrucciones, limitando los estacionamientos posibles del Escáner, o puede haber restricciones temporales para acceder al lugar. Usando todos estos datos se puede tomar una decisión acertada acerca de la técnica más adecuada de escaneo.



2.3 Determinación de las posiciones óptimas del Láser Escáner

Una vez recopilada la información del sitio a modelar hay que planificar el emplazamiento del equipo Láser Escáner así como los puntos de referencia.

Las posiciones óptimas para el estacionamiento del Escáner se deben elegir de manera que garanticen una máxima cobertura y precisión y al mismo tiempo se minimice el número de inicializaciones. La precisión de la medición depende del diámetro de la huella del Láser, indicándose que el ángulo de incidencia y el alcance son de gran importancia para determinar la posición del Escáner. Paz Marcela, Andrea Alejandra (2006).

Es importante tener en cuenta un conjunto de reglas prioritarias cuando se determina la posición óptima del Escáner:

- Comprobar que las posiciones cubren la mayor área posible sin obstáculos en la línea de vista y que se producen las menos sombras posibles.
- Comprobar que se cumplen los alcances mínimos y máximos para alcanzar la precisión requerida. Cuanto mayor sea la distancia al objeto menor será la precisión y la resolución.
- Minimizar la aparición de pequeños ángulos de intersección. Con ángulos muy agudos el haz Láser no se refleja tan bien por lo que la precisión del Escáner es menor.
- Intentar reducir el número de estacionamientos.
- Elevación del Escáner sobre el suelo.
- Visibilidad de los puntos de referencia artificial o natural.

2.4 Determinación de las posiciones óptimas de los puntos de referencia

Junto a las posiciones óptimas del Escáner, los tipos de puntos de referencia, sus posiciones y la configuración geométrica, también son importantes. Los puntos de referencia se usan principalmente para registrar los escaneados realizados desde diferentes posiciones empleando dianas de control. Brenner, C. Aerial (2006).



Cuando se utilizan dianas esparcidas lo más ampliamente posible, en las direcciones de los ejes X, Y, y en la dirección del eje Z; se establece que, debe haber al menos 4 puntos de referencia bien distribuidos en cada escaneado. **Ver figura 2.2.**

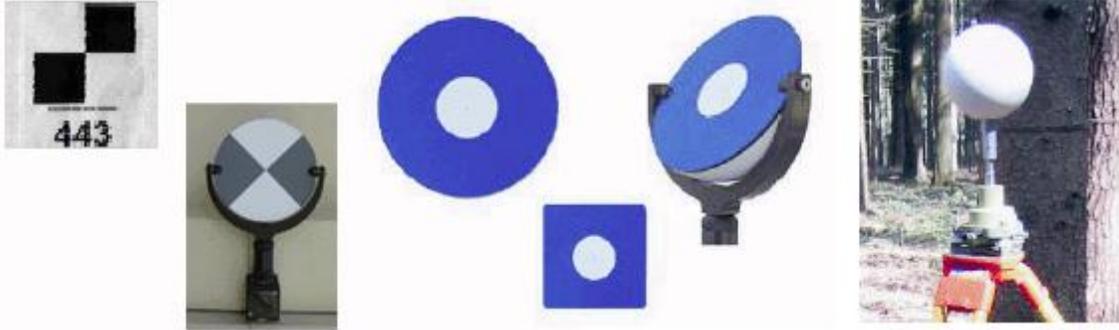


Figura 2.2 Tipos de dianas artificiales

2.5 Gestión de los datos

Es importante revisar el almacenamiento de los datos antes de empezar a escanear. Por ejemplo, utilizando un Escáner *Faro Focus*, un escaneado ocupa 140 Mb aproximadamente. Con una media de 20-30 escaneados al día, se genera un total de 7GB aproximadamente. Esto requiere una prudente planificación. Los Escáneres modernos requieren de más capacidad de almacenamiento así como de mayor velocidad en la toma de los registros de campo.

2.6 Estacionamiento del Escáner

El estacionamiento de un Escáner sigue generalmente un procedimiento similar al de una estación total. Se llevan a cabo los siguientes pasos:

- Montaje del trípode: Se abre el trípode y se extienden sus patas. Hay que asegurarse de que el trípode está en un suelo estable. Normalmente, el Escáner se coloca a la altura de los ojos. Cuando la superficie del suelo tiene que ser escaneada es mejor una posición más alta porque proporciona un mejor ángulo de inclinación.
- Sujetar el Escáner al trípode colocándolo sobre él y anclándolo.
- Dependiendo de la técnica de registro, el Escáner se deberá poner sobre un punto de referencia conocido.

- Nivelar el Escáner; variando la longitud de dos de las patas del trípode, se nivela la superficie superior utilizando niveles teóricos. La burbuja debe estar dentro del círculo interior. **Ver figura 2.3.**

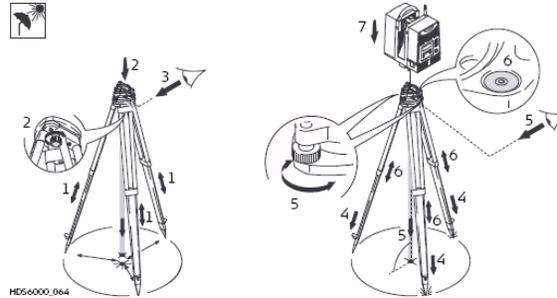


Figura 2.3 Estacionamiento de un Láser Escáner

2.7 Conexión del Escáner al ordenador

Antes de encender el Escáner, debe estar conectado a un ordenador portátil que pueda recibir y almacenar todos los puntos que tome y controle sus propiedades. La energía se puede suministrar mediante baterías, un generador o directamente de la red eléctrica. Para conectar un Escáner a un ordenador se deben de seguir los pasos siguientes:

- Conectar el Escáner al ordenador mediante el cable apropiado (cable de red estándar para los primeros Escáneres o un cable FireWire para los más modernos).
- Conectar la batería al Escáner.
- Quitar la tapa de la lente del Escáner y desbloquear el Escáner (la mayoría de los Escáneres panorámicos tienen una llave de bloqueo para protegerlos de movimientos mientras se transportan).
- Encender el Escáner y esperar a que se caliente.
- Abrir el programa del ordenador portátil.
- Establecer la conexión entre el ordenador y el Escáner (mediante dirección IP, cable USB, conexión wireless).
- Abrir el programa de control del Escáner e inicializar la conexión.



Cuando el programa de control del Escáner ya ha establecido conexión con el Escáner, hay que especificar los parámetros que se van a usar en el proceso de escaneado.

2.8 Definición del área a escanear

Los Escáneres tienen un panel de control minimizado que puede definir el área a escanear. Esta forma es muy aproximada, pero muy rápida. Generalmente se define mediante el control en el programa, con este método, primero se captura una imagen de la escena y luego seleccionamos sobre la imagen el área a escanear. **Ver Figura 2.4.**

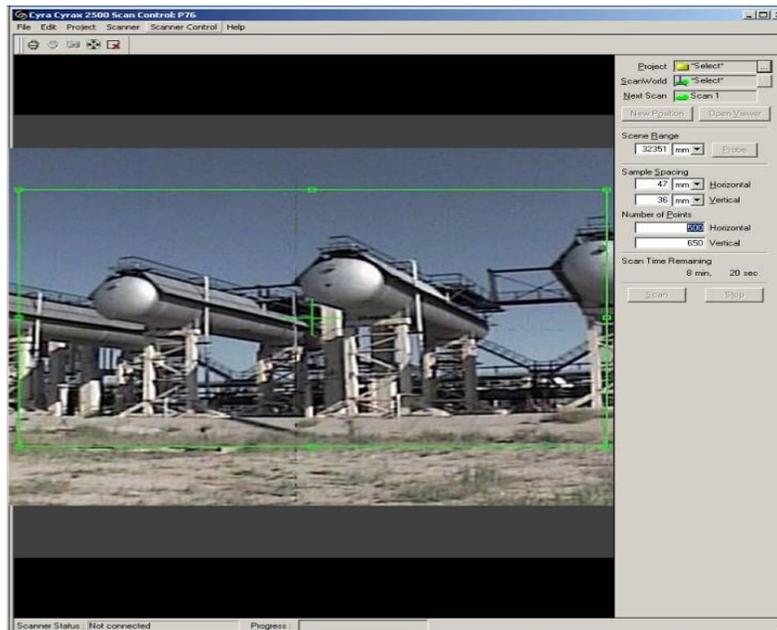


Figura 2.4 Definición del área a escanear

2.9 Elección de la resolución

Cuando se utiliza un Escáner es importante elegir la correcta resolución, esta se define como la distancia entre dos puntos medidos consecutivamente, de esta manera se determina la densidad de puntos de la nube.

Según Brenner, C. Aerial (2006), existe una relación entre precisión y resolución, definen aspectos diferentes del proceso de escaneado. La resolución queda determinada por el detalle de menor tamaño que se necesita reconocer en el



resultado final. Por tanto, está directamente relacionado con la escala del resultado. Los Láseres Escáneres superan el proceso inteligente que hacemos los humanos cuando analizamos una cantera, (por ejemplo dividir una cantera en planos, líneas y puntos) al tomar una gran cantidad de puntos con información redundante. Por ejemplo: en áreas suaves como planos se necesitan menos puntos para modelar el terreno, mientras que en superficies con mayor curvatura se necesitan muchos más puntos.

Cuanta más alta sea la resolución, se necesitará escanear más puntos, por tanto, se tardará más. Además del tiempo, el tamaño de los datos almacenados también aumenta. Se debe tener presente que escaneando con una resolución mayor que la precisión de cada punto se puede producir un muestreo excesivo. José Luis Lerma García, Josep Miquel (2008).

Como la mayoría de los Escáneres trabajan con un ángulo constante entre dos puntos consecutivos (basado en coordenadas polares) la resolución del Escáner estará definida para una cierta distancia al Escáner. Esta distancia se puede introducir manualmente a través del software o se captura la distancia a un punto y se define la resolución a esa distancia del Escáner. Los puntos escaneados a una distancia mayor tendrán una resolución menor, mientras que los puntos más cercanos tendrán una resolución más alta.

Según Brenner, C. Aerial (2006) se aconseja tomar un punto de muestra en la zona más alejada del Escáner. Algunos programas de control del Escáner nos dan rápidamente los ajustes para la resolución, como por ejemplo: la resolución más baja, la media y la más alta. Estos ajustes rápidos establecen un valor de resolución para una cierta distancia. En el manual del Escáner aparecen tablas que muestran la resolución efectiva a varias distancias para cada configuración de ajustes.

English Heritage, una institución del Reino Unido con bastante experiencia en la gestión de entornos históricos, creó una tabla que ayuda a determinar la apropiada resolución para un proyecto aplicado a la restauración. **Ver tabla 2.1.**



Tabla 2.1 Resolución de puntos.

Tamaño del aspecto	Ejemplo del aspecto	Densidad requerida para conseguir que el 66% del aspecto sea visible	Densidad requerida para conseguir que el 95% del aspecto sea visible
10000mm	Densidad máxima del terreno	3500mm	500mm
1000mm	Densidad mínima del terreno	350mm	50mm
100mm	Densidad para detalles	35mm	5mm
10mm	Densidad de escaneo en las dianas	3.5mm	0.5mm
1mm	Densidad en la restauración	0.35mm	0.05mm

Esta tabla se basa en la siguiente fórmula:

$$Q = 1 - \left(\frac{m}{\lambda}\right) \quad (2.1)$$

Donde:

Q - Calidad de los datos, (mm)

m- Densidad de puntos (resolución) sobre el objeto.

λ - Tamaño del elemento más pequeño, o la densidad de puntos requerida.

Por tanto, el valor de Q indica el nivel de objetos escaneados.



2.10 Toma de datos

2.10.1 Escaneado de la superficie del terreno.

El proceso de escaneado es totalmente automático, Brenner, C. Aerial (2006). Tras presionar el botón de control en el programa de control del Escáner o directamente en el control del Escáner, el Escáner se mueve al punto de inicio y empieza a tomar puntos. Estos puntos se almacenan en el ordenador portátil o en la memoria interna del Escáner. Cuando el ordenador portátil está conectado al Escáner, los puntos se visualizan directamente en tres dimensiones en la pantalla y dan una vista del área que se está escaneando. Es importante comprobar el escaneado realizado por si hubiera obstrucciones imprevistas que provoquen zonas ocultas en los datos.

En la mayoría de los programas de control del Escáner, la definición de la zona de escaneado y los parámetros de los ajustes pueden programarse de manera que se pueden escanear múltiples regiones de forma consecutiva con diferentes resoluciones. Se puede crear un script para que se escaneen unas áreas específicas con una mayor resolución mientras que el Escáner está trabajando, de modo que los elementos mejor definidos se usen en el registro.

Según la resolución elegida y el área escaneada, el proceso de escaneado puede durar desde los 5 hasta 120 min, incluso más. Durante este tiempo es apropiado tomar notas del levantamiento o hacer un croquis del entorno, si no se hicieron en la fase de planificación. El croquis y las notas del levantamiento deberían mostrar y describir los objetos escaneados, las posiciones de las dianas numeradas y los estacionamientos del Escáner, así como condiciones externas específicas que puedan influenciar el escaneado y los ajustes establecidos.

2.10.2 Escaneado de las dianas o puntos de referencia

Cuando se utilizan puntos de referencia artificiales o naturales para registrar las nubes de puntos se deben etiquetar y medir con mucha precisión. Debido a la velocidad limitada, el escaneado se realiza en dos fases. Primero, el terreno se escanea con una resolución adecuada para obtener la resolución pedida en los resultados finales. En una segunda fase, las dianas se escanean a mayor resolución para obtener una mayor precisión en la determinación de su centro. Sin embargo, en



las minas a cielo abierto es mejor que se escaneen primero las dianas y luego el objeto para evitar cualquier movimiento de las dianas.

Después de terminar el escaneado global (primera fase), muchos programas de control tienen herramientas para detectar automáticamente las dianas. Como estas dianas están hechas de un material altamente reflectante, su valor de reflectividad es mucho mayor que el de su alrededor. Como estas herramientas automáticas a menudo dan resultados erróneos, es aconsejable que siempre se comprueben los resultados y nos aseguremos de que no se queda ninguna diana por tomar. Brenner, C. Aerial (2006). **Ver figura 2.5.**



Figura 2.5 Escaneado de dianas

Una vez que conocemos las posiciones aproximadas de las dianas, se escanean con una resolución muy alta (segunda fase) **Ver Figura 2.6.** El programa de control del Escáner puede ajustar automáticamente una forma específica de diana a diana y determinar el centro exacto.

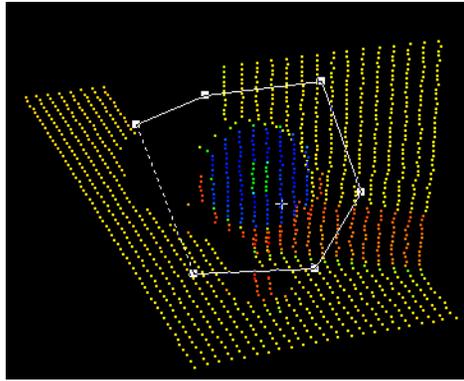


Figura 2.6 Escaneado de alta resolución de una diana

Algunas veces se utilizan puntos de detalle en lugar de dianas o se combinan. Un punto de detalle es un punto geométrico altamente distinguible que puede ser localizado con mucha precisión gracias a su forma. Estos puntos también se escanean con una resolución muy alta. Es bueno poner manualmente el vértice para estos puntos de referencia naturales y etiquetarlos en el momento para evitar problemas de interpretación en la fase de procesamiento.

Es importante saber que la última generación de Escáneres basados en fase, escanean a muy alta velocidad a 360°, con alta resolución puede llevar entre 5 y 10 min. Las dianas se escanean a alta resolución, por lo que no tienen que ser escaneadas de nuevo. Esta forma de trabajar es bastante más rápida porque no hay que identificar las dianas y volver a escanearlas a mayor resolución. El etiquetado de las dianas suele hacerse en la oficina y ello requiere disponer de buenas notas y croquis de campo.

2.11 Filtrado inicial

Mientras se escanea, los datos pueden filtrarse utilizando filtros primarios. Para ello existen diferentes opciones: filtrado por distancia, por el valor de la reflectividad, o una combinación de ambos. Estos filtros primarios se pueden usar para asegurar que los datos se encuentran dentro del rango de distancias de precisión límite del Escáner o para eliminar los puntos con poca reflectividad porque seguramente no tendrán bastante precisión. **Ver figura 2.7.**

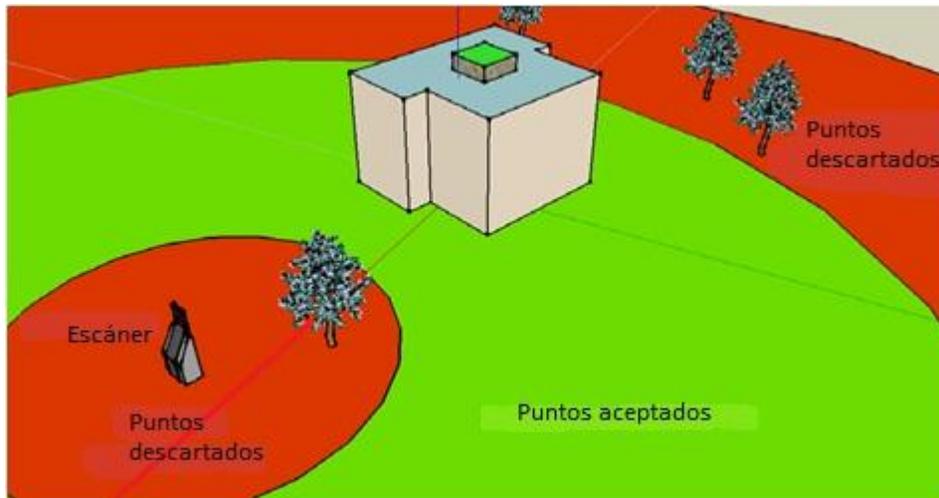


Figura 2.7 Filtrado inicial a partir de la distancia

2.12 Medición de puntos de referencia o dianas

Una parte del proceso de escaneado es tomar las dianas con una estación total. Si se realizan varios estacionamientos con la estación total, se debe hacer una triangulación o poligonometría para minimizar los errores.

2.13 Comprobación de la toma de datos

Es muy importante comprobar dos veces que el escaneado está completo cuando ya haya terminado, Brenner, C. Aerial (2006). Al darse cuenta de que falta una parte cuando ya estamos en la oficina provoca una costosa visita al área de trabajo. Esta segunda comprobación requiere más tiempo que la comprobación realizada en el momento. Cuando se trabaja con un ordenador portátil, una vista simplificada nos puede ayudar.

Trabajos de Gabinete

Esta es la etapa más compleja del proceso ya que requiere de un conocimiento técnico sobre la utilización de la tecnología 3D Láser Escáner, ordenadores con altas prestaciones y muchos pasos para la edición del plano. Se divide en los pasos siguientes:



2.14 Preparación de los datos

En la oficina, los datos se analizan y comparan con los croquis de campo y las notas. Es aconsejable empezar a trabajar con una copia de los escaneados originales y mantener los originales como copias de seguridad. Los Escáneres almacenan las nubes de puntos de diferentes formas. En tareas de almacenamiento es importante que el formato del archivo sea fácilmente accesible y reconocible. Si se puede acceder a él directamente, sin descodificación, después se podrá convertir a cualquier otro formato legible con un programa adecuado. El formato del fichero también debe contener los datos en el formato más rudimentario, en lugar de usar el formato más preferido para el reprocesamiento.

Siempre se deben añadir los metadatos a las copias de seguridad junto con los croquis y las notas de campo así como todos los datos recopilados en la fase de preparación. Antes de procesar las nubes de puntos, los escaneados afectados por condiciones ambientales extremas o los escaneados erróneos ocasionados por fallos humanos se eliminan del conjunto de datos.

También hace falta limpiar las nubes de puntos antes de registrarlas. Cuando las dianas se han colocado muy lejos del Escáner o cuando las condiciones ambientales son malas, los escaneados a alta resolución de las dianas pueden estar llenos de ruido. Este ruido se debe eliminar antes de realizar el registro, en caso contrario, afectará a la precisión.

2.15 Registro y georreferenciación de datos

Cuando el terreno a modelar es demasiado grande no es posible que se escanee desde una posición. Entonces, se necesitan varios estacionamientos del Escáner. **Ver Figura 2.8.** Cada estacionamiento está definido en el sistema de coordenadas del Escáner. Para poder alinear diferentes estacionamientos del Escáner, es necesario saber la situación y la orientación exacta del Escáner en un sistema de coordenadas externo local o global.

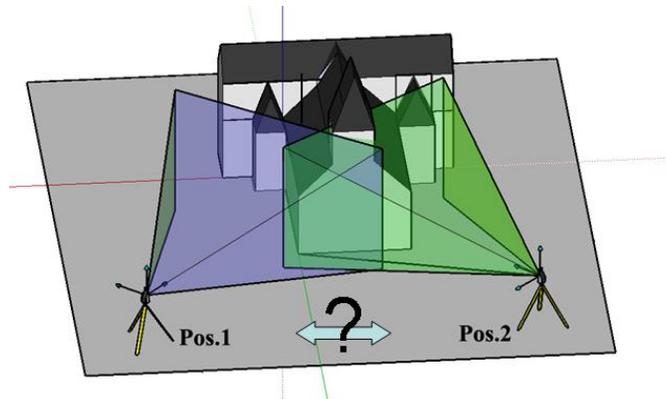


Figura 2.8 Registro entre dos estacionamientos del Escáner

Directamente vinculado con la alineación o registro se encuentra la georreferenciación de todo el conjunto de datos. La georreferenciación significa, además de alinear las nubes de puntos, llevar el conjunto de datos a un sistema de coordenadas fijo. A continuación se explican las diferentes posibilidades para llevar a cabo el registro y la georreferenciación. **Ver Anexo 1.** Clasificadas en georreferenciación directa e indirecta.

2.15.1 Registro y georreferenciación directa

El registro directo significa que la posición y orientación del Escáner se calculan directamente. Esto se puede realizar de dos maneras. Un ejemplo es el caso de un Láser Escáner con algunas funciones de estación total, donde el Escáner se puede estacionar directamente sobre un punto conocido utilizando una plomada Láser. José Luis Lerma García, Josep Miquel (2008). La orientación se puede determinar escaneando un único punto de referencia en el emplazamiento siguiente del Escáner. Estos Escáneres también tienen un compensador de doble eje que los nivela dentro de unos límites. Esta nivelación del Escáner implica una tercera restricción en la orientación del Escáner.

A veces se fija un reflector especial en la parte superior del eje vertical de rotación del Escáner. La posición exacta de este reflector respecto del centro del haz Láser se puede determinar tras un proceso de calibración. Entonces, el reflector se puede medir con una estación total como si formara parte de una poligonal. Otra forma de determinar el emplazamiento del Escáner es colocando un receptor GPS sobre el



Escáner. Esta técnica reduce el número de dianas a considerar y evita los grandes requerimientos en cuanto a la configuración de las mismas

2.15.2 Registro y georreferenciación indirecta

El registro indirecto trae consigo el uso de dianas (artificiales o naturales) en el escenario para alinear las nubes de puntos. Si se necesita georreferenciar se deben medir los puntos de referencia mediante técnicas topográficas y transformarlos a un sistema de coordenadas conocido. José Luis Lerma García, Josep Miquel (2008).

Para llevar a cabo el registro indirecto se necesita, como mínimo, tres puntos de referencia presentes en las dos nubes de puntos a registrar. Siempre es mejor tener más de tres puntos, de esta manera los errores se pueden minimizar mediante un ajuste mínimo cuadrático.

Registro diana a diana

Los lugares con fácil acceso no presentan problemas a la hora de colocar las dianas. Las dianas artificiales pueden ser de formas muy variadas. Hay dianas especiales que las suministran las propias compañías de Láser Escáner hechas de material altamente reflectante. Las dianas impresas en papel también se pueden utilizar. José Luis Lerma García, Josep Miquel (2008). Cuando no hay dianas artificiales disponibles se improvisan tomando objetos cuya superficie pueda ajustarse a una superficie geométrica ideal. Por ejemplo: se pueden utilizar piezas de tubo cilíndrico. Los programas de procesamiento del Escáner permiten ajustar un cilindro a la nube de puntos del objeto para determinar su eje central con gran precisión. Si los cilindros se colocan tanto en dirección vertical como en horizontal, se pueden utilizar para alinear diferentes nubes de puntos.

En las zonas inaccesibles, por ejemplo en zonas muy elevadas, se pueden utilizar entidades naturales. Estas entidades o blancos naturales son puntos de interés en la propia estructura a escanear que pueden ser identificados con alta precisión, como por ejemplo: intersecciones de bordes de talud.



Registro nube a nube

Otra forma de registrar dos nubes de puntos es usando el solape entre las nubes de puntos. Si dos nubes de puntos tienen bastante solape (generalmente entre el 30 y el 40%) se puede utilizar la técnica llamada ICP (Iterative Closest Point) para alinear ambos conjuntos de datos. Esta técnica requiere que el usuario marque al menos tres pares de puntos correspondientes en las nubes de puntos. Como estos tres pares nunca serán exactamente los mismos puntos, el algoritmo comprueba iterativamente las distancias entre todos los puntos de las nubes y estima la transformación para alinear ambos conjuntos de manera que se disminuya el error.

Las reglas para las configuraciones de las dianas son aplicables a la configuración de los puntos en el registro nube a nube. Esta técnica de registro se debe emplear con precaución. Cuando se escanean terrenos muy largos en los que se necesitan varios estacionamientos, se producen pequeños errores en el registro de cada par consecutivo de nubes de puntos.

2.15.3 Aspectos generales del registro y la georreferenciación

Este epígrafe proporciona algunos elementos a tener en cuenta cuando se registran conjuntos de datos e incluso, cuando se planifica la fase de registro. La mayoría de las siguientes afirmaciones se han adoptado de la publicación del Brenner, C. Aerial (2006):

- Cuando se realiza un registro, nos debemos asegurar que los residuos del registro global son igual o mejores que la precisión geométrica requerida para los resultados finales.
- Cuando el registro se realiza únicamente mediante resección (indirecto), cada nube de puntos debe contener al menos, tres puntos de control (X, Y, Z) distribuidos adecuadamente. Con esto se consigue más grados de libertad, por lo que se puede utilizar el método de los mínimos cuadrados para minimizar los errores en la captura de las dianas o blancos.
- Incluir siempre los residuos del proceso de registro y las precisiones geométricas de los parámetros calculados en el informe del levantamiento.



- Añadir fotografías o impresiones de pantalla de elementos irregulares de las nubes de puntos producidos por quiebros o por elementos que se podrían mal interpretar como errores en el registro e indicarlo en el informe.
- No colocar dianas artificiales en lugares que oculten detalles importantes del objeto. Las dianas no deben ser muy grandes.

2.16 Representaciones de las nubes de puntos

El resultado de una captura de un Escáner es una gran cantidad de puntos en el espacio, cada uno tiene unas coordenadas (X, Y, Z). **Ver Figura 2.9.** Y normalmente, un valor de reflectividad. Algunos Escáneres proporcionan incluso información del color en forma de valores RGB (rojo, verde y azul). La nube de puntos se puede representar dibujando todos los puntos en la pantalla, esto trae consigo una impresión caótica y el usuario puede tener dificultades para reconocer las estructuras en la nube. Cuando cada punto se muestra con su valor de reflectividad o color, el conjunto de toda la estructura se entiende mejor.

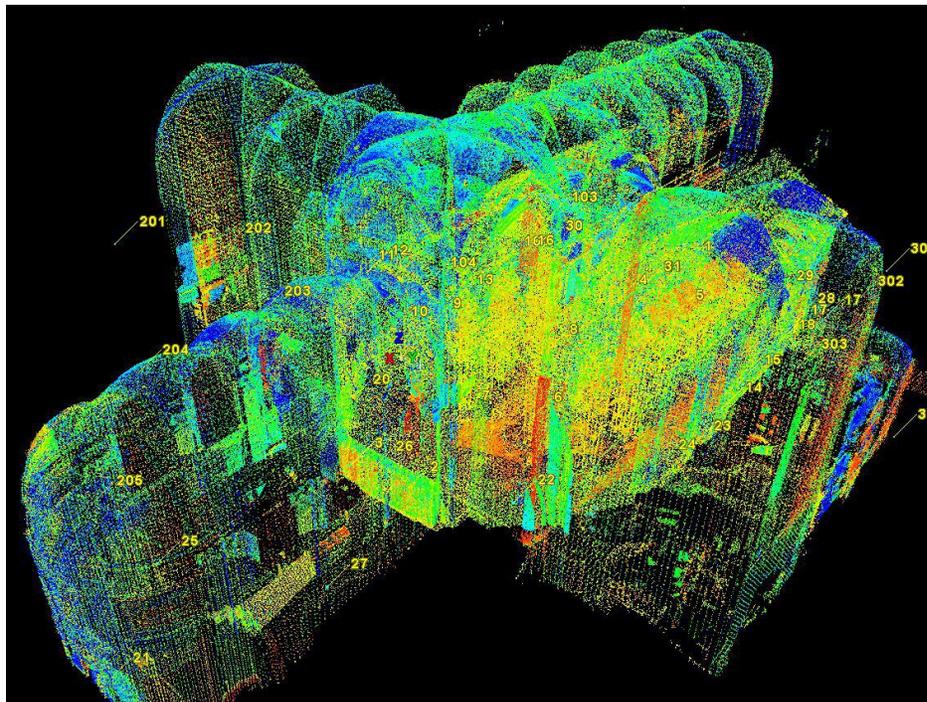


Figura 2.9 Imagen de una nube de puntos

Como la mayoría de los Escáneres toman una escena en filas y columnas, una manera de representar una nube de puntos de una forma muy simple, es con un



mapa de profundidades. Un mapa de profundidades es una estructura en forma de matriz (2D) en la que cada píxel representa la distancia del punto 3D al Escáner en forma de un valor de gris. Brenner, C. Aerial (2006). Debido a que este tipo de representación incorpora información del entorno de cada punto. Es de gran utilidad en los algoritmos de procesamiento de la nube de puntos y se conoce como nube de puntos organizada.

Si se utilizan complejos algoritmos de modelización (triangulación), los puntos vecinos se pueden conectar para formar superficies. Esto proporciona una representación más cercana a la realidad porque las estructuras superficiales o modelos no son transparentes, por lo que los puntos que quedan detrás de otros no pueden ser vistos. Si se calcula la dirección normal de la superficie, se pueden utilizar sombras artificiales para enfatizar detalles de la misma.

Como la generación de modelos, especialmente a partir de nubes de puntos no organizadas, es compleja y puede tomar un tiempo considerable, ha habido intentos de encontrar alternativas para conseguir más rápidamente una representación aproximada de la nube sólo para visualizarla y analizarla.

2.17 Filtrado del ruido y remuestreo

Filtrado del ruido

Un primer paso en el proceso de mallado es la eliminación del ruido de los datos de la nube de puntos. Si el ruido se ha introducido a causa del viento, superficie de reflexión mala, etc., el modelo contendrá triángulos que conecten los puntos con ruido a los puntos correctos. Esto produce una malla llena de picos. Por lo que es importante eliminar este ruido en el primer paso.

El operador puede identificar fácilmente algunas partes escaneadas pero que no son necesarias en los resultados finales. Es aconsejable que el operador lleve a cabo un primer análisis de la nube de puntos y elimine a mano todos los puntos no necesarios.

Los algoritmos automáticos que eliminan el ruido se basan, principalmente, en dos principios: El primero es el hecho de que los puntos que tengan pocos puntos o



ninguno a su alrededor, son considerados ruido. Probablemente son originados por personas y otros obstáculos que se mueven por delante del Escáner mientras el Escáner está en funcionamiento. Brenner, C. Aerial (2006). Estos puntos se identifican fácilmente utilizando un número limitado de parámetros de ajuste por lo que son eliminados de la nube de puntos. Otro principio de eliminación es mover ligeramente los puntos para alcanzar una suavidad óptima de la superficie. Estos algoritmos intentan ajustar localmente planos a los puntos de la nube. Cuando el punto central queda muy lejos del plano ajustado, se mueve hacia el plano de manera que proporcione una mejor consistencia a sus vecinos.

Remuestreo

Cuando se crea una malla, el número de triángulos es mayor al doble del número de puntos que se utilizan en la nube de puntos. Un modelo de una nube de puntos de un Escáner por fase puede tener más de 20 millones de triángulos. Esta cantidad hace que sea difícil trabajar con programas estándar. Generalmente, se necesita reducir el número de triángulos antes de crear el modelo. Esta reducción de puntos se puede hacer de dos formas: Eliminar un punto que esté muy cerca de otros puntos. Los puntos se pueden eliminar mientras se mantiene toda el área escaneada. Esta técnica puede eliminar puntos en áreas que contengan elementos importantes e información valiosa.

Otra forma de eliminar puntos es tener en cuenta la curvatura de la superficie para determinar si parte de esta es suave o muy curva. Esta técnica de remuestreo funciona inteligentemente, manteniendo los puntos importantes en las áreas con alta curvatura y eliminando puntos en áreas que se pueden representar con menor cantidad. Con esta técnica se consigue una reducción más adecuada de la nube de puntos original sin perder elementos valiosos. José Luis Lerma García, Josep Miquel (2008).

2.18 Modelado 3D de la superficie del terreno. Mallado y triangulación

Modelado 3D de la superficie del terreno

Conectando todos los puntos de la nube con pequeños triángulos, se genera un modelo de superficie o malla. Esta malla es una interpolación de los puntos

tridimensionales que origina una representación completa de la superficie. Para crear un modelo de calidad, se deben seguir una serie de pasos:

- Limpieza de los datos (reducción del ruido, eliminación de errores groseros).
- Remuestreo.
- Mallado o Triangulación.
- Eliminación de vacíos (puenteando, uniendo).
- Optimización de la malla.

Mallado y Triangulación

Existen diferentes algoritmos para crear mallas a partir de nubes de puntos. Las conexiones entre puntos se realizan normalmente mediante triángulos o cuadriláteros. La técnica de modelización con triángulos y tetraedros más populares es la del criterio de Delaunay. Este criterio establece que ningún punto puede estar contenido en la esfera circunscrita en cualquier tetraedro del modelo, que ilustrado en 2D aparece reflejado en la siguiente figura: **Ver figura 2.10.**

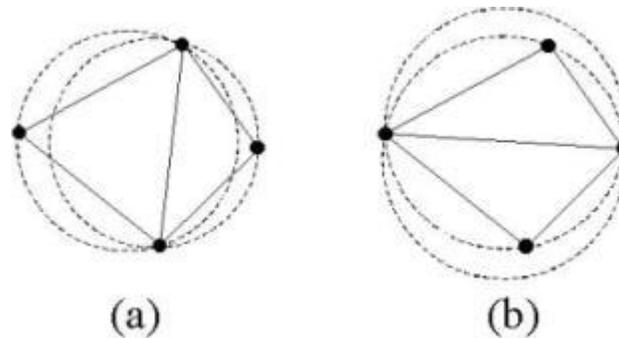


Figura 2.10 Ejemplo del criterio de Delaunay: (a) Cumple el criterio; (b) No cumple

2.19 Eliminación de vacíos. Optimización del modelo.

Eliminación de vacíos

Se realizan múltiples estacionamientos diferentes del Escáner para solucionar el problema de las oclusiones. Sin embargo, cuando se hace la malla se introducen pequeños agujeros o vacíos debido a una insuficiencia de datos. En los últimos años se han desarrollado numerosos algoritmos para eliminar estos vacíos. Estos algoritmos utilizan la interpolación para maquillar la falta de información. El agujero o vacío se puede rellenar de forma plana, conectando los bordes con triángulos o



utilizando una superficie curva de forma que los puntos y triángulos de los bordes se usen tanto para crear nuevos puntos como para rellenar el vacío por medio de una superficie suave.

Optimización del modelo

Si la nube de puntos se reduce durante el remuestreo para crear un menor número de triángulos, puede ser necesario reducir el número de triángulos de la malla en un segundo paso para superar las capacidades del hardware. Esto se llama diezmando de la malla.

Otra forma de optimizar la descripción de la superficie es mediante la aproximación de superficies matemáticas. Uno de los tipos de superficies más comunes para estas tareas son las *NURBS (Non Uniform Rational Basisfunctions)*. Éstas son representaciones matemáticas precisas de superficies con forma libre como las de las carrocerías de los autos, los cascos de los barcos e incluso la cara humana. Tienen puntos de apoyo que dirigen la superficie. Estos puntos de apoyo no son necesariamente puntos de la nube.

2.20 Entrega del control de calidad

La calidad de los levantamientos mediante Láser Escáner necesita una consideración cuidadosa durante todo el proceso de medición y procesamiento. Cada vez que se estaciona el Escáner para tomar datos (antes, durante y después) ciertos elementos de los datos deberían inspeccionarse y contrastarse con los resultados esperados o predichos. Además de estos factores, el operador del Escáner debe comprobar otros, como por ejemplo: que exista recubrimiento suficiente, la distribución de los puntos con la resolución requerida, fotografías referenciadas con una cámara de alta resolución, correcta adquisición de las dianas retro reflectantes y de dimensiones adicionales que pudieran ser muy útiles en futuras etapas de procesamiento. José Luis Lerma García, Josep Miquel (2008).

La documentación adecuada en campo, asegura que los datos se archiven con calidad óptima. Los croquis de apoyo, las fotografías de referencia y las comprobaciones de diversas dimensiones podrán utilizarse en futuras fases del proceso. Generalmente, el objetivo debería ser conseguir una precisión en los



resultados del registro diez veces menores que la precisión final requerida. Hay muchos otros elementos que podrían tener efecto en la precisión.

En el Anexo 2 se muestra el diagrama que proporciona información en lo que respecta al proceso de control de calidad en los levantamientos con Láser Escáner.



CAPÍTULO III

APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO EN LA NUEVA PLANTA DE PULPA DE LA EMPRESA COMANDANTE PEDRO SOTTO.

3.1 Generalidades

En este capítulo se esboza la aplicación del procedimiento creado en esta investigación en un caso de estudio durante la obtención del Modelo Digital de Elevaciones (MDE), para la construcción de la nueva planta de pulpa de la Fábrica de Níquel Comandante Pedro Soto Alba, mediante un ejemplo, que le permita a los Ingenieros de Minas y Topógrafos introducirse en el empleo del 3D Láser Escáner.

Los procesos de medición en campo y cálculo de las superficies del terreno en las condiciones actuales, deben agotar una serie de pasos que son los que hacen del mismo un proceso confiable. Con la tecnología 3D Láser Escáner estos pasos se terminan con tal rapidez que hace apenas algunos años era imposible crearlo. Con el uso de este instrumento, las actividades que nos tomarían semanas y hasta meses se pueden confeccionar en horas.

El levantamiento topográfico para la obtención del MDE se efectuó en la etapa del proyecto ejecutivo teniendo en cuenta las normas vigentes en Cuba y los criterios de diseño estudiados. Para esto se realizó primeramente, un levantamiento del terreno con estaciones totales. Partiendo de los puntos topográficos existentes en las zonas reales, se hizo el mismo trazado empleando el 3D Láser Escáner y se obtuvo el procedimiento que se muestra a continuación.

3.2 Procedimiento para el modelado del terreno con 3D Láser Escáner.

Para la obtención del Modelo Digital del Elevaciones (MDE) se ejecutaron dos etapas: trabajos de campo y trabajos de gabinete:

Trabajos de campo

Se planifico estos trabajos teniendo en cuenta los pasos siguientes:

Paso 1: Planificación.

Se realiza el recorrido por la zona de los trabajos.



Se determina el objetivo del trabajo.

Se analiza el área a levantar.

Paso 2: Determinación de las posiciones óptimas del Láser Escáner.

Paso 3: Determinación de las posiciones óptimas de los puntos de referencia.

Paso 4: Gestión de los datos.

Paso 5: Estacionamiento del Escáner.

Paso 6: Conexión del Escáner al ordenador.

Paso 7: Definición del área a escanear.

Paso 8: Elección de la resolución.

Paso 9: Filtrado inicial.

Paso 10: Toma de datos.

Paso 11: Medición de puntos de referencia o dianas.

Paso 12: Comprobación de la toma de datos.

Trabajos de Gabinete.

Se planifico estos trabajos teniendo en cuenta los pasos siguientes:

Paso1: Preparación de datos.

Paso 2: Registro y georreferenciación de datos.

Paso 3: Representaciones de las nubes de puntos.

Paso 4: Filtrado del ruido y remuestreo.

Paso 5: Modelado 3D de la superficie del terreno. Mallado y triangulación.

Paso 6: Eliminación de vacíos. Optimización del Modelo.

Paso 7: Entrega del control de calidad.



3.3 Caso de estudio.

3.3.1 Trabajos de campo

Paso 1: Planificación.

Por solicitud de la Empresa Mixta Moa Nickel S.A se da la tarea a los Topógrafos de la Empresa de Proyectos HATCH y especialistas de la Empresa de Ingeniería y Proyectos del Níquel, obtener el MDE a escala 1:500 del área concebida para la construcción de la nueva planta de pulpa, con el objetivo de realizar la proyección del movimiento de tierras.

Para comenzar los trabajos, se evaluó la información existente de la zona donde existe un levantamiento topográfico a escala 1: 500 en 2D, realizado con la tecnología de estaciones totales por el grupo de topografía de la Empresa de Ingeniería y Proyectos del Níquel, el cual utilizamos en esta investigación para realizar un análisis comparativo. El área se encuentra ubicada en el municipio de Moa provincia Holguín dentro de la concepción Minera Moa Oriental, en las coordenadas planas rectangulares aproximadas (X: 695 097.00 , Y: 217 679.00). **Ver figura 3.1.**



Figura 3.1 Ubicación de la zona de planta de Pulpa.

Se realizó un recorrido en la zona con el fin de visualizar las características del relieve y sus accesos, se observó que el terreno es montañoso con pendientes medias, lo que no afecta el acceso; no existen elementos hidrográficos de interés, se encuentran desprovistos de malezas donde las condiciones de visibilidad y transitabilidad son favorables para el escaneo.



Se revisó el objetivo del trabajo planteado en la tarea técnica entregada por el cliente, el cual plantea realizar el proyecto de movimientos de tierras, donde tendrá asociado la construcción de perfiles longitudinales, secciones transversales y cálculo de volúmenes, se proyectarán explanaciones, taludes, zanjas para el drenaje, accesos y rampas de acuerdo a las tolerancias que se exigen, las cuales fueron brindadas por el cliente en tarea técnica.

Estas normas están establecidas para la construcción, como el proyecto se va a confeccionar sobre el MDE se debe de garantizar las exigencias mínimas en la precisión del modelo.

Tolerancias admisibles establecidas para el proyecto.

RC 3005 Excavación en zanjas.

Para la excavación en zanjas no se admiten más de 10 cm de desviación horizontal y 5cm de profundidad como tolerancias con respecto a las líneas establecidas en el proyecto.

RC 3006 Excavaciones para explanaciones.

En las excavaciones de cualquier clase de suelo.

Tolerancias

Niveles en rasante + 5 cm

Ancho de la explanación + 10 cm

(Del eje del borde)

Ancho de las cunetas + 10 cm

En taludes, en suelo blando o roca blanda.

Irregularidades con respecto a la superficie teórica del talud + 10 cm

En taludes, en suelos de roca sólida

Irregularidades con respecto a la superficie teórica del talud + 50 cm



Excavaciones en canales Ver tabla 3.1.

Tabla 3.1: Excavaciones en canales.

NO.	Denominación de la desviación	U/M	50		50-10		Hasta 10	
			+	-	+	-	+	-
1	Desviación del eje real del canal con relación al eje replanteado	Mm	500	500	500	300	200	200
2	Desviación de las medidas: Del ancho del fondo	mm	500	500	300	300	200	200
	De la corona del dique	mm	Sin 0	limite	Sin 0	limite	Sin limite	0
	Del ancho de la berma	mm	Sin 0	limite	Sin 0	limite	Sin limite	0
3	Desviación de las cotas: De la cota de los diques y de berma	mm	30	30	15	15	10	10
	Fondo del canal	mm	0	250	0	150	0	100
4	Desviación de los taludes: mojados	%	15	10	15	10	15	10
	Secos	%	Sin 10	limite	Sin 10	limite	Sin 10	limite



Terraplenes

El terraplén terminado cumplirá las dimensiones geométricas de la vía, incluyendo rasantes, perfilado de coronas y taludes, según lo especificado en el proyecto y/o dentro de las tolerancias que se indican a continuación:

- a) Niveles en subrasantes ± 3 cm

- b) Ancho de la corona al nivel de subrasante.
 - Del eje central al borde $+ 10$ cm

- c) Taludes, ancho entre el eje central y líneas del borde del pie de talud:
 - En roca $+ 75$ cm
 - En otro tipo de material $+ 30$ cm

- d) Niveles de corona:
 - Profundidad de las depresiones observadas colocando una regla de 5 m de longitud.
 - Paralela normalmente al eje máximo $2,5$ cm
 - Pendiente transversal $\pm 0,5$ %

Todos los elementos recogidos en el proceso de planificación permiten obtener criterios para analizar el área a levantar y tener la idea de los resultados que se deben de entregar al cliente.

Paso 2: Determinación de las posiciones óptimas del Láser Escáner.

Con toda la información recopilada en la etapa de la planificación se determinaron las posiciones óptimas del Escáner, se eligieron de tal manera que garantizaran una máxima cobertura y precisión, minimizando el número de emplazamientos, pero cumpliendo con los requerimientos de los alcances máximo y mínimo que se obtienen durante un paso de la resolución que explicaremos más adelante. Se proyectaron un total de 7 emplazamientos para cubrir un área total de 88.09 hectáreas. **Ver figura 3.2.**



Figura 3.2 Proyección de los estacionados.

Paso 3: Determinación de las posiciones óptimas de los puntos de referencia.

En esta etapa se utilizaron dos puntos de apoyo topográficos establecidos ya en la zona por trabajos de densificación anteriormente realizado por topógrafos de la Empresa Geocuba en el año 1987, a partir de ellos se planificaron unas poligonales de rodeo con estaciones totales pasando por todos los puntos de referencia que se utilizaron en el escaneo. Se proyectaron de manera tal que estuvieran esparcidas lo más ampliamente posible en la zona, para establecer 4 puntos de referencias por cada escaneado. **Ver figura 3.3.**



Figura 3.3 Distribución de los puntos de referencia.

Paso 4: Gestión de los datos.

Para determinar la capacidad de memoria que va a ocupar en nuestro ordenador el terreno escaneado, se consultó el manual del Escáner que se utilizó en el proyecto (Escáner Faro Focuss Scout 4.1), **Ver figura 3.4**, nos remitimos al manual del instrumento y teniendo como datos que un escaneado ocupa 140 MB aproximadamente y el área requiere de un total de 15 escaneados se genera un total de 2.5 GB aproximadamente, por tal motivo consideramos que el ordenador debe contar con más de 3.0 GB libres en la torre C; la PC que se utilizó fue una laptop robusta de campo Panasonic 1235.



Figura 3.4: Escáner empleado en el Proyecto (Faro Focus Scout 4.1).

Paso 5: Estacionamiento del Escáner.

Se realizó el estacionamiento del Escáner en los 7 emplazamientos proyectados de acuerdo al procedimiento similar a cualquier instrumento de medición topográfico.

Paso 6: Conexión del Escáner al ordenador.

La conexión del Escáner al ordenador se realizó a través del cable de red estándar teniendo en cuenta el orden siguiente.

- Conectar el Escáner a la PC antes del encendido.
- Encender primeramente la PC e iniciar el software Faro.
- Encender el Escáner y desbloquear.
- Establecer la conexión a partir del software en el ordenador.
- Abrir el programa del Escáner e iniciar la conexión.

Paso 7: Definición del área a escanear.

Al encontrarse preparado el sistema de escaneo se definieron en cada una de las 7 estaciones, el área a escanear, esto se realiza en la opción del software interno del Escáner (captura de imagen), luego en la imagen se seleccionó el área que se necesita, esto se realizó con el objetivo de no representar las áreas no necesarias y minimizar el por ciento de empalmes entre las imágenes contiguas, para optimizar el proceso de campo.



Paso 8: Elección de la resolución

En la elección de la resolución o densidad de puntos, se tuvo en cuenta, la escala 1:500 solicitada por el cliente para la confección del MDE, considerando que en esta escala deben de representarse los objetos con dimensiones mayores a 0.50m con una exactitud en la representación de la posición de $\pm 0.25m$, se empleó la expresión siguiente:

$$m = 1 - (\lambda * Q) \quad (3.1)$$

$$m = 1 - (0.5m * 0.25m)$$

$$m = 0.875m$$

Dnde:

Q- Es la calidad de los datos, (m).

m- Es la densidad de puntos (resolución) sobre el objeto y

λ - Es el tamaño del elemento más pequeño o la densidad de puntos requerida. Por tanto, el valor de Q indica el nivel de objeto escaneado.

Teniendo en cuenta los resultados, se utilizó en el proyecto una resolución de 0.9m.

Paso 9: Toma de datos.

En este proceso realizamos primeramente las mediciones a los puntos de referencia por cada estación, un total de 23 dianas de control, las cuales fueron escaneadas a una resolución de 0.40 m para lograr una mayor precisión en la determinación del centro y luego de seleccionado el área a levantar y fijado la resolución determinada en el epígrafe anterior, se comenzó a escanear el terreno siguiendo el orden de estacionamientos del Escáner desde la estación P1 hasta la Estación P6 en sentido anti horario cerrando en la Estación P, ubicada aproximadamente en el centro del área. **Ver figura 3.3.**

En la tabla siguiente se muestra el tiempo y la cantidad de escaneos por estación en el momento de los trabajos: **Ver tabla 3.2**



Tabla: 3.2: Tiempo empleado en los trabajos de campo

Estaciones	Est P1	Est P2	Est P3	Est P4	Est P5	Est P6	Est P7	Total
Cantidad de tomas	2	2	2	2	2	1	3	14
Tiempo en minutos	93	85	91	83	95	39	119	605

Finalmente se escanearon un total de 14 escenas y 23 dianas de control en un tiempo aproximadamente de 10 horas, como estrategia fueron realizadas en dos días. Se considero realizar las observaciones en el horario de la mañana en la parte Este del área y en el horario de la tarde la parte Oeste, para minimizar el efecto producido por la sombra y la refracción solar.

Paso 10: Filtrado Inicial.

Junto con el proceso de la toma de datos se ejecuto el filtrado para asegurar que los datos registrados estén dentro del rango de distancia de precisión límite del Escáner y cumplan con las exigencias para la escala 1:500, considerando que el máximo alcance del instrumento utilizado es de 200 m y las exigencias en el levantamiento a escala 1:500 plantea que la distancia máxima del instrumento al punto a levantar no debe de exceder los 150 m, definimos a partir de la opción en el instrumento de filtrado por distancia la longitud de 100 m.

Paso 11: Medición de puntos de referencia o dianas.

Para la medición de los puntos de referencias se utilizó la estación total Sokkia Set 3X **Ver figura 3.5**, perteneciente a la Empresa de Ingeniería y Proyectos del Níquel, donde se tomaron las coordenadas planimétricas y altimétricas al centro de cada diana, referidos a los puntos creados en los trabajos de poligonometría anteriormente realizados. Esta operación nos permitió posteriormente referenciar el modelo.

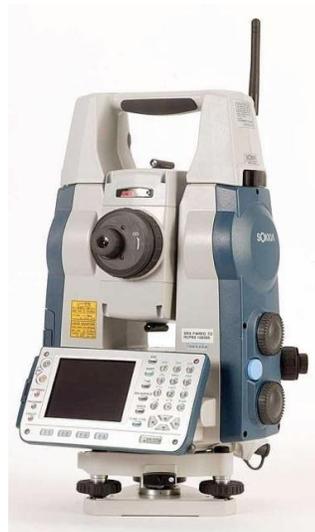


Figura 3.5 Estación total empleada en el proyecto.

Paso 12: Comprobación de la toma de datos.

En cada imagen escaneada antes de cambiar la posición del Escáner se comprobó a través del ordenador **Ver figura 3.6**, en una vista simplificada, que no faltará ningún espacio por tomar, así como en las zonas de solapes al cambiar de estación.



Figura 3.6 Vista simplificada de imagen capturada en el ordenador.



3.3.2 Trabajos de Gabinete.

Paso 1: Preparación de datos.

En la oficina se analizaron los escaneos, se compararon con los croquis realizados durante los trabajos de campo y se preservaron los croquis originales en un archivo digital, para su posterior utilización en otros procesamientos.

Paso 2: Registro y georreferenciación de datos.

En este proceso logramos a partir del software Faro, ubicar las imágenes escaneadas en su posición referidas al sistema de coordenadas nacionales que fueron las que se utilizaron en el proyecto, a partir de los datos de posición tomados al centro de cada diana con la estación total, coincidiendo con las dianas escaneadas, **Ver figura 3.7.**

En el espacio de trabajo del software, al cargar la imagen escaneada, aparece una nube con el número de la imagen, sobre ella damos clip derecho y en la opción (locate) nos encontramos con el cuadro de diálogo (Transformation), donde se pueden introducir los valores de las dianas escaneadas. En este proyecto se georreferencia aproximadamente 4 dianas por toma, es muy importante tener identificados en un croquis la nomenclatura de cada diana, ya que en ocasiones le definimos las coordenadas que no le correspondían a la referencia y existían problemas en la orientación de la imagen escaneada. Este proceso se realizó por el método indirecto, teniendo en cuenta las características técnicas del Escáner empleado.

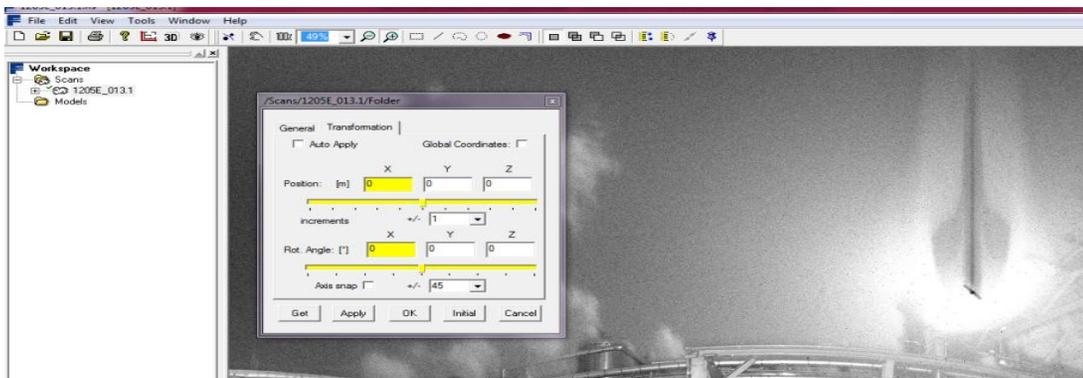


Figura 3.7 Proceso de georreferenciación.



Paso 3: Representaciones de las nubes de puntos.

Luego de georreferenciadas las imágenes, se procesó la nube de puntos, donde se representó el espaciamiento entre puntos de acuerdo a la planificación de la resolución y la escala planteada de 0.9 m.

Dentro de la barra de herramientas se seleccionó la opción (3D) y automáticamente el software Faro procesó la imagen a una nube de puntos con un espaciamiento entre ellos de 0.9 metros. **Ver figura 3.8.**

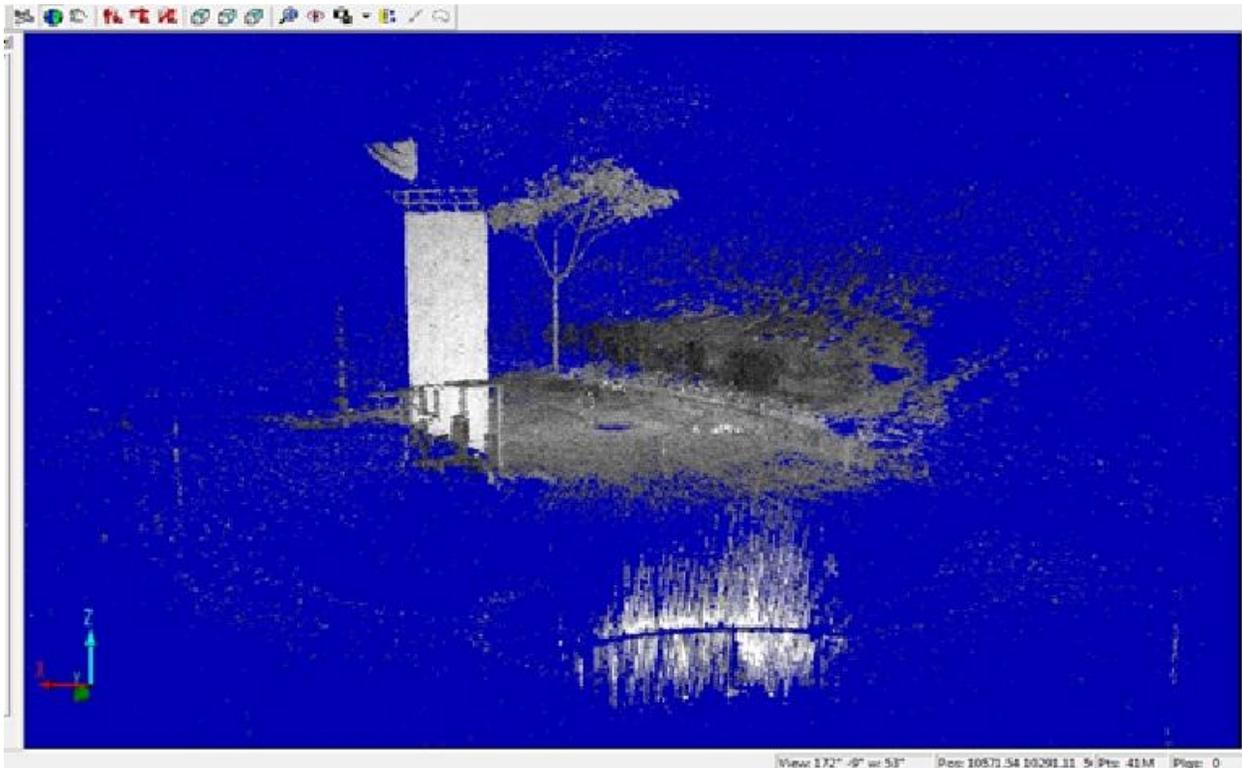


Figura 3.8 Procesamiento de las nubes de puntos.

Paso 4: Filtrado del ruido y remuestreo.

Posteriormente se comenzó a eliminar los puntos que se tomaron por personas que caminaban cuando se estaba escaneando y se identificaron otros que estaban muy cerca unos de otros que surgieron producto al intercambio en los solapes en el proceso de la toma, esto es un proceso muy sencillo, se recorre la nube de puntos y se identifica la acumulación de estos, posteriormente se contornea el área y se



regenera nuevamente el proceso explicado en la nube de puntos, en el caso de las personas se eliminan de la base de datos.

Paso 5: Modelado 3D de la superficie. Mallado y triangulación.

Para la ejecución de estos procesos primeramente se tuvo en cuenta la escala solicitada por el cliente 1:500, donde los permisibles establecidos según las instrucciones técnicas vigentes se encuentran en el orden de los $\pm 0.25\text{m}$, con una equidistancia de 10 a 15m entre puntos contiguos.

Como el mallado utilizado está en correspondencia con la zona montañosa se consideró emplear una distancia mínima entre puntos nodos de la triangulación 5m, para lograr una mayor precisión en la construcción de la estructura topológica (TIN), para esto en el software Faro se activó la opción de triangulación 3D vista, definiéndole el rango seleccionado.

Paso 6: Eliminación de vacíos. Optimización del modelo.

Luego de realizada la malla de triángulos se comenzó una revisión completa, donde se pudo observar en algunos lugares la falta de información, fundamentalmente en algunos cambios de nivel del terreno, debido a que el escaneo no llegó a esas áreas por ocultaciones, esto se resolvió a partir de un proceso de interpolación dentro del mismo software Faro, es un proceso sencillo funciona muy parecido al Photoshop para completar objetos.

En el proyecto no se optimizó el modelo ya que se consideró la densidad de puntos que creamos para lograr mayor precisión en los trabajos solicitados por el cliente en la tarea técnica, fundamentalmente para el cálculo de volúmenes y la construcción de perfiles y secciones transversales, además contábamos con el hardware suficiente para procesar la información.

Paso 7: Entrega del control de calidad.

Para realizar este proceso se tomaron informaciones en campo de aproximadamente un 10% de puntos foto identificables en el terreno a los cuales se les realizaron mediciones directas en campo con estación total y se determinaron sus homólogos en el MDE creado, donde se calcularon las incertidumbres cometidas en medición y

comparadas con los valores límites establecidos por las instrucciones técnicas vigentes para levantamientos topográficos a escala 1:500, donde se obtuvo como resultado que los valores obtenidos en el modelo creado se encuentran por debajo de los límites establecidos. Los resultados del control se muestran en el **Anexo 3**.

Una vez validado el modelo se realizó la entrega de la información, la cual se entrega en formatos (dxf) y (TIN), de manera tal que pueda ser procesada la información en software profesionales como: AutoCAD, Gemcom, Surfer, Cartomap y otros. En el caso de nuestro proyecto exportamos a un archivo (dxf) donde se realizó el dibujo de las curvas de nivel en el modelo y se le añadió el proyecto creado. En la **figura 3.9** mostramos el resultado final del MDE en una vista Sur Este creado.

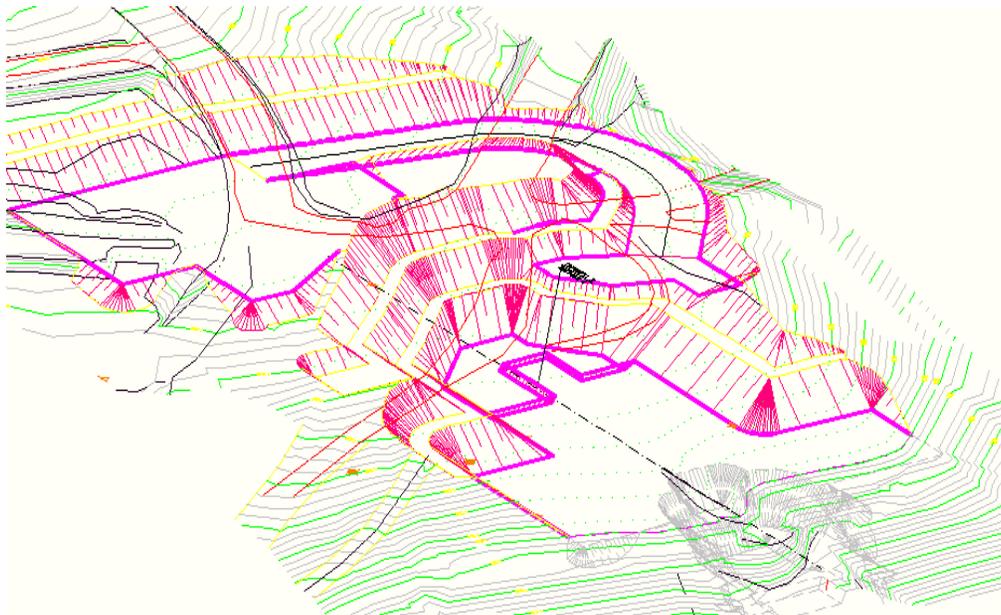


Figura 3.9 Modelo Digital de Elevaciones creado con el proyecto.

3.4 Análisis económico.

En esta investigación valoramos el costo del proyecto teniendo en cuenta las fichas de costo utilizadas en el frente nacional de proyectos y las Fuerzas Armadas Revolucionarias , donde se consideró cual era el monto de acuerdo a la tecnología de estaciones totales que es la que hoy se utiliza y con la tecnología 3D Láser Escáner para valorar la factibilidad económica, así como se realizó un análisis de



cuál era el costo por concepto de capacitación de la tecnología en la parte de confección de MDE para valorar el impacto económico del procedimiento creado.

3.4.1 Cálculo del costo del proyecto con Estaciones Totales.

Teniendo en cuenta la resolución V-35 del Ministerio de Finanzas y Precios que establece la formación de precios para la actividad de la topografía en todo el territorio nacional y el catálogo de Normas aprobado por el frente Nacional de Proyectos se realizó un cálculo del costo del proyecto teniendo en cuenta la tecnología de estaciones totales, **Ver tabla 3.3.**

Proyecto: Planta de Pulpa Moa Nickel.

Volumen de los trabajos: 88.09 hectáreas.

Tabla 3.3: Cálculo económico con estaciones totales.

N/O	Código	Descripción de la Actividad	U/M	Categoría	V. Unitario	Vol. Trabajo	Valor total
1	Lop-01-01	Levantamiento Topográfico escala 1:500	Horas/ Comisión	"B"	\$ 60	489.38	\$ 29362.00
		Total General					\$ 29362.00

3.4.2 Cálculo del costo del proyecto con 3D Láser Escáner.

En este caso se realizó el cálculo considerando solo el tiempo que se empleó en realizar los trabajos ya que no contamos con normas de tiempo para esta tecnología, pero se utilizó la tarifa de la Empresa de Proyectos HATCH de 150 dólares la hora comisión. **Ver tabla 3.4**



Tabla 3.4: Calculo económico con 3D Láser Escáner

N/O	Código	Descripción de la Actividad	U/M	Categoría	V. Unitario	Vol. Trabajo	Valor total
1	Lop-01-01	Levantamiento Topográfico escala 1:500	Horas/ Comisión	"B"	\$ 150	56	\$ 8400.00
		Total General					\$ 8400.00

Análisis de indicadores de eficacia.

En este trabajo se realizó una valoración de los indicadores que miden la eficacia en los procesos **Ver tabla 3.5**, en este caso en la productividad. **Ver Anexo 4.**

Tabla 3.5: Indicadores de eficacia.

Costo del Proyecto con Estaciones Totales	29,3
Costo del Proyecto con 3D Láser Escáner	8,4

Cantidad de trabajadores con Estaciones Totales	4
Cantidad de trabajadores con 3D Láser Escáner	2

Productividad con Estaciones Totales	0,14
Productividad con 3D Láser Escáner	0,24

Tiempo de trabajo en días con Estaciones Totales	61,17
Tiempo de trabajo en días con 3D Láser Escáner	7

Precisión de la Estación Total en 100 m	6,00
Precisión del 3D Láser Escáner en 100 m	1,50

Los resultados aquí mostrados nos permiten hacer las valoraciones siguientes:

- El costo del proyecto con la tecnología 3D Láser Escáner es mucho menor que con los demás instrumentos de medición.



- Se necesita la mitad del personal para la realización de los trabajos de campo con relación a las estaciones totales.
- El Láser Escáner es más productivo que la estación total.
- Se minimiza el tiempo considerablemente el tiempo de ejecución del proyecto.
- La exactitud en los resultados de las mediciones es mayor con la tecnología 3D Láser Escáner.

Análisis comparativo entre el 3D Láser Escáner y los otros sistemas utilizados (Estación Total, GPS), para obtener los MDE

Con los resultados obtenidos en la investigación así como resultados de encuestas realizadas a profesionales en el campo de la Topografía y la experiencia de los que pudieron trabajar con la tecnología se pudo hacer el análisis comparativo siguiente:

3.5 Ventajas del sistema 3D Láser Escáner.

1. La combinación entre el área que se cubre en un menor tiempo y la precisión que se obtiene, con respecto a los equipos que actualmente se utilizan.
2. La capacidad de llegar a lugares de difícil acceso debido a la vista panorámica que alcanza y los detalles que se obtiene de esos lugares.
3. En cuanto a la posición de la nube de puntos que se recogen del terreno, resulta de gran precisión para los trabajos de minería
4. La precisión en cuanto a los detalles que puede captar, ya que al recoger una imagen tridimensional del objeto o lugar permite detectar defectos o perfiles que no son detectables con otros instrumentos.

3.6 Desventajas del sistema 3D Láser Escáner.

1. El sistema 3D Láser Escáner a pesar de ser una gran herramienta de trabajo, hay áreas que el Láser no puede cubrir, por lo que se deben emplear otros sistemas o equipos más tradicionales. (Cerca de líneas de alta tensión, nubes densas de humo y polvo, etc.).
2. En condiciones actuales el costo de un Escáner está alrededor de los 184000USD.



3. La capacitación del personal se encuentra en este momento según ofertas consultadas con la firma Canadiense Geociencias alrededor de los 5800 USD, una semana para dos especialistas.
4. El trabajo de gabinete es muy laborioso y complejo.



CONCLUSIONES

1. Se elaboró un procedimiento que estuvo dirigido principalmente a evaluar las posibilidades reales de ejecutar los trabajos de obtención de un Modelo Digital de Elevaciones empleando la tecnología de 3D Láser Escáner para incorporar en Cuba dicha actividad, con la finalidad de disponer de una nueva línea productiva para la minería.
2. Los resultados obtenidos en la aplicación del procedimiento demuestran que esta tecnología es la más productiva, eficiente y precisa para la obtención de los Modelos Digitales de Elevaciones en la minería.



RECOMENDACIONES

1. Aplicar el procedimiento propuesto para capacitar al personal y disminuir los costos de la inversión por concepto de capacitación.
2. Desarrollar la búsqueda en otros escáneres que se lanzan cada año al mercado y estudiar sus posibilidades.
3. Implementar el procedimiento en el sistema de gestión de la calidad de la Empresa de Ingeniería y Proyectos del Níquel una vez realizada la inversión.
4. Hacer llegar a los especialistas de las Fuerzas Armadas Revolucionarias (FAR) que poseen la tecnología, para ayudar al desarrollo y validar la efectividad del procedimiento propuesto.
5. Utilizar como medio de enseñanza en las carreras de Minas, Geología y Topografía para la formación de los nuevos especialistas.



BIBLIOGRAFIA

1. ARANCIBIA H. "Técnicas geomáticas para el apoyo cartográfico de proyectos de Ingeniería en sus diferentes etapas". Universidad de Santiago de Chile, 2002.
2. BELETE FUENTES Orlando. Libro de Topografía. Libro inédito. 2010.
3. BRENNER, C. Aerial, Laser Scanning. International Summer School "Digital Recording and 3D Modeling". 2006. AghiosNikolaos.
4. FELICÍSIMO Ángel M. "Modelos Digitales del Terreno, Introducción y Aplicaciones en las Ciencias Ambientales", [Oviedo]: Editorial Pentalfa, 2004.
5. HERNÁNDEZ Vidal Edil. Plan de Minería para el año 2008. Mina Pedro Soto Alba. Mina PSA. Moa, Dic-2007.
6. HUGHES, A.J., Laser Beam Scanning: Opto-Mechanical Devices, Systems and Data Storage Optics. Journal of Modern Optics, 1986, p. 950-951.
7. JAYANTA Bhattachrya. Principles of Mine Planning, 2da edición, 2007.
8. LERMA GARCÍA José Luis, BioscaTarongers Josep Miquel. "Teoría y práctica del Escaneado Láser Terrestre". 5 Versión ,2008.
9. MAÑANA-BORRAZÁS Patricia, RODRÍGUEZ PAZ Anxo, BLANCO-ROTEA Rebeca. "Una experiencia en la aplicación del Láser Escáner 3D a los procesos de documentación y análisis del Patrimonio Construido". Madrid-España 2008.
10. MÁRQUEZ Antonio. "Un tratado sobre el Láser Escáner Terrestre TLS". Caracas, 2010.
11. MINTEC (2000) "MINESIGHT. Manual de Introducción a las Aplicaciones de Ingeniería de Mina".
12. NEUS Ros. Proyectos de Ingeniería con AutoCAD Civil 3D. Valencia.2009.
13. NÚÑEZ Jover, J. (2004). Ética, Ciencia y Tecnología: Editorial Félix Varela. La Habana.



14. PAZ Marcela, MIRANDA LEIVA Andrea, ZUÑICA YAÑEZ Alejandra. “Obtención de un Modelo Digital de Terreno mediante tecnología Lidar, aplicado en una mina a rajo abierto”. Universidad de Santiago de Chile, 2009.
15. SAMPERI HERNÁNDEZ, Roberto. “Metodología de la Investigación”, Editorial. México, 2da Edición, 1997.
16. UNZUETA C. “3D Láser Escáner, Aplicado a levantamientos en proyectos de Ingeniería”. Universidad de Santiago de Chile, 2003.
17. VELÁSQUEZ M. Jaime Andrés. “Diseño de un Escáner Láser 3D a partir de un Sistema de Medición Láser 2D Sick LMS 200”. Bogotá-Colombia, 2005
18. WWW, Angel Manuel Felicísimo. “El Modelo Digital de Elevaciones”
<http://www.etsimo.uniovi.es/~feli>
19. WWW, English Heritage. 3D Laser Scanning for Heritage, Advice and Guidance to users on laser scanning in archaeology and architecture.
<http://www.heritage3d.org/downloads/3dscanning.pdf>
20. WWW, FARO. “faro”. <http://www.faro.com/focus>
21. WWW, FOTOCART. “Fotogrametría Digital S.L”.
<http://www.fotocart.com/fotocart.htm>
22. WWW, Geodésica del Perú. “Soluciones Geodésicas y Topográficas para la industria Minera y la Construcción”.
<http://www.geodesicadelperu.com.pe/ndexa.html>
23. WWW, INEGI. “Modelo Digital de Elevaciones”.
<http://www.inegi.org.mx/inegi/contacto/default.aspx>
24. WWW, Paschotta, R. Encyclopedia of Laser Physics and Technology.
<http://www.rp-photonics.com/encyclopedia.html>
25. WWW, Wikipedia. “Escáner 3D”. http://es.wikipedia.org/wiki/Esc%C3%A1ner_3D



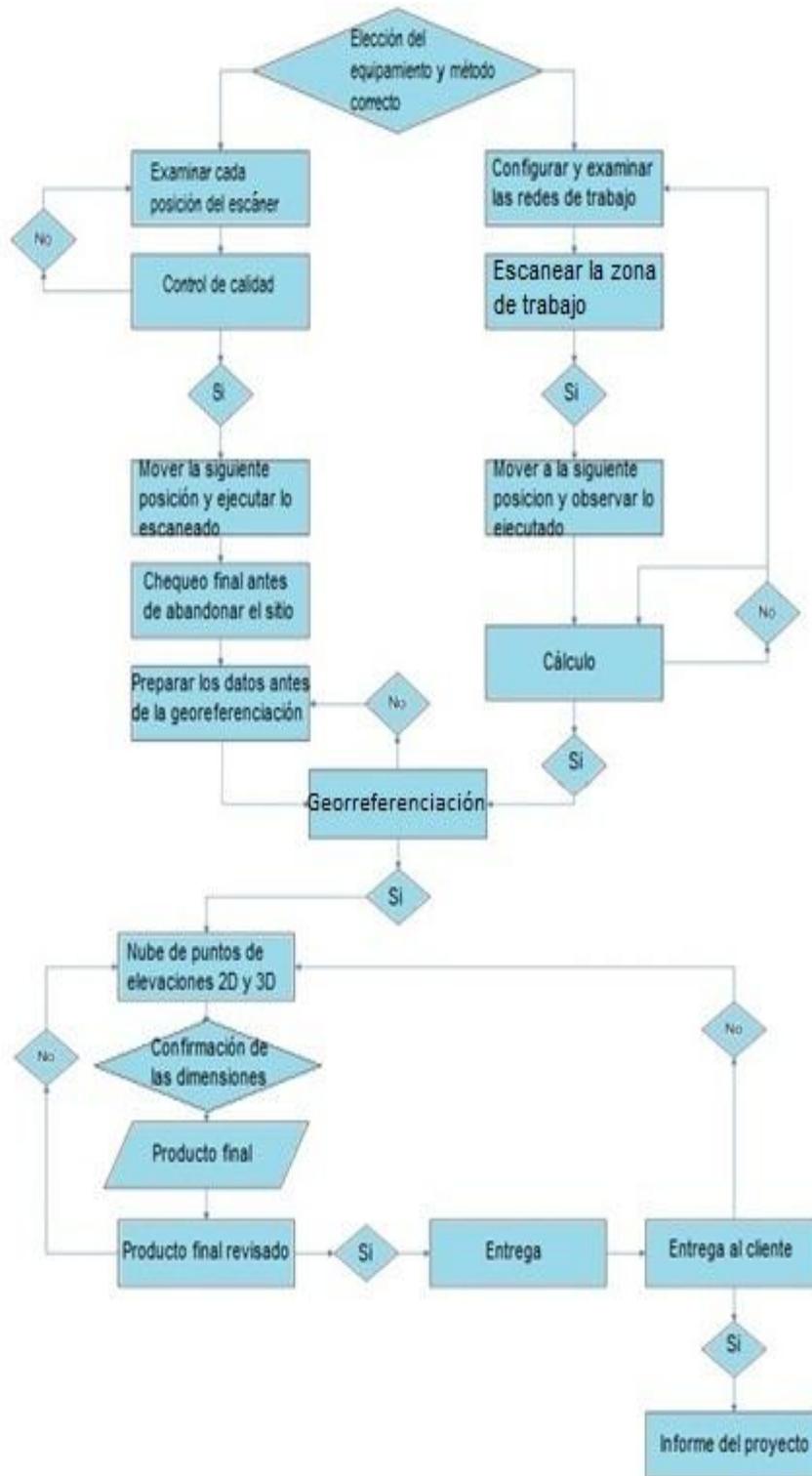
ANEXOS

Anexo1: Técnicas de georreferenciación.





Anexo 2: Diagrama de control de la calidad.





Anexo 3: Resultados del control de calidad.

N°.	Abscisas			Ordenadas			Altitudes		
	X_{mc}	X_p	d_x	Y_{mc}	Y_p	d_y	H_{mc}	H_p	d_H
1	8,639	8,728	-0,089	7,913	7,934	-0,021	2,434	2,445	-0,011
2	7,440	7,406	0,034	6,761	6,696	0,065	2,133	2,173	-0,040
3	7,603	7,834	-0,231	4,168	4,253	-0,085	4,120	4,002	0,118
4	7,289	7,493	-0,204	7,759	7,755	0,004	3,444	3,426	0,018
5	3,041	2,855	0,186	1,519	1,726	-0,207	3,087	3,081	0,006
6	4,919	4,932	-0,013	1,652	1,522	0,130	3,853	3,866	-0,013
7	6,308	6,144	0,164	2,204	2,414	-0,210	3,233	3,220	0,013
8	6,143	6,201	-0,058	3,764	3,586	0,178	2,590	2,603	-0,013
9	3,027	2,964	0,063	7,325	7,321	0,004	1,985	2,027	-0,042
10	2,867	2,837	0,030	8,030	8,079	-0,049	2,077	2,094	-0,017
11	2,079	2,101	-0,022	7,957	7,971	-0,014	2,101	2,127	-0,026
12	2,679	2,715	-0,036	6,872	6,857	0,015	2,057	2,040	0,017
13	2,679	2,715	-0,036	6,872	6,857	0,015	2,057	2,040	0,017
14	9,083	9,054	0,029	4,921	4,990	-0,069	3,925	3,946	-0,021
15	6,860	6,780	0,080	6,074	5,936	0,138	3,319	3,504	-0,185
16	7,041	6,963	0,078	6,848	6,876	-0,028	3,756	3,766	-0,010



17	2,793	2,774	0,019	7,893	7,844	0,049	3,148	3,149	-0,001
18	0,160	0,135	0,025	3,072	2,872	0,200	2,696	2,816	-0,120
19	6,423	6,424	-0,001	3,056	3,082	-0,026	2,200	2,213	-0,013
20	4,973	4,866	0,107	3,461	3,433	0,028	2,410	2,408	0,002
21	5,161	5,163	-0,002	3,830	3,757	0,073	2,187	2,187	0,000
22	6,667	6,612	0,055	4,113	4,061	0,052	3,355	3,351	0,004
23	4,258	4,322	-0,064	2,790	2,845	-0,055	3,122	3,132	-0,010
24	0,537	0,474	0,063	6,989	7,000	-0,011	3,112	3,109	0,003
25	3,918	4,141	-0,223	8,184	8,262	-0,078	2,650	2,656	-0,006
26	8,847	8,818	0,029	5,549	5,611	-0,062	2,731	2,710	0,021
27	2,588	2,414	0,174	2,979	3,224	-0,245	1,961	1,717	0,244
28	7,778	7,570	0,208	9,746	9,772	-0,026	1,860	1,677	0,183
29	0,924	0,679	0,245	5,179	5,352	-0,173	3,233	3,226	0,007
30	0,059	0,126	-0,067	1,620	1,702	-0,082	1,592	1,623	-0,031
$\Sigma [dx^2] =$			$\Sigma [dy^2] =$			$\Sigma [dh^2] =$			
0,403			0,3374			0,3234			



$$m_x = \sqrt{\frac{dx^2}{n}} = 0.116 \text{ m}$$

$$m_y = \sqrt{\frac{dy^2}{n}} = 0.1061 \text{ m}$$

$$m_H = \sqrt{\frac{dH^2}{n}} = 0.074 \text{ m}$$

$$m_{X,y} = \pm \sqrt{m_x^2 + m_y^2} = 0.136 \text{ m}$$

Donde:

m_x ; m_y ; m_H -Incertidumbres de medición en los ejes x, y, z.

dx ; dy ; dH -Desviaciones con respecto a la media en el los ejes x, y, z.

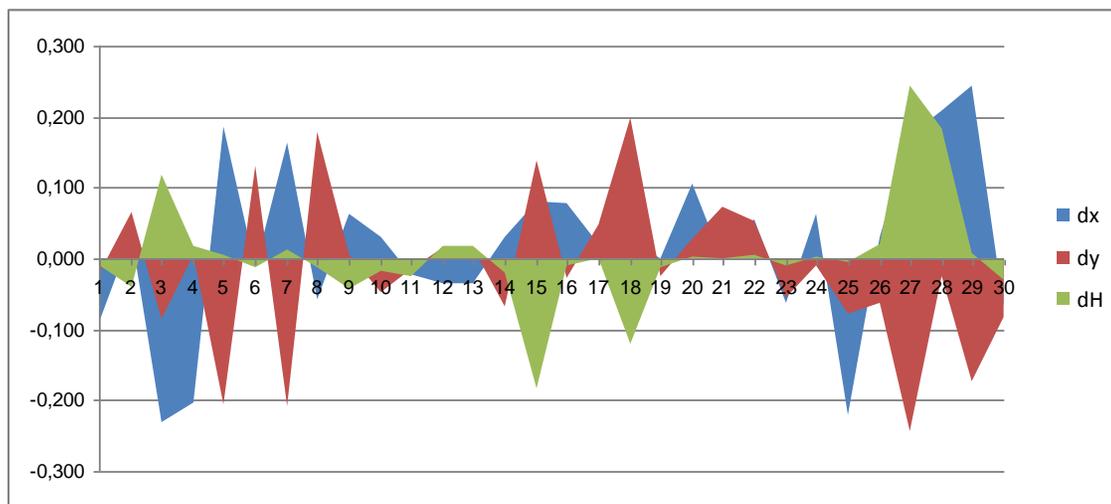
n - Cantidad de mediciones.

La incertidumbre admisible para la altimetría es de 0.125 m y se obtuvo 0.074 m. y en planimetría es de 0.25 m y se obtuvo 0.136m.

No se detectó en los controles omisión de contornos y representación incorrecta del relieve. La calidad del modelo es "Buena".

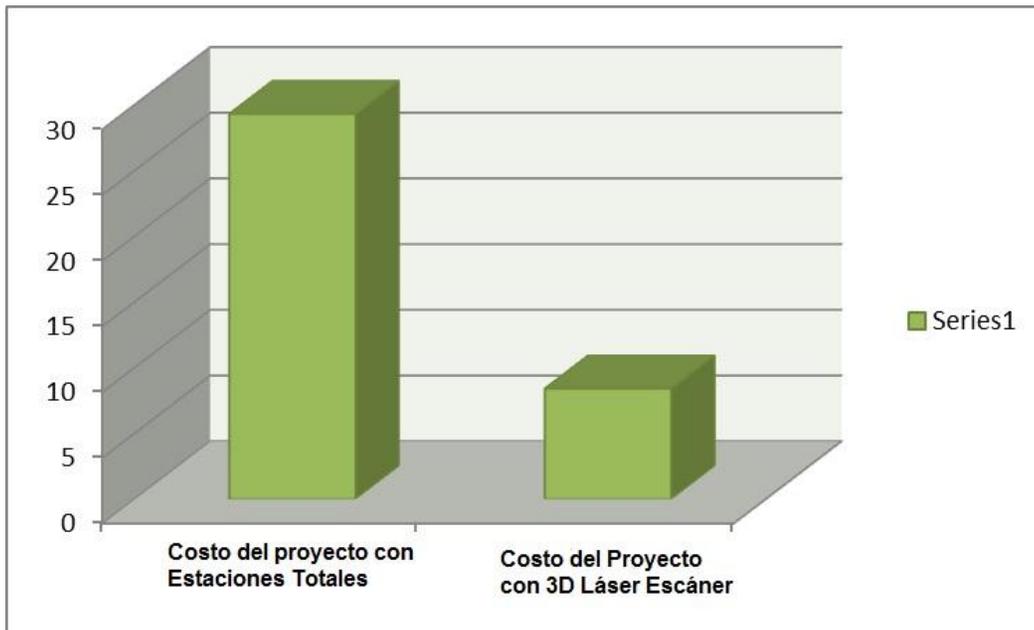
En base del control realizado, la ejecución del trabajo se aprobó con la calificación de "Buena".

Incertidumbre.

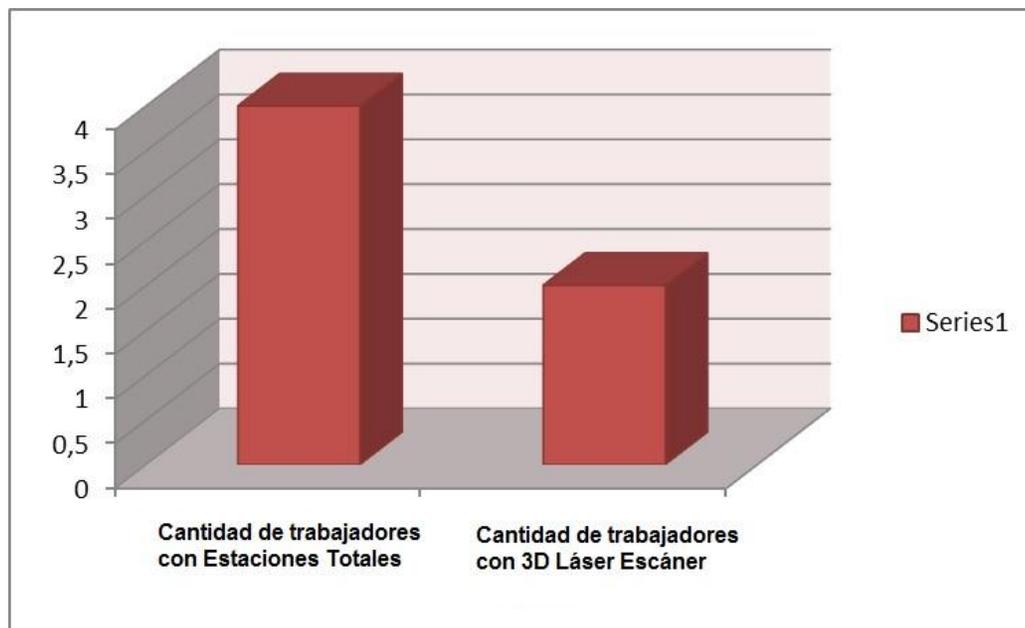




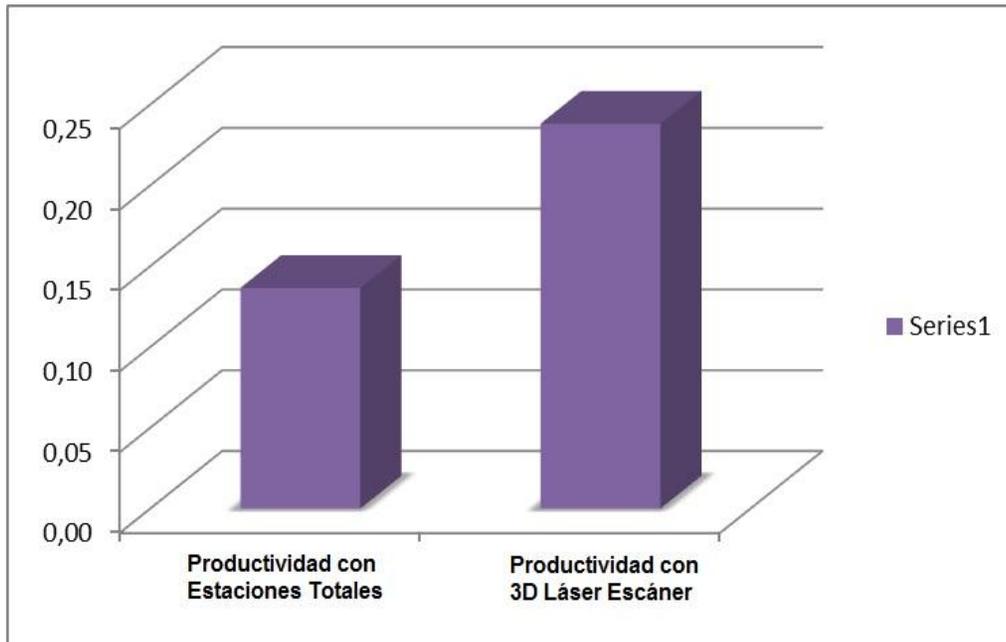
Anexo 4: Indicadores de eficacia vinculados en la productividad



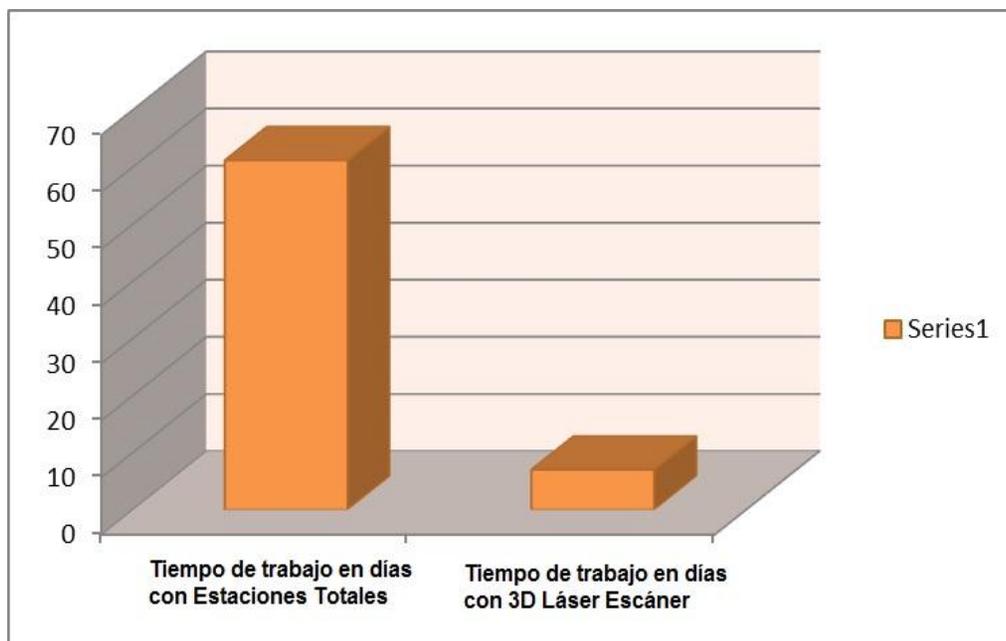
Costo del Proyecto con Estaciones Totales	29,3
Costo del proyecto con 3D Láser Escáner	8.4



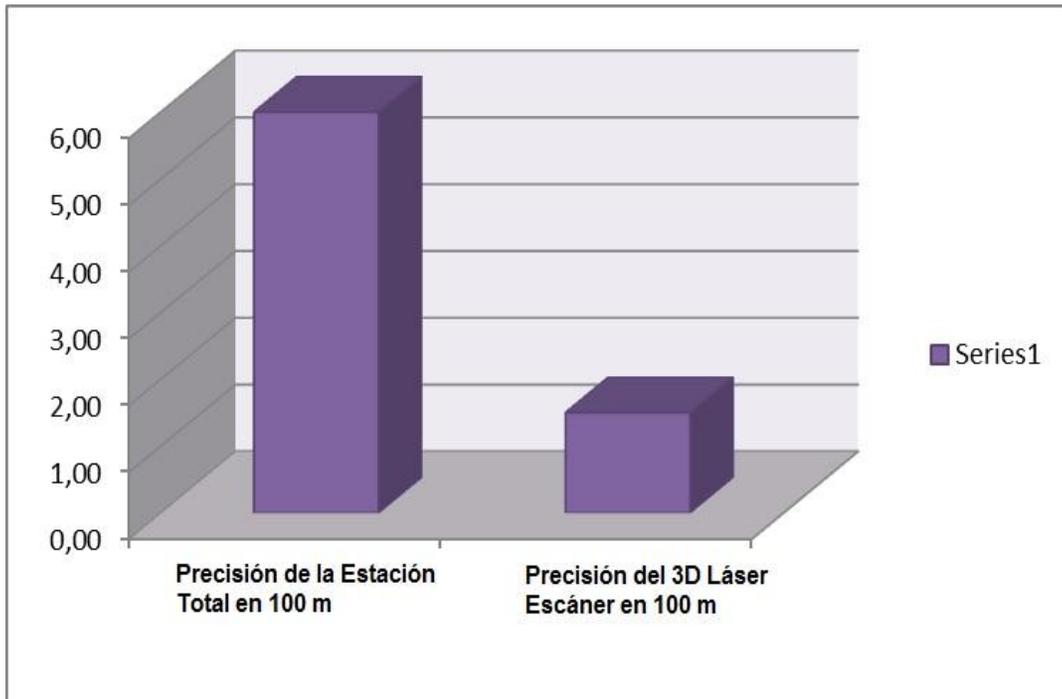
Cantidad de trabajadores con Estaciones Totales	4
Cantidad de trabajadores con 3D Láser Escáner	2



Productividad con Estaciones Totales	0,14
Productividad con 3D Láser Escáner	0,61



Tiempo de trabajo en días con Estaciones Totales	61,17
Tiempo de trabajo en días con 3D Láser Escáner	7



Precisión de la Estación Total en 100 m	6,00
Precisión del Escáner en 100 m	1,50