

**Trabajo Final**

**“Agrimensura 3D con tecnología LiDAR”**



**Alumno: FALIP, Sofia**

**N° de alumno: 60295/4**

**Director: Prof. Dr. Daniel Del Cogliano**

**Codirector: Ing. Agrim. Rodrigo Loray**

**Año de ejecución: 2015**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**DEPARTAMENTO DE AGRIMENSURA**

**CATEDRA TRABAJO FINAL**

**PROFESOR: Ing. J. Ricardo SOTO**

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Dr. Daniel Del Cogliano, por darme la oportunidad de formar parte del grupo de investigación de LiDAR y gracias a ello desarrollar este trabajo; y por ejercer su labor de director con suma responsabilidad dándome la seguridad de contar con sus conocimientos y experiencia.

Al Ing. Agrim. Rodrigo Loray, quien realizó su tarea de codirector con absoluto compromiso y responsabilidad, estando permanentemente presente, brindándome tanto conocimientos teóricos como prácticos.

A mis compañeros del grupo de investigación de LiDAR que me ayudaron, en especial, al Licenciado en Diseño Multimedia Víctor Emilio Mezio, quien me ayudó cuantas veces lo solicite.

Al Ing. Agrim. Elvio Pérez por su colaboración en parte de las tareas de campo y por estar a disposición cada vez que recurrí a él brindándome sus conocimientos.

Al Agrimensor Leandro Soto por la ayuda prestada durante el transcurso del desarrollo del trabajo.

Al Ing. Agrim Nicolás Beloqui por su colaboración en parte de las tareas de campo, transmitiéndome su experiencia y trabajando con suma responsabilidad.

Al Ing. Agrim. José Romano por el compromiso en sus respuestas ante cada consulta.

Al Ing. Civil y en Construcciones Gustavo Daniel Humbert por acompañarme y alentarme durante todo el trabajo.

A mi grupo de amigos y amigas, que colaboraron en las diferentes etapas de este trabajo, estando presentes cada vez que lo necesité.

A mi familia y a mi amiga del alma, Ayeray Bonansea, por su apoyo incondicional.

# Índice

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>6</b>
1.1.	Objetivos	6
1.1.1.	Generales	6
1.1.2.	Específicos	6
1.2.	Metodología	7
1.3.	Definición de área de trabajo	7
1.4.	Análisis Preliminar	10
1.4.1.	Georreferenciación	10
1.4.2.	Altimétrico	11
1.4.3.	Documentación antecedente (planos) de los edificios	11
<b>2.</b>	<b>LiDAR</b>	<b>12</b>
2.1.	Introducción sobre la tecnología LiDAR	12
2.2.	Fundamentos del láser	14
2.3.	Reseña histórica	15
2.4.	Principios básicos de medición del sistema LIDAR	16
2.4.1.	Tiempo de vuelo	17
2.4.2.	Método de diferencia de fase	19
2.4.3.	Mejoras introducidas en la medición mediante pulsos	22
2.4.3.1.	Registro de múltiples retornos	22
2.4.3.2.	Digitalización de onda completa	25
2.4.3.3.	Múltiples pulsos simultáneos	26
2.5.	Clasificación de los sistemas LiDAR	27
2.5.1.	LiDAR Aerotransportado	28
2.5.1.1.	Características del relevamiento LIDAR aéreo	33
2.5.1.2.	Productos y aplicaciones	35

2.5.1.3.	Geometría	40
2.5.1.4.	Registro	44
2.5.1.5.	Calibración	45
2.5.2.	LiDAR Terrestre	46
2.5.3.	LiDAR Terrestre Estático	46
2.5.3.1.	Productos generados	48
2.5.3.2.	Aplicaciones	49
2.5.3.3.	Geometría	51
2.5.3.4.	Registro	52
2.5.3.5.	Calibración	55
2.5.4.	LiDAR Terrestre Móvil	55
2.5.4.1.	Productos generados	56
2.5.4.2.	Aplicaciones	56
<b>3.</b>	<b>APLICACIÓN</b>	<b>57</b>
3.1.	Tareas de apoyo al relevamiento LiDAR	57
3.1.1.	Marco de referencia	58
3.1.2.	Elección de los puntos y diseño de la poligonal	60
3.1.3.	Relevamiento Planialtimétrico	62
3.1.4.	Procesamiento de la Poligonal	67
3.1.5.	Resultados Finales	73
3.2.	Relevamiento LiDAR	75
3.2.1.	Instrumento	75
3.2.2.	Campaña	76
3.2.3.	Distribución de las estaciones LiDAR	77
3.2.4.	Objetos de referencia	81
3.2.5.	Parámetros a configurar en cada escaneo	88

3.3.	Procesamiento de datos LiDAR	90
3.3.1.	Software	90
3.3.2.	Gestión/Edición inicial de los datos	91
3.3.3.	Registro	98
3.3.4.	Escaneos con color	101
3.3.5.	Producto	102
3.3.6.	Análisis de los resultados del registro	106
<b>4.</b>	<b>HONORARIOS Y GASTOS</b>	<b>121</b>
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>126</b>
<b>6.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>129</b>
<b>7.</b>	<b>ANEXOS</b>	<b>131</b>
7.1.	Anexo I	131
7.2.	Anexo II	135
7.3.	Anexo III	160
7.4.	Anexo IV	166
7.5.	Anexo V	169

# 1. INTRODUCCIÓN

La formación actual del Agrimensor propende a que los nuevos profesionales sean los productores natos de información territorial georreferenciada, capaces de su procesamiento e interpretación, de manera que la misma sea insumo del ordenamiento territorial. La tecnología láser de perfilado y escaneo se ha convertido en una importante herramienta de adquisición de datos geoespacial, ya que instalados en plataformas aéreas y terrestres, estos sistemas pueden recopilar datos 3D en grandes volúmenes con alta precisión, rapidez y resolución sin precedentes. Estas son razones suficientes para afirmar que esta nueva tecnología está naturalmente relacionada con la Agrimensura, y es el Agrimensor quien debe ocupar un papel importante en el estudio de la misma, incorporándola como una herramienta más para brindar a la sociedad soluciones cada vez más eficientes.

## 1.1. Objetivos

### 1.1.1. Generales

La finalidad del trabajo es amplia, pues incluye el estudio y experimentación con el nuevo instrumental LiDAR<sup>1</sup>, la utilización y análisis de la información a través de software específico y la obtención de un producto. No obstante, el interés es fundamentalmente metodológico.

Descripción sintética de los objetivos generales:

- Estudio y aplicación de la tecnología LiDAR.
- Poner en práctica esta nueva tecnología (LiDAR) a partir de un “sensor fijo” y software recientemente adquirido por la UNLP<sup>2</sup>.
- Establecer conocimientos básicos transmisibles para el desarrollo y aplicación de la tecnología LiDAR.

### 1.1.2. Específicos

- Obtención de un modelo 3D, debidamente georreferenciado, a partir de técnicas LiDAR del Edificio Central de la Facultad de Ingeniería y del Colegio Nacional “Rafael Hernández” de la UNLP de alta calidad geométrica (1 a 3 cm) y resolución (cientos de puntos/m<sup>2</sup>).

---

<sup>1</sup> LiDAR: Light Detection And Ranging (Distancia a partir de la detección de la luz).

<sup>2</sup> UNLP: Universidad Nacional de La Plata

- Consolidar una base de datos 3D confiable que pueda ser utilizada en futuros análisis de las edificaciones.
- Criterios para el diseño de una medición LiDAR con sensor fijo.
- Operación del sensor Trimble TX5 de la UNLP y comprensión de su funcionamiento.
- Capacidad de procesamiento con el software Scene.

## **1.2. Metodología**

El modelo 3D de ambas edificaciones se obtendrá a partir de relevamientos con el escáner LiDAR terrestre Trimble TX5. El mismo estará georreferenciado al marco de referencia geodésico nacional (POSGAR 07<sup>3</sup>) y vinculado altimétricamente al marco de referencia vertical del I.G.N.<sup>4</sup>.

Para ello, se generará una poligonal planialtimétrica mediante métodos topográficos clásicos, a partir de la cual se determinarán las coordenadas de ciertos objetos de referencia. La georreferenciación estará basada en determinaciones GNSS<sup>5</sup> geodésicas y la vinculación altimétrica se efectuará con nivelación geométrica.

El producto será evaluado internamente a través de parámetros estadísticos del software de procesamiento. Se incorporarán además un conjunto de puntos de control externo que permitirán evaluar la exactitud (accuracy) de los modelos 3D obtenidos.

## **1.3. Definición de área de trabajo**

Para definir el ámbito de realización del presente trabajo se plantea una distinción entre las actividades de campo y las de gabinete.

El trabajo de campo se desarrolló en el Edificio Central de la Facultad de Ingeniería y en el Colegio Nacional “Rafael Hernández” de la UNLP. Ambos edificios se encuentran sobre la Avenida 1 entre las calles 47 y 50 de la ciudad de La Plata (Provincia de Buenos Aires). La **Figura 1-1** muestra una imagen satelital obtenida de Google Earth.

---

<sup>3</sup> POSGAR: Posiciones Geodésicas Argentinas.

<sup>4</sup> I.G.N.: Instituto Geográfico Nacional.

<sup>5</sup> GNSS: Global Navigation Satellite System (Sistema global de navegación por satélite).



Figura 1-1: Mediante un rectángulo color rojo se señala el área en donde se desarrolló el trabajo de campo. El edificio (a) es el Edificio Central de la Facultad de Ingeniería y el edificio (b) es el Colegio Nacional “Rafael Hernández”.

El relevamiento con LiDAR terrestre se realizó específicamente sobre las fachadas de rumbo SO de los dos edificios mencionados (**Figura 1-2 y Figura 1-3**).



Figura 1-2: Edificio Central de la Facultad de Ingeniería de la UNLP.





Figura 1-3: Colegio Nacional “Rafael Hernández” de la UNLP.

El trabajo de gabinete, especialmente el procesamiento de los datos LiDAR, se llevó a cabo en una oficina del edificio del Departamento de Agrimensura de la FI<sup>6</sup>-UNLP (**Figura 1-4**) debido a que cuenta con las comodidades necesarias y una PC de última generación adquirida en Diciembre de 2014 y destinada exclusivamente al procesamiento de información LiDAR. Debe destacarse que el procesamiento de la información LiDAR requiere de potentes computadoras y gran capacidad de almacenamiento de datos.



Figura 1-4: Mediante un círculo color rojo se señala el Edificio del Departamento de Agrimensura (FI-UNLP).

---

<sup>6</sup> FI: Facultad de Ingeniería.

## **1.4. Análisis Preliminar**

En cada trabajo profesional es fundamental la búsqueda y el análisis de información útil de manera previa al mismo. De hecho, en muchas ocasiones, completar o no esa instancia de reconocimiento, determina el tiempo que demanda el trabajo, y por lo tanto define en gran medida los costos del mismo. A su vez, actualmente se dispone de múltiples herramientas gratuitas que bien utilizadas facilitan la planificación de las tareas. Por estos motivos, se puso especial énfasis en la búsqueda y en el estudio de información de interés y en el análisis de la zona de trabajo. De esa manera se obtuvo un panorama completo que permitió diseñar y planificar las actividades de campo y de gabinete.

### **1.4.1. Georreferenciación**

Para la georreferenciación del trabajo, es necesario disponer de marcas con coordenadas en el marco de referencia geodésico nacional: POSGAR 07; por ello fueron analizadas los puntos más próximos a la zona de trabajo.

Gracias a que el área del trabajo es conocida por tratarse del predio y zonas aledañas de la Facultad de Ingeniería, desde un primer momento se definió que el punto POSGAR 07 al cual se iba a georreferenciar el mismo sería el correspondiente a la estación permanente LPGS ubicada en la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas. Dicha elección se fundamenta en la proximidad del punto y en la posibilidad del uso del servicio que brinda la estación.

En caso de que la zona no se tratara de un sitio conocido, hubiese sido necesario realizar un minucioso estudio de los puntos con coordenadas POSGAR 07, con el objetivo de determinar él o los puntos a utilizar. Seguidamente se desarrolla una de las formas posibles de llevar a cabo el análisis.

En el sitio web oficial del IGN se puede buscar la lista de coordenadas geodésicas de los puntos que se encuentran en el marco de referencia geodésico nacional en el país y descargar el archivo de formato \*kml que permite la visualización de la información en el software Google Earth™. Dichos puntos son los pertenecientes a la red POSGAR 07, y a otras redes provinciales y regionales integradas al mismo sistema de referencia, como la red GEOBA<sup>7</sup> y la red PASMA<sup>8</sup>.

---

<sup>7</sup> GEOBA: Red Geodésica de la Provincia de Buenos Aires.

<sup>8</sup> PASMA: Red Proyecto de Apoyo al Sector Minero Argentino.

Por otro lado, la República Argentina cuenta con una red de estaciones GNSS permanentes integradas al marco de referencia geodésico nacional denominada Red RAMSAC<sup>9</sup>. También desde el sitio oficial del IGN es posible descargar el archivo de formato \*kml de los puntos de la red.

A partir de la información de todos los puntos disponibles con coordenadas en POSGAR 07 y teniendo en cuenta la ubicación de la zona del trabajo se podría definir así él o los puntos a utilizar.

#### **1.4.2. Altimétrico**

La elección del punto fijo a partir del cual se vincularía altimétricamente todo el trabajo al 0 del IGN, resultó de un análisis de todos los puntos existentes en el campo de la Facultad de Ingeniería. En el estudio, además de tener en cuenta la proximidad de los mismos con respecto a los edificios a relevar, se consideraron los resultados arrojados por un Trabajo de Post Grado de Compensación <sup>10</sup>realizado sobre los puntos en cuestión. Finalmente, el punto a utilizar se encuentra ubicado en la pared SE del edificio de Química.

#### **1.4.3. Documentación antecedente (planos) de los edificios**

Contar con documentación sobre la estructura de los edificios a relevar es de suma importancia debido a que, brinda la posibilidad de contrastarla con la información obtenida a partir del relevamiento LiDAR y determinar así conclusiones de gran valor. Si se trata de un plano de obra, es posible determinar qué diferencias existen entre el diseño original y el edificio realizado; si se trata de un plano creado a partir de un relevamiento del edificio ya construido, sería posible obtener conclusiones sobre deformaciones que sufrió el mismo. Obviamente, a la hora de comparar, es necesario tener en cuenta las metodologías utilizadas para obtener los datos y considerar las distintas precisiones.

Por medio del Director de Carrera, Agrim. Bernardo Saraví Paz, se solicitó a las autoridades correspondientes planos antecedentes de las edificaciones en cuestión.

Del Edificio Central de la Facultad de Ingeniería la única información disponible son planos de las plantas (Ver Anexo I). Averiguando la procedencia de los mismos, lamentablemente se llegó a la conclusión que no constituyen información fiable ya que los mismos están

---

<sup>9</sup> RAMSAC: Red Argentina de Monitoreo Continuo.

<sup>10</sup> Ajuste de una Red Altimétrica por el método de Mínimos Cuadrados. Gabriela Méndez Caratti – Nicolás Beloqui – José Romano.

realizados a partir de un relevamiento de hace por lo menos 15 años del cual no se sabe la metodología aplicada y a su vez, se han detectado varios errores.

En cuanto al Colegio Nacional, no se logró conseguir información antecedente.

## 2.LiDAR

### 2.1. Introducción sobre la tecnología LiDAR

El término LiDAR es un acrónimo que proviene de la denominación en inglés “*Light Detection And Ranging*”, es decir, distancia a partir de la detección de la luz. Se trata de una tecnología que permite capturar cualquier elemento en 3D de manera discreta pero con una alta resolución.

Esencialmente, el sistema LiDAR es un sensor activo (ya que él mismo genera la energía) que emite luz láser hacia el objeto que se desea medir; al impactar el haz en el blanco, el mismo es reflejado de manera difusa y parte de la energía regresa al sensor, quien lo registra.

El proceso de registro está compuesto por tres fases principales:

- Recepción. El receptor recibe la fracción de energía reflejada, debiendo identificar y definir la señal.
- Amplificación. El amplificador es el elemento encargado de amplificar la señal recibida considerando que, la intensidad del rayo disminuye conforme a la distancia recorrida y a la pérdida ocasionada por la reflexión.
- Individualización de la señal recibida. Por medio de un detector y un contador de tiempo ó medidor de fase, se determina el instante en el que se recibe la señal.

El cálculo de la distancia sensor-objetivo ( $d$ ) se reduce a determinar de alguna manera el tiempo ( $t$ ) que tarda el rayo en recorrerla, ya que la velocidad de propagación de la luz láser ( $v$ ) es conocida (velocidad de la luz en el vacío: 299792 km/s y en el aire en condiciones normales 299706 km/s). Luego:

$$d = v \cdot t$$

Sin embargo, el tiempo que se determina es el que transcurre entre el momento en que parte el haz, se refleja en el objetivo y regresa nuevamente al sensor; por lo tanto, se tiene el tiempo que tarda la señal en ir y volver, razón que obliga a modificar la fórmula anterior a:

$$d = \frac{v \cdot t}{2}$$

Para poder calcular las coordenadas del objeto con el cual impactó la señal, el sensor también registra la dirección de la misma respecto de alguna referencia.

Además de obtener el registro geométrico del objeto escaneado, es posible conseguir información radiométrica (intensidad de luz, por ejemplo) del mismo a partir de analizar los cambios producidos en las propiedades de la luz reflejada.

Al ser un instrumento activo, otorga la posibilidad de realizar relevamientos tanto de día como de noche. En cuanto a las longitudes de ondas, los fabricantes eligen aquellas en donde la absorción en la atmósfera es mínima. El rango del espectro que se utiliza abarca desde el ultravioleta (15 nm) al infrarrojo cercano (2500 nm). Otro punto que se tiene en cuenta al momento de elegir la longitud de onda, es la interacción de los elementos de la superficie terrestre con la radiación. Cada tipo de material, refleja la radiación incidente de forma diferente según la longitud de onda (**Figura 2-1**). Por ejemplo, los sensores batimétricos, que tienen como objetivo capturar información tanto del lecho marino como del espejo de agua, emiten pulsos en diferentes longitudes de onda: IR<sup>11</sup> y verde. El IR penetra muy poco, y es reflejado por la superficie del agua por lo que es utilizado para la localización de ésta; mientras que la radiación verde es la utilizada para la detección del fondo marino, ya que su longitud de onda atraviesa el agua y se refleja en el fondo del lecho marino.

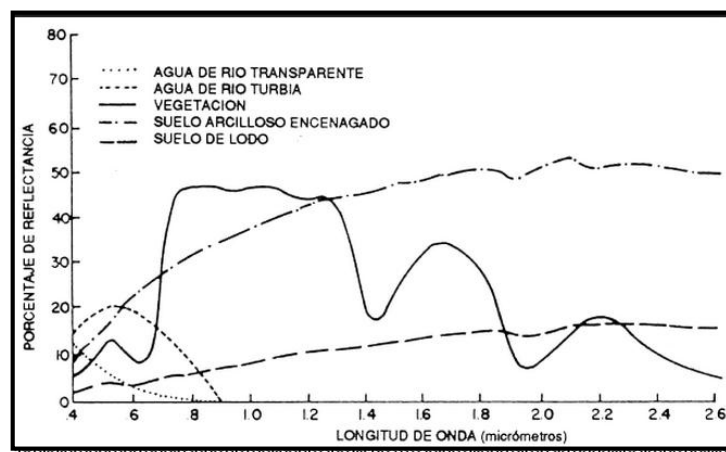


Figura 2-1: Signatura espectral de algunas superficies.

<sup>11</sup> IR: Infrarrojo.

Es válido aclarar que, a diferencia del RADAR<sup>12</sup>, el sensor LiDAR es dispersado por nubes, lluvia o niebla; esto permite su uso en aplicaciones para estudios atmosféricos y climatológicos.

Sin dudas, una de las principales características que posee el LiDAR que lo destaca frente a otras tecnologías, es la alta velocidad de adquisición que posee. Hoy en día, existen equipos que trabajan con una frecuencia 500K Hz, logrando una resolución extraordinaria. El resultado que se obtiene, es una densa nube de puntos en verdadera magnitud a partir de la cual se pueden realizar, por ejemplo, cálculos métricos, modelado de entidades, cortes y perfiles.

## **2.2. Fundamentos del láser**

Se denomina láser al instrumento capaz de generar ondas de luz usando una estrecha banda del espectro. El nombre deriva del acrónimo en inglés *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, es decir, amplificación de la luz por emisión estimulada de radiación.

Esencialmente un láser es un dispositivo óptico que, cuando se activa por una fuente de energía externa, produce y emite un haz de luz. Estas ondas poseen ciertas características que las hacen especiales para la determinación de medidas:

- El láser emite un flujo de energía de forma unidireccional, de modo que cada rayo del haz puede considerarse paralelo a cualquier otro. Esto significa que la potencia de la radiación alcanza un objetivo a la vez con muy poca divergencia sobre largas distancias.
- La emisión es coherente en tiempo y espacio.
  - El hecho de que sea coherente en tiempo, significa que la emisión de luz es monocromática: los fotones emitidos por un láser poseen longitudes de onda muy cercanas entre sí. La ventaja de esto es que como el índice de refracción “n” de un medio es función de la longitud de onda de la señal que lo atraviesa y todos los fotones poseen la misma longitud de onda, hay menos refracción/dispersión ya que el “n” es el mismo para todos los fotones.
  - La coherencia espacial significa que el frente de onda está en fase, hecho que evita la interferencia destructiva, provocando una propagación (idealmente)

---

<sup>12</sup> RADAR: Radio Detection And Range (Detección y medición [de distancias] por radio).

sin atenuación. De este modo con menor potencia de emisión se consigue un mayor alcance.

### **2.3. Reseña histórica**

Desde la invención del láser de estado sólido (1960), de gas (1961), y el semiconductor (1962), el principio fue adaptado rápidamente para su utilización en ingeniería y agrimensura. Varios tipos de instrumentos topográficos basados en láser han sido concebidos siendo una de las primeras aplicaciones las operaciones de medición y alineación. No obstante, su implementación en un campo cada vez más amplio de aplicaciones siempre estuvo sujeta a las limitaciones tecnológicas asociadas.

La teledetección moderna basada en láser se inició en la década de 1970 en la NASA<sup>13</sup> trabajando con prototipos aerotransportados para el desarrollo de un sensor montado en un vehículo espacial. Estos esfuerzos fueron dirigidos principalmente para la medición de las propiedades de la atmósfera, del agua del océano, del dosel forestal, pero no para cartografía topográfica.

Investigaciones científicas realizadas en la Universidad de Stuttgart (Alemania) demostraron la alta precisión geométrica del sistema láser, pero en ese momento (mediados de 1980) la falta de una solución confiable para el posicionamiento del sensor era un obstáculo significativo para promover el desarrollo de esta tecnología.

La demanda de técnicas de georreferenciación directa para uso en fotogrametría aérea impulsó el desarrollo de los sistemas GPS<sup>14</sup>/IMU<sup>15</sup>, basados en posicionamiento satelital GPS y sistemas inerciales de medición IMU. La introducción de esta tecnología y los avances generales en la informática fueron claves para el progreso de los sistemas láser. De esta manera, a mediados de 1990 los fabricantes de escáner láser entregaban instrumentos LiDAR capaces de emitir 2.000 a 25.000 pulsos por segundo.

A finales de la década de 1990, estos instrumentos ya estaban entregando conjuntos de datos increíblemente densos, imposibles de lograr mediante fotogrametría y fueron lo suficientemente robustos como para validar la creencia en el LiDAR como el "camino del futuro."

---

<sup>13</sup> NASA: National Aeronautics and Space Administration (Administración Nacional de Aeronáutica y Espacial).

<sup>14</sup> GPS: Global Positioning System (Sistema de posicionamiento global).

<sup>15</sup> IMU: Inertial Measurements Units (Unidad de Medición Inercial).

Sin embargo, en esa época todavía existía una limitación: el tratamiento de los datos; tanto por la velocidad de los ordenadores como por la ausencia de software que procesara la numerosa cantidad de información proporcionada por esta tecnología. Ésta se subsanó a principios del 2000, con el rápido avance de la tecnología de cómputo.

A medida que la demanda de datos LiDAR creció, también lo hizo la necesidad de directrices, de especificaciones técnicas y de normas de precisión. Entidades del gobierno de Estados Unidos, específicamente FEMA<sup>16</sup>, el USACE<sup>17</sup>, el USGS<sup>18</sup> y el FGDC<sup>19</sup> desarrollaron las normas de garantía de la calidad y la exactitud de la información.

Tanto la ISPRS<sup>20</sup> como la ASPRS<sup>21</sup> proporcionaron espacios para el intercambio de las investigaciones científicas y las aplicaciones basadas en el uso de los datos LiDAR.

Aunque no existen normas públicas todavía disponibles para datos o productos derivados LiDAR, el ASPRS ha desarrollado LAS<sup>22</sup>, para el intercambio de datos binarios de los datos LiDAR que ha sido ampliamente aceptado por fabricantes de sensores, desarrolladores de software, y la comunidad de usuarios finales; y hoy en día, se ha convertido en un estándar para la transferencia de este tipo de información.

Actualmente, hay más de 200 sistemas LiDAR que operan en el mundo. Los últimos son capaces de emitir 500.000 pulsos por segundo, capturar múltiples retornos de pulsos individuales, e incluso digitalizar la forma de onda de retorno. Además, incluyen cámaras ópticas para añadir información complementaria en el espectro visible a cada punto medido y se articulan en muchos casos con cámaras de calidad fotogramétrica.

## **2.4. Principios básicos de medición del sistema LIDAR**

Existen dos métodos básicos para la medición óptica de la distancia con láser: estimación del tiempo de vuelo de la luz y triangulación. Los sistemas LiDAR utilizan el primero (Ver Apartado 2.1: Introducción sobre la tecnología LiDAR), dentro del cual se identifican otros

---

<sup>16</sup> FEMA: Federal Emergency Management Agency (Agencia Federal para la Gestión de Emergencia).

<sup>17</sup> USACE: U.S. Army Corps of Engineers (Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos).

<sup>18</sup> USGS: United States Geological Survey (Servicio Geológico de los Estados Unidos).

<sup>19</sup> FGDC: Federal Geographic Data Committee (Comité Federal de Datos Geográficos).

<sup>20</sup> ISPRS: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (Sociedad Internacional de Fotogrametría y Sensores Remotos).

<sup>21</sup> ASPRS: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (Sociedad Americana de Fotogrametría y Teledetección).

<sup>22</sup> LAS: Lidar Archive Standard (Archivos estándar de LiDAR).



dos sub-métodos según la forma de obtención del tiempo: tiempo de vuelo TOF<sup>23</sup> y diferencia de fase.

La técnica de Interferometría puede ser clasificada de manera separada como un tercer método o se la puede incluir como otro sub-método dentro del de Estimación del tiempo de vuelo de la luz, dependiendo de cómo se analice la forma de medir.

No obstante, como el presente trabajo posee especial énfasis en aplicaciones topográficas, se desarrollan sólo los de tiempo de vuelo y diferencia de fase que son los utilizados en los sensores topográficos.

### **2.4.1. Tiempo de vuelo**

En este caso, la distancia que hay entre el instrumento de medición y el objeto, se determina a partir de medir de manera muy precisa el tiempo que demora un pulso corto de radiación láser en viajar hasta el objeto y volver nuevamente al equipo. Luego, el cálculo de la distancia se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$d = \frac{v \cdot t}{2}$$

Donde el observable es el tiempo de vuelo  $t$  y  $v$  es la velocidad de propagación de la luz láser, que se considera conocida.

La precisión en la medida de la distancia está dada por la primera derivada de la función anterior:

$$\partial d = \frac{1}{2} \cdot v \cdot \partial t$$

Como se observa, la precisión de este método depende en forma crítica de la calidad con que se obtenga la medida del tiempo, ya que un pequeño error en el mismo se multiplica  $1,5 \cdot 10^8$  m/seg.

Los tiempos de vuelo son extremadamente cortos, aún para distancias largas. Por ejemplo, si la distancia a medir son 10 km, el tiempo de viaje del pulso será de:

$$t = \frac{2 \cdot 10 \text{ km}}{300000 \text{ Km/seg}} = 66,6 \mu\text{seg}$$

---

<sup>23</sup> TOF: Time-of-flight (Tiempo de vuelo).

Y si se pretende un error en la distancia del orden del centímetro, el reloj debe ser capaz de medir un intervalo de 66 ps, hecho que obliga a que el mismo posea una frecuencia de 15 GHz.

$$\Delta t = \frac{2 \cdot \Delta d}{v} = \frac{2.1 \text{ cm}}{300000 \text{ Km/seg}} = 66,6 \text{ pseg}$$

Una parte esencial de la medición basada en TOF, es el método de detección utilizado para determinar el tiempo de vuelo. Si bien existen diferentes técnicas, la mayoría se encuentran basadas en la fijación de un cierto nivel umbral.

A partir de lo mencionado anteriormente, la forma del pulso que se transmite al medio, se convierte en una característica muy importante. La situación ideal sería aquella en la que el pulso una vez reflejado por el objeto, regrese con un flanco de subida abrupto debido a que el valor del umbral no puede ser muy pequeño ya que de otra forma cualquier “ruido” podría ser detectado como un pulso, midiéndose tiempo falso.

Por ejemplo, si el haz impacta sobre una superficie inclinada, el área iluminada por la huella es más ancha que si impacta sobre una superficie plana y así lo es el pulso de retorno; por lo tanto va a presentar un tiempo de subida mayor. Entonces, suponiendo que el pulso arriba al sensor en un instante de tiempo  $t_R$ , el nivel umbral se alcanzará más tarde generándose un tiempo de retardo  $t_{\text{retardo}}$  (**Figura 2-2**). De esta manera, se está midiendo un tiempo más largo:

$$t_{\text{medido}} = t_R + t_{\text{retardo}}$$

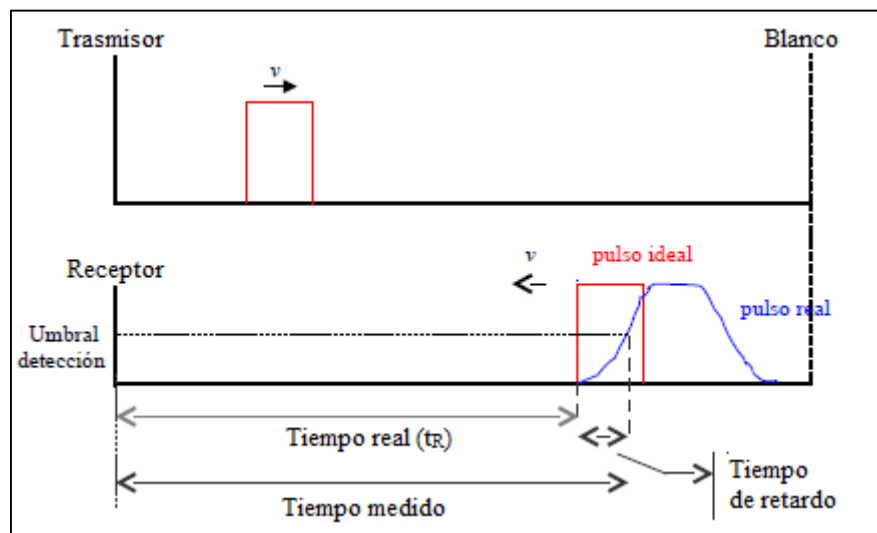


Figura 2-2: Esquematación del recorrido de un pulso desde que se emite hasta que se recibe luego de impactar con el blanco.

El valor del umbral puede estar dado en unidad de intensidad o de tiempo. En la mayoría de la bibliografía consultada, está dado en unidad de tiempo y no es inferior a 0,5 ns; lo que se traduce en 15 cm. Esto representa la indeterminación en la medida con pulsos.

En cuanto a las características técnicas de estos equipos, como las distancias a medir, van desde algunos metros hasta cientos de kilómetros, los sensores deben contar con un amplificador ya que la señal que regresa se va debilitando por diferentes motivos. Uno de ellos, es que al impactar el pulso en el blanco, la energía se difracta y sólo vuelve al sensor una pequeña porción de la enviada; otro motivo es que el pulso tanto en el viaje de ida como en el de vuelta se va dispersando en varias direcciones debido a pequeñas partículas que están presentes en la atmósfera.

Por otra parte, algunos de estos sensores, tienen la capacidad de registrar diferentes ecos de un mismo pulso. Los ecos se generan cuando las superficies de los objetos no alcanzan a cubrir completamente la huella iluminada del haz, de forma que una parte del haz colisiona en el objeto que encuentra primero pero otra parte continua viajando hasta impactar con otro objeto. Este tema se aborda con mayor profundidad en el Apartado 2.4.3.1.

Otro punto significativo, es la frecuencia máxima teórica de repetición del pulso. Suponiendo que no existe superposición en la transmisión y recepción, la frecuencia máxima teórica está dada por:

$$f_{m\acute{a}x} = \frac{1}{t_{viaje}} = \frac{2 \cdot v}{d}$$

A modo de ejemplo, en el caso de los escáneres terrestres, si se mide una distancia de 100 m se tiene una frecuencia máxima de 1500 KHz, en cambio en el caso de un escáner aéreo para una altura de vuelo de 1000 m, la frecuencia máxima es de 150 KHz. El hecho de que el sensor espere a recibir un pulso para enviar el siguiente, tiene el fin de evitar la confusión en la llegada de los pulsos. Sin embargo, en la actualidad, hay equipos en el mercado que superaron esta limitación al permitir enviar pulsos sin esperar a que llegue el anterior. (Ver Apartado 2.4.3.3)

## **2.4.2. Método de diferencia de fase**

En esta técnica, la distancia sensor-objeto es determinada a partir de la diferencia de fase que existe entre la señal emitida y la reflejada. Por lo tanto, se trata de una determinación indirecta del tiempo.

Se utiliza una onda continua  $CW^{24}$  de láser como portadora de una señal modulada, generalmente modulada en amplitud  $AM^{25}$ . La medida se realiza comparando la fase de la señal emitida y la reflejada de tal forma que se obtiene la diferencia y, con ella, la distancia recorrida.

Seguidamente se desarrolla la justificación matemática de este método, donde se supondrá que la onda modulada es de tipo senoidal para simplicidad del análisis.

Siendo “ $e_t$ ” la onda emitida por el sensor, “ $\omega$ ” la frecuencia angular y “ $A$ ” la amplitud, entonces se tiene:

$$e_t = A. \sin(\omega. t)$$

Luego, si “ $\tau$ ” es el tiempo que demora en recorrer la distancia de ida y vuelta hasta el objeto; la onda reflejada, al llegar al sensor se corresponde con la siguiente ecuación:

$$e_r = e_t. (t + \tau) = A. \sin(\omega. (t + \tau))$$

$$e_r = A. \sin(\omega. t + \omega. \tau)$$

Donde  $\omega. \tau$  es la diferencia de fase buscada. Denominando a  $\omega * \tau$  como  $\Delta\varphi$  y recordando que:

$$\tau = \frac{2. d}{v}$$

$$\omega = 2. \pi. f = 2. \pi. \frac{v}{\lambda}$$

Se concluye que:

$$\Delta\varphi = \frac{4. \pi. d}{\lambda}$$

Despejando la distancia, se obtiene:

$$d = \frac{\lambda}{4. \pi} \cdot \Delta\varphi$$

Esta ecuación demuestra que es posible calcular la distancia a partir de la medición de la diferencia de fase entre la señal transmitida y la recibida; ya que, la longitud de onda ( $\lambda$ ) es conocida por generarse internamente en el instrumento.

---

<sup>24</sup> CW: Continuous Wave (Onda continua).

<sup>25</sup> AM: Amplitude Modulation (Amplitud modulada).

Sin embargo, cuando la distancia “2d” es mayor que la longitud de onda  $\lambda$ , el desarrollo anterior queda sin validez porque se produce un desfase de número entero de longitudes de onda el cual no fue tenido en cuenta. Como esta situación se presentará en la totalidad de los casos, es necesario completar el desarrollo:

$$2. d = n. \lambda + \frac{\lambda}{2. \pi} . \Delta \varphi$$

$$d = n. \frac{\lambda}{2} + \frac{\lambda}{4. \pi} . \Delta \varphi$$

Donde n es el número entero de longitudes de ondas que entran en el camino de ida y vuelta de la distancia a medir, también denominado “ambigüedad” ya que es un valor que no es conocido.

Esta indeterminación se puede resolver de diferentes formas. A continuación se describen brevemente algunas de ellas:

- 1- Utilizar una longitud de onda suficientemente grande y así poder abarcar un amplio rango de distancias. Por ejemplo, si  $\lambda$  es de 300 m, se podrían medir distancias de hasta la mitad, ya que la onda va y viene, es decir, 150 m. Esta solución no es la más viable, ya que, la precisión de la medida está directamente relacionada con la longitud de onda, a mayor longitud menor precisión.
- 2- Utilizar dos o tres longitudes de onda con valores muy diferentes para cubrir una amplia distancia pero a la vez dar suficiente precisión. La longitud de onda larga define la distancia con unicidad y la longitud de onda corta define la precisión que puede obtenerse.
- 3- La opción más aplicada es realizar una serie de cambios en la longitud de onda, y por tanto, en la frecuencia del haz emitido, muy rápidamente y en sucesión. Estos cambios, son llevados a cabo automáticamente dentro del instrumento sin ninguna interacción humana. El resultado de la medición, genera un sistema de ecuaciones. La determinación de la distancia se reduce a resolver dicho sistema.

A modo de ejemplo, si el sensor realiza sólo una variación en la longitud de onda, es decir, una segunda medida empleando una onda con una longitud ligeramente inferior a la utilizada en la primera medida, se obtiene un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas:

$$d = n_1 \cdot \frac{\lambda_1}{2} + \frac{\lambda_1}{4 \cdot \pi} \cdot \Delta\varphi_1$$

$$d = n_2 \cdot \frac{\lambda_2}{2} + \frac{\lambda_2}{4 \cdot \pi} \cdot \Delta\varphi_2$$

Se puede ver, que esta metodología será válida siempre y cuando, el valor de  $n$  sea el mismo en ambas expresiones. Para que ello suceda los valores de  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  deben ser muy próximos.

Según la proximidad de los valores de las longitudes de onda, va a existir una distancia determinada, en la que  $\lambda_1$  va a entrar  $n_1$  veces y  $\lambda_2$  va a entrar  $n_2$  veces. En esta instancia, resulta imposible utilizar el sistema de ecuaciones para calcular la distancia incógnita. Esto implica, que según el alcance deseado tendrá que ser la elección de los valores de  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$ .

Debido a la limitada potencia de los CW láser, hay muy pocos escáneres láseres aéreos y espaciales que empleen este método, la mayoría utilizan el método de Tiempo de Vuelo. Prácticamente este tipo de sensores sólo se utilizan en escáneres terrestres en donde las distancias a medir son más cortas. Otra desventaja de los sensores basados en diferencia de fase frente a los basados en Tiempo de vuelo, es que sólo tienen la capacidad de registrar un eco de respuesta de la señal, es decir, cuando un mismo haz impacte sobre distintos objetos a diferentes alturas, la distancia medida será la media de todas las distancias que el cono del haz ha alcanzado. Sin embargo, vale destacar que estos sensores son mucho más precisos que los que utilizan el método TOF.

### **2.4.3. Mejoras introducidas en la medición mediante pulsos**

#### **2.4.3.1. Registro de múltiples retornos**

Como se mencionó anteriormente, los escáneres basados en TOF tienen la capacidad de registrar múltiples retornos. Esta capacidad es en parte lo que permite la obtención de información sobre el suelo desnudo en zonas donde predomina la vegetación y el cálculo de parámetros dasométricos.<sup>26</sup>

---

<sup>26</sup> La Dasometría es la ciencia dentro del campo forestal que se relaciona con la medida y estimación de las dimensiones de árboles y bosques, de su crecimiento y de sus productos. También es conocida como Dendrometría o Mensuración Forestal (*Forest Mensuration*). Algunos parámetros dasométricos son: altura de los árboles, diámetro de copa, densidad de arbolado, estimación de la biomasa.

Es necesario desarrollar este tema, por dos razones fundamentales: se trata sin dudas, de una de las principales ventajas de los sistemas LiDAR en relación al resto de los sensores utilizados en teledetección; y por otro lado, en general existe información errónea sobre su fundamentación.

El hecho de que múltiples ecos puedan ser registrados se basa en que a medida que el haz se aleja del escáner genera una huella de iluminación cada vez mayor (**Figura 2-3**).

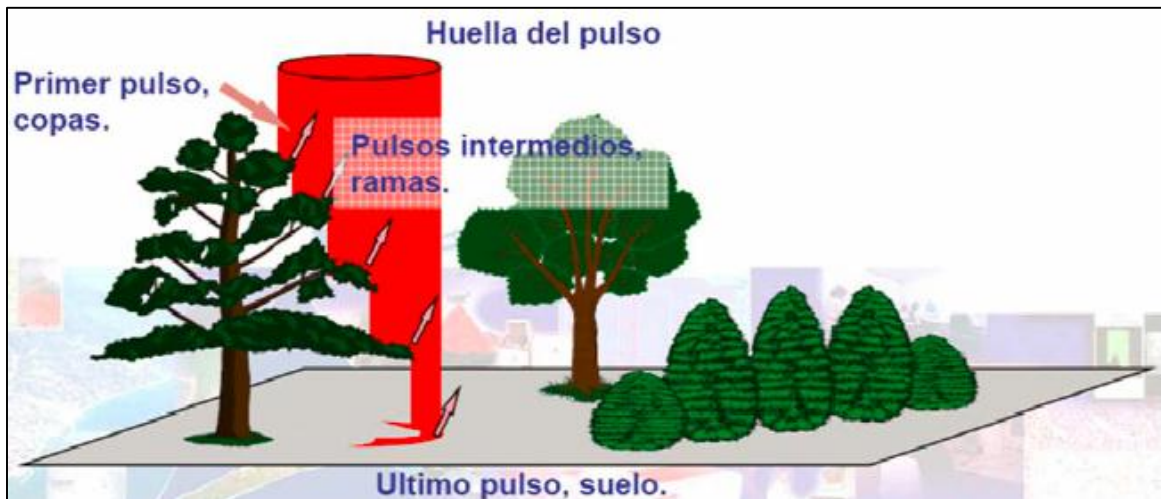


Figura 2-3: Diferentes retornos de un mismo pulso láser.

Como se observa en la **Figura 2-3**, durante el recorrido del pulso láser pueden ocurrir varias reflexiones sobre diferentes objetos, cada una de las cuales se corresponde con un “eco”. De esta manera, se produce un primer eco donde el haz impacta primero, y si no es cubierto completamente, seguirá su recorrido hasta toparse con otra superficie.

Al comienzo, los sensores almacenaban el primer y el último eco, pero actualmente existen sensores que registran ecos intermedios (hasta 4 a 9). A partir de los mismos, es posible inferir información muy valiosa, como por ejemplo, parámetros dasométricos. Si se utiliza el primer eco para el cálculo de la distancia los puntos registrados se corresponderán con la parte superior de las superficies (por ejemplo: techos de los edificios, copa de los árboles, líneas eléctricas, etc.). En cambio, si se utiliza el último eco, los puntos registrados se encontrarán en la superficie inferior (por ejemplo: suelo desnudo, troncos de los árboles, vías de comunicación, etc.) (**Figura 2-4**).

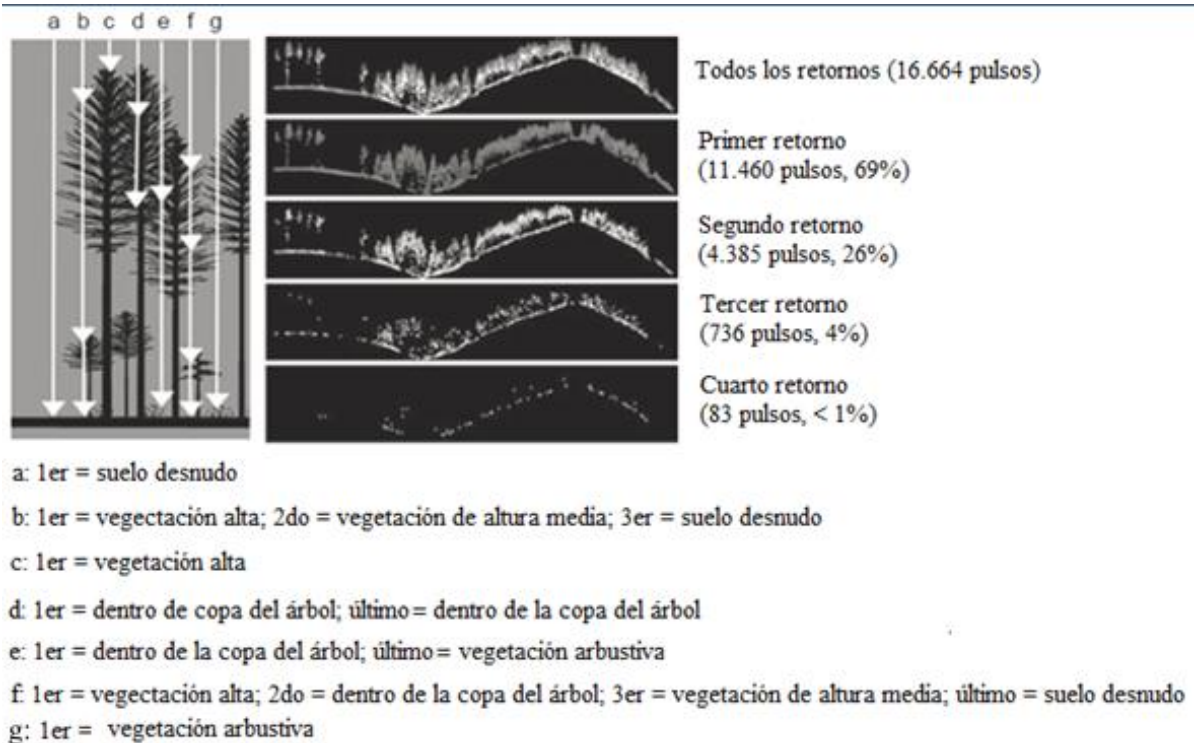


Figura 2-4: Perfiles generados a partir de una nube de puntos obtenidos en un vuelo LiDAR, utilizando los diferentes retornos registrados.

El método utilizado para la detección de ecos no es muy conocido ya que los fabricantes no suelen revelarlo, sin embargo el principio se basa en la determinación de un umbral. El mismo no es fijo, si no que se trata de un umbral adaptativo. Se recibe la señal, se analiza en forma integral, a partir de ello se establece un umbral y finalmente se determina la cantidad de ecos recibidos.

Otra propiedad crítica relacionada con la detección de ecos es el tiempo muerto de instrumento (*instrument dead-time*), que es el tiempo que se necesita que haya entre dos ecos para que los mismos sean registrados como ecos separados. Este tiempo puede ser traducido como la distancia mínima que debe haber entre dos objetos que caen dentro del área iluminada de un rayo láser, para que los mismos puedan ser discriminados a través de 2 ecos consecutivos. Esa distancia es la mitad de la longitud del pulso emitido; de donde se concluye que es el poder de resolución en distancia del sistema.

Por ejemplo, en los escáneres aéreos, usando un pulso láser de amplitud de 10 ns, la diferencia de altura mínima que pueden diferenciar dos ecos reflejados en la parte alta y la baja es de 1,5 m; en caso contrario, ambos retornos se superpondrán. Precisamente, en este tipo de sensores, esta distancia vertical es especialmente relevante para la detección de los



retornos del suelo desnudo debajo de la vegetación de corta estatura. En el caso de los escáneres terrestres, con un pulso de 0,1 ns de duración, la distancia mínima es de 15 mm.

Finalmente, se concluye que algunos sistemas LiDAR son capaces de capturar información bajo la cubierta vegetal siempre y cuando se den una serie de condiciones: la vegetación sobre la que se vuela no sea demasiado densa ni con una parte superior muy tupida, de manera que por lo menos un pequeño porcentaje de puntos alcance el suelo y que se cuente con un sensor capaz de registrar múltiples ecos. Por lo tanto, es absolutamente incorrecto afirmar que el LiDAR penetra la vegetación.

#### 2.4.3.2. Digitalización de onda completa

Desde hace algunos años, se ha diseñado una nueva generación de sensores LiDAR que registran y digitalizan toda la señal reflejada de cada pulso láser emitido. De allí su nombre, sistemas LiDAR *full-waveform*. Esta técnica analiza la señal de retorno del pulso láser emitido con el objetivo de conseguir información sobre las múltiples capas de la superficie tales como árboles y vegetación de bajo nivel.

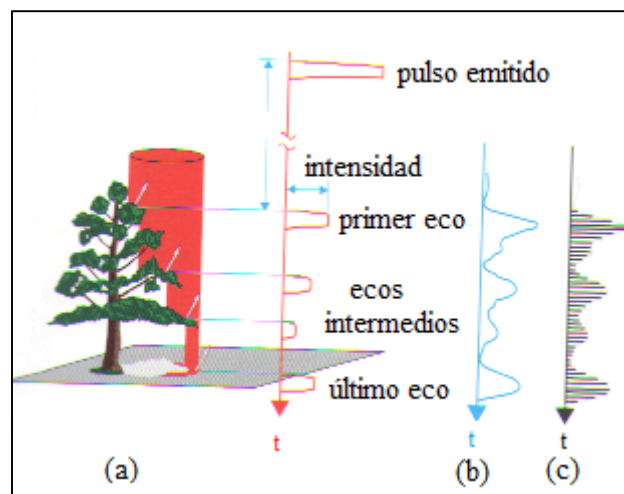


Figura 2-5. Múltiples ecos y *full-waveforms*: (a) pulsos discretos; (b) forma de la onda; (c) digitalización de la forma de la onda.

Este registro mejoró la fiabilidad y la resolución del registro de varios ecos y superó la limitación más importante de esta técnica: la superposición de ecos próximos debido a que los objetos que los originaron no tenían la separación mínima vertical, como por ejemplo suelo desnudo y vegetación arbustiva.

Además de las mejoras mencionadas en el párrafo anterior, la principal característica que posiciona a los sistemas *full-waveform* por encima de los de registros de varios ecos, es que

estos sensores proveen información sobre la forma de la onda. La razón por la cual es tan importante la forma de la onda, es que a partir de ella se pueden inferir diferentes atributos de la superficie que fue impactada por el haz. Mediante el tiempo de retardo se determina la distancia, por medio de la comparación del ancho del pulso recibido con el ancho del enviado es posible deducir la variación de elevación en la superficie y a través de la amplitud de la onda se puede inferir la reflectancia del objetivo.

Al permitir un análisis detallado de las superficies distribuidas verticalmente, esta técnica, es ideal para realizar levantamientos sobre zonas con vegetación. De esta manera, es posible determinar la altura de la vegetación así como su densidad y rugosidad.

Sin embargo, el uso de sistemas LiDAR *full-waveform* en áreas sin vegetación en donde la superficie está determinada por una sola capa, es cuestionable, ya que el volumen de datos aumenta desde 50 a 200 veces; hecho que obliga a tener un criterio bien definido a la hora de determinar el tipo de sensor a utilizar. Hay sistemas que permiten optar por la técnica de retornos discretos o de *waveform* antes de iniciar las mediciones.

El procesamiento *waveform* consiste en la descomposición matemática de la forma de onda en una suma de componentes o ecos, con el fin de caracterizar los diferentes objetivos individuales a lo largo de la trayectoria del haz de láser.

#### **2.4.3.3. Múltiples pulsos simultáneos**

Como se explicó con anterioridad, una de las características de los sensores basados en tiempo de vuelo, es la frecuencia máxima teórica a la que pueden operar. Este valor de frecuencia límite se debe a que antes de emitir un nuevo pulso, el sensor espera a recibir la reflexión del pulso anterior para garantizar que no exista confusión en la identificación de la llegada de los mismos. La máxima frecuencia de emisión depende del tiempo de vuelo de la señal y por lo tanto, de la distancia del objeto a relevar. En el caso de los sistemas LiDAR aéreos, está en relación con la altura de vuelo.

A partir del año 2007, apareció en el mercado una técnica que superó esta limitación para los sensores aerotransportados. La misma posee diferentes denominaciones: MPiA<sup>27</sup>, CMP<sup>28</sup> o MTA<sup>29</sup>; sin embargo, todas hacen referencia a que se trata de sensores con capacidad de

---

<sup>27</sup> MPiA: Multiple Pulses in Air (Múltiples pulsos en el aire).

<sup>28</sup> CMP: Continuous MultiPulse (Pulsos múltiples continuos).

<sup>29</sup> MTA: Multiple Time Around (Tiempo múltiples alrededor de)

emitir múltiples pulsos sin necesidad de esperar a la recepción del anterior. Por lo tanto, más de un ciclo de medición puede tener lugar en forma cuasi-simultánea.

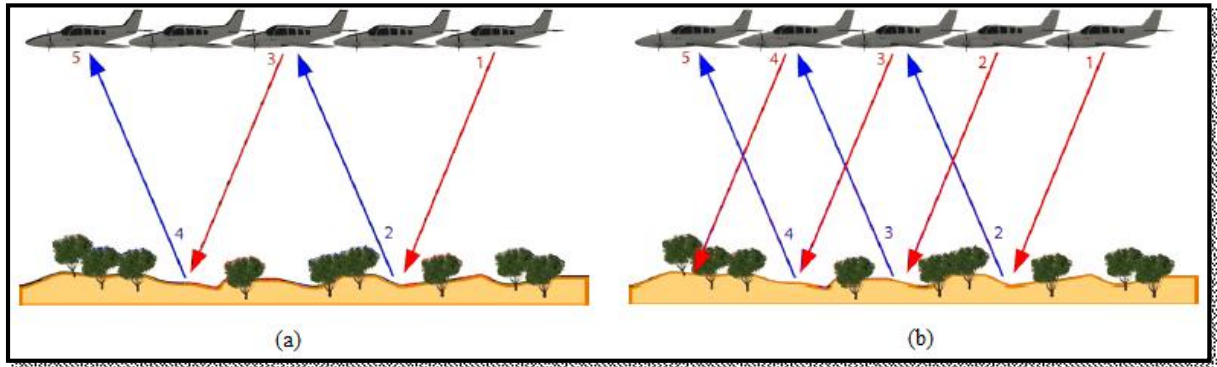


Figura 2-6: (a) Frecuencia de registro de un sensor de pulso simple. (b) Frecuencia de registro de un sensor de múltiples pulsos.

De esta manera, se logra aumentar el valor de la máxima frecuencia teórica la cual pasa a depender principalmente de la fuente láser. No obstante, el hecho de tener múltiples pulsos viajando de ida y vuelta, requiere de un procesamiento adicional para resolver la ambigüedad en la correspondencia de un pulso emitido con uno recibido.

## 2.5. Clasificación de los sistemas LiDAR

Partiendo del reconocimiento de que un sistema LiDAR en su aspecto más general comprende el sensor propiamente dicho, la plataforma sobre la que el mismo está montado, y un equipo de georreferenciación directa, que integrados permiten la obtención de una nube de puntos con coordenadas 3D en un marco de referencia geocéntrico; uno de los posibles criterios de clasificación para dichos sistemas es según la plataforma utilizada.

- Aéreos:
  - Aviones
  - Helicópteros
  - UAV (*Unmanned Aircraft Vehicle*)
- Espaciales:
  - Satélites
- Terrestres:
  - Estáticos (trípodes)
  - Dinámicos (vehículos)

Si bien existen otros criterios de clasificación:

- En función de la superficie a medir: sensores topográficos, batimétricos y atmosféricos,
- En función del principio de medida empleado: sensores basados en Tiempo de Vuelo y sensores basados en Diferencia de Fase,
- En función de las capacidades de registro: sensores discretos (aquellos que almacenan retornos discretos) y sensores *waveform*.

El adoptado permite diferenciar dos visiones muy diferentes que ofrecen productos y aplicaciones totalmente distintas.

### 2.5.1. LiDAR Aerotransportado

En los últimos años, el LiDAR Aerotransportado, también conocido como ALS acrónimo de la designación en inglés *Airbone Laser Scanning*; se posicionó como una técnica geomática de alta productividad y precisión.

Esencialmente, la tecnología se trata de un sensor láser montado en una plataforma móvil (helicóptero o avión) que cubre el área de trabajo. Sin embargo este sistema es más complejo que uno estático y precisa de más componentes para poder llevar a cabo el proceso de registro.

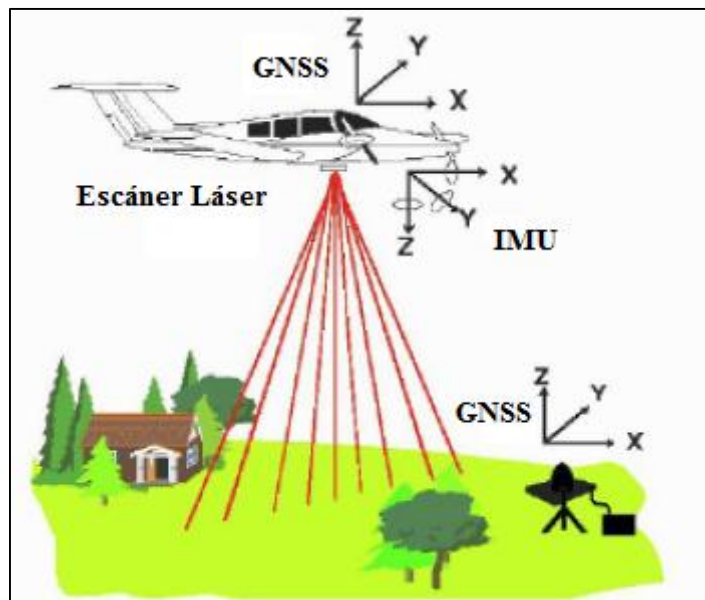


Figura 2-7: Escáner Láser Aerotransportado.

A continuación se enuncian los componentes principales de un sistema de escáner láser aerotransportado típico:

1- El **sensor láser**, cuyos elementos son el emisor y el receptor.

El emisor está compuesto por: el láser, la óptica de salida de la señal y el monitor de salida.

Para obtener una nube de puntos 3D de un objeto con un solo rayo láser, es necesario contar con un mecanismo de escaneo que lo desvíe a lo largo de toda la superficie. En el caso de los escáneres que van montados sobre una plataforma en movimiento, una de las direcciones de escaneo está dada por el avance del vehículo. Sin embargo, si no se cuenta con una segunda dirección de escaneo, se tiene un perfilómetro y no un escáner. La óptica de salida de la señal tiene la función de generar esta segunda dirección. Existen diferentes tipos, siendo los más utilizados:

- Espejo oscilante: consiste en un espejo que oscila desviando los pulsos de forma transversal a la dirección de vuelo. Cuando gira hacia un lado, se toma una línea y, al oscilar hacia el otro lado, se miden los puntos de la siguiente línea debido al avance del avión.

La densidad transversal de puntos es función de la frecuencia del láser y de la velocidad angular del espejo. La densidad longitudinal depende de la velocidad del avión y del período de una línea de escaneo. Una de las ventajas que presenta, es que siempre está midiendo pero al tener que cambiar de sentido de giro, la aceleración del espejo varía según su posición produciendo en las zonas cercanas al límite de escaneado lateral una densidad mayor que en el nadir.

- Polígono rotante: Se trata de un prisma óptico reflectante que rota. Al poseer sólo una dirección de rotación es más rápido. Consiste en un polígono cuyas caras externas son espejos, de tal forma que el giro del polígono reflejará el rayo siempre hacia el mismo lado. Debido a la transferencia de la energía láser de una de las caras del polígono a otra, hay un salto discontinuo y repentino en el lado opuesto de la exploración. Este mecanismo de escaneo permite la creación de medidas espaciadas de manera muy regular debido a la velocidad constante de rotación.
- Espejo oscilante “Palmer Scan”: consiste en un espejo que realiza un movimiento similar al de precesión, creando un patrón de lectura elíptica. Esto da como resultado una densidad de puntos variable, existiendo transversalmente gran concentración de puntos en los bordes y longitudinalmente superposición entre la parte delantera y trasera de la elipse. A modo de síntesis y para una mejor comprensión, en la **Tabla 2-1** se muestra una comparación entre los esquemas de los mecanismos antes descritos y también sus correspondientes patrones de lectura.




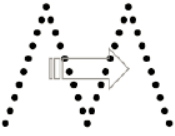
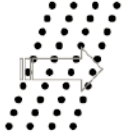
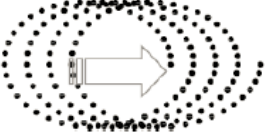
Mecanismo de escaneo	Espejo oscilante	Polígono rotante	Espejo de Nutación (“Palmer Scan”)
Esquema del mecanismo de escaneo			
Patrón de lectura	ZigZag	Líneas paralelas	Forma elíptica
Esquema del patrón de lectura			

Tabla 2-1: Mecanismos de escaneo con sus correspondientes patrones de lectura.

Por otra parte, el monitor de salida registra el momento de salida de la señal, siendo en la mayoría de los sensores, cuando el pulso alcanza el 90% de la potencia.

El receptor se encuentra conformado por: un telescopio, un analizador del espectro, un detector y una unidad procesadora de los datos. El telescopio recibe la señal reflejada y se la envía al analizador del espectro donde se aíslan las longitudes de onda deseadas para pasarlas al detector. Esta señal filtrada es analizada por el procesador, determinando los retornos. Comparando el tiempo de los retornos con el tiempo de emisión, se puede determinar el tiempo que recorre la señal y, por tanto, la distancia al objeto observado.

El cociente entre la potencia de pico recibida y la emitida es la reflexividad, que es función de la superficie donde se ha reflejado el pulso, la distancia y el medio en el que se propagó.

2- Un **sistema de posicionamiento y orientación**: equipos GNSS / IMU<sup>30</sup>.

Los equipos GNSS tienen la función de determinar de manera precisa la posición del sensor en el espacio mientras este va montado en una plataforma en movimiento. Para ello se utilizan receptores doble frecuencia y se realiza un posicionamiento diferencial cinemático vinculado en general a una estación de referencia ubicada en tierra.

El IMU es el dispositivo encargado de medir la actitud del sensor y las fuerzas que actúan sobre el mismo, a partir de giróscopos, acelerómetros, y, a veces, magnetómetros. Normalmente, incluyen tres elementos de cada uno de ellos, dispuestos en direcciones perpendiculares. De esta manera, se logra determinar la orientación angular del sensor con

<sup>30</sup> IMU: Inertial Measurements Units (Unidad de medición inercial).

respecto a un sistema de referencia inercial y a través de rotaciones adicionales, a un marco de referencia terrestre.

Un aspecto que merece ser analizado son las diferentes frecuencias con que trabajan los distintos componentes del sistema de navegación. Para poder determinar las coordenadas de los puntos medidos se necesita conocer la posición y actitud del escáner láser en cada momento. Uno de los problemas que se presenta, es la baja frecuencia que poseen los equipos GNSS frente a los sensores LiDAR, ya que se trata de 1 Hz o 0,5 Hz contra 200 a 500 KHz (PR) en el caso de los sensores más modernos. Es decir, mientras que en un segundo el escáner emitió 500.000 pulsos, el equipo GNSS sólo determinó una posición. El IMU aporta una notable mejora a este inconveniente, ya que registra en una frecuencia muy superior a la del GNSS: 200 Hz (unas mil veces menor que la del láser). Aunque sigue siendo necesario realizar una interpolación para determinar la posición del sensor en cada instante de registro, se dispone de suficiente información de la trayectoria del avión.

De esta manera, las determinaciones GNSS proporcionan la referencia espacial, mientras el IMU define la actitud del sensor. En ausencia eventual de GNSS el sistema integra las mediciones del IMU a partir de las últimas posiciones y velocidades determinadas con GNSS. La calidad de las posiciones se conserva si la señal GNSS es retomada en pocos minutos.

En todos los casos, es conveniente realizar maniobras que eviten la acumulación de los errores de deriva del IMU presentes en líneas de vuelo rectas.

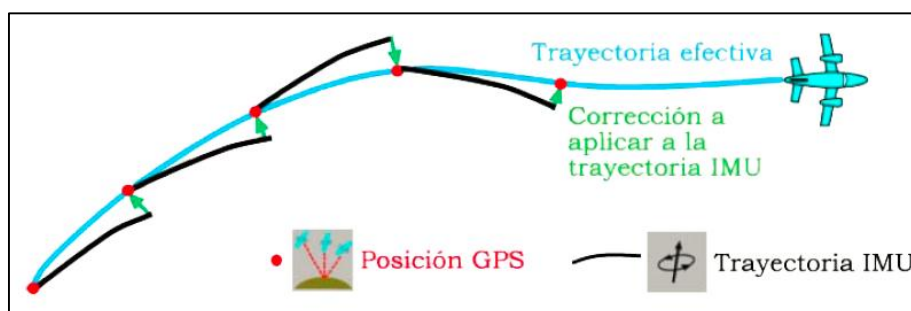


Figura 2-8: Correcciones a aplicar a una trayectoria IMU a partir de posiciones GNSS.

Para poder integrar con exactitud la información proveniente de los tres sistemas (escáner-GNSS – IMU), tanto la relación espacial como las dependencias de tiempo deben ser conocidas.

La sincronización de tiempo se consigue por la señal PPS<sup>31</sup> del GNSS que gobierna los relojes internos del escáner láser y del IMU. Las marcas de tiempo se utilizan para enlazar mediciones de distancia y posiciones de trayectoria.

Con el fin de integrar las relaciones espaciales, se define un sistema de coordenadas en la plataforma. Los parámetros de traslación entre los sistemas de coordenadas de la antena GNSS, del IMU y del escáner se determinan mediante un estudio de los vectores entre los orígenes de las distintas unidades y ello con respecto a la plataforma. Esta tarea puede ser realizada en tierra y con una exactitud de +/- 0,01 m es suficiente.

3- Una **unidad electrónica** que comprende varios elementos de hardware que proporciona muchas de las funciones de control y procesamiento del sistema general.

4- Un **software**, que en términos generales, se utiliza para controlar y coordinar el funcionamiento de cada uno de los elementos del sistema y para llevar el almacenamiento y procesamiento preliminar de los datos medidos.

Los módulos genéricos que poseen los softwares típicos para cada etapa de operación son los siguientes:

- Un módulo para realizar la planificación de la misión y para la aplicación de las líneas de vuelo previstas.
- Otro que permite la configuración de diversos parámetros del escáner láser, como su velocidad de barrido, la frecuencia del pulso y el ángulo de escaneo.
- Por último, un módulo que es capaz de ejecutar procesos preliminares y que permite la visualización de los datos en bruto durante el vuelo para tener un control, y el procesamiento post-vuelo.

5- Opcionalmente, se pueden adicionar **otros sensores**: basados en películas u óptico-electrónicos. Estos últimos permiten la generación posterior de ortoimágenes de manera rápida ya que las imágenes son digitales. También se puede equipar con cámaras CCD estándar o de vídeo para documentación, por ejemplo, en aplicaciones de ingeniería civil (carreteras o ferrocarriles), conducciones o líneas eléctricas. Estas imágenes son georreferenciadas junto con el resto de datos y su función primordial es ayudar en la identificación de objetos registrados por el sensor LiDAR. Asimismo, esta información multiespectral puede ser incorporada posteriormente a cada punto registrado.

---

<sup>31</sup> PPS: Pulso por segundo.



### 2.5.1.1. Características del relevamiento LIDAR aéreo

Los sistemas ALS comerciales para aplicaciones terrestres operan con longitudes de onda de entre 800 nm y 1500 nm. Como la reflectividad de un objeto depende de la longitud de onda, distintos sistemas láser muestran diferentes ventajas y desventajas cuando se escanea la superficie de la tierra.

En los sistemas clásicos el haz láser es emitido en un plano perpendicular al sentido de avance del avión y con un determinado ángulo de apertura, el cual es registrado de manera continua. Por lo tanto, el ancho de la pasada AP (**Figura 2-9**) está dado por la siguiente fórmula:

$$AP=2h \tan (\theta/2)$$

Donde:

- h: altura de vuelo.
- $\theta$ : ángulo de barrido completo del sensor conocido como FOV (Field Of View).

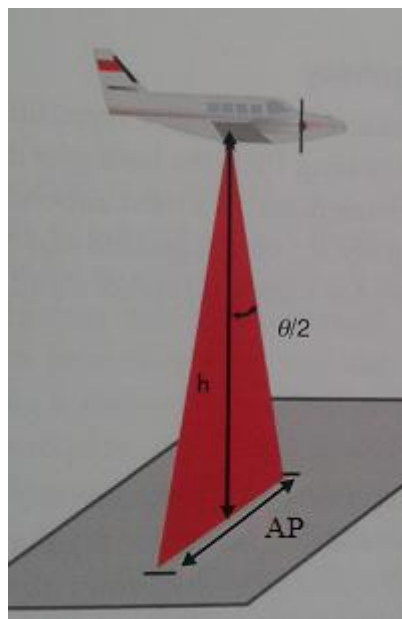


Figura 2-9: Ancho de Pasada (AP)

El rayo láser se ensancha a medida que aumenta la distancia desde el escáner láser. El diámetro de la huella iluminada (**Figura 2-10**) sobre el suelo en el nadir está dada por:

$$D_s= 2h \tan (\gamma/2)$$

Dónde:

- h: altura de vuelo.
- $\gamma$ : ángulo de divergencia del láser también conocido como IFOV (*Instantaneous Field of View*). Generalmente, este ángulo está entre 0,1 mrad y 1 mrad.

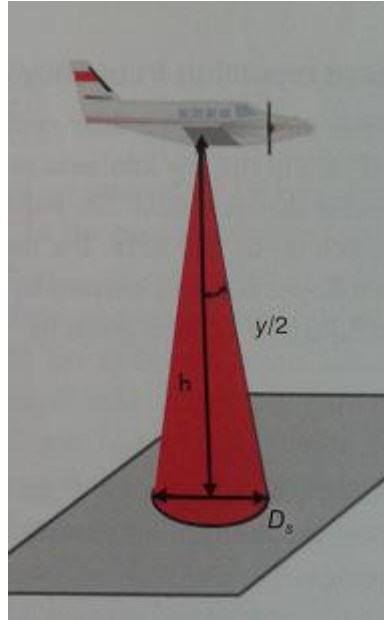


Figura 2-10: Diámetro de la huella iluminada.

### Densidad de puntos

Un parámetro muy importante en una medición es la densidad de puntos registrados en una determinada zona. Dicho parámetro dependerá en gran medida del tipo de escáner, de la altura de vuelo (h), de la velocidad del avión sobre el terreno (v) y de la frecuencia del láser o Pulse Repetition Frequency (PRF). La frecuencia del láser en los ALS actualmente va de 200 a 500 KHz.

El área que se cubre en un cierto intervalo de tiempo t a una determinada velocidad crucero v y con un ancho de pasada AP está dada por:

$$F = v \cdot t \cdot AP$$

El número de pulsos láser P generados durante un cierto intervalo de tiempo t es  $P = PRF \cdot t$ .

Finalmente, el valor de la densidad de puntos principal es:

$$DP = \frac{PRF \cdot t}{F} = \frac{PRF}{v \cdot AP} = \frac{PRF}{2vh \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

De esta manera, el valor más alto de densidad es alcanzado con grandes valores PRF, baja velocidad crucero, reducida altura de vuelo y FOV pequeño.

### **2.5.1.2. Productos y aplicaciones**

Las características del LiDAR, induce a que diferentes disciplinas se interesen en su aplicación. En el caso del ALS, algunas de ellas son ingeniería, arquitectura, gestión ambiental, catastro, planeamiento urbano, cartografía, conservación patrimonial, arqueología, entre otras.

Antes de desarrollar algunas de ellas, es conveniente describir los productos que se obtienen a partir de esta tecnología debido a que todas las aplicaciones se basan en el análisis y manipulación de los mismos.

#### **Productos**

Los productos inmediatos y principales generados a partir de datos obtenidos mediante LiDAR Aerotransportado son diferentes tipos de Modelos Digitales de precisión. Se consideran productos principales, ya que a partir de ellos, agregando información adicional y realizando otros cálculos es posible generar productos secundarios. Por este motivo, el análisis sobre los productos generados se centra en los Modelos Digitales.

Existen diferentes criterios para clasificar dichos modelos: según su estructura y según su tipología, donde cada uno presenta ventajas y desventajas, por lo que la elección del mismo está basada en su aplicación final.

#### *Según su estructura*

- Modelos TIN (*Triangulated Irregular Network* o Red de Triángulos Irregulares): a partir de todos los puntos LiDAR registrados se genera una red de triángulos, por lo que la distribución de los puntos es irregular y la precisión del modelo es equivalente a la de la nube de puntos original. Por trabajar directamente con los puntos originales, este tipo es elegido para procesos de filtrado o clasificación de puntos.
- Modelos regulares o grillas (*grid*): los puntos se encuentran distribuidos según una estructura rígida de filas y columnas. En este caso es altamente probable que exista pérdida de calidad en aquellos sectores que requieren una densidad de puntos mayor al espaciamiento de la grilla, como las fuertes pendientes.

Este tipo de modelo resulta apropiado para el cálculo de mapas de curvas de nivel o para rectificación de ortofotografías gracias a su rápido manejo y a su menor complejidad.

*Según su tipología*

- Modelo Digital del Terreno (MDT): se trata de aquellos modelos que se encuentran compuestos únicamente por puntos pertenecientes al suelo “desnudo”. Estos modelos son utilizados para el cálculo de perfiles sobre el terreno, de movimientos de tierra o para la generación de mapas de representación del relieve, como mapas de curvas de nivel, de tintas hipsométricas, de sombras, de pendientes o de orientaciones.

- Modelo Digital de Superficies (MDS): este tipo además de incluir los puntos pertenecientes al suelo “desnudo”, incluye elementos estáticos sobre el suelo como edificios o vegetación.

Los MDS se destinan a cualquier análisis que precise los objetos estáticos sobre el terreno. Es el producto más demandado en la rectificación de imágenes para obtener ortofotografías.

En cualquiera de los dos casos, para su creación, previamente se deberá realizar sobre la nube de puntos originales el proceso de filtrado y de clasificación. De esta forma, se podrá determinar de qué objeto proviene cada punto y a partir de tener esa información, seleccionar los puntos de interés y eliminar los restantes. Para los MDT se debe clasificar entre los puntos pertenecientes al suelo desnudo y los que no; el paso siguiente es filtrar los puntos que no pertenecen al suelo desnudo. En el caso de los MDS, la clasificación requerida es más compleja ya que es necesario distinguir los puntos que provienen de elementos estáticos (edificios, vegetación) de los que no (automóviles).

A continuación se muestran imágenes de nubes de puntos clasificadas a partir del uso software libre:

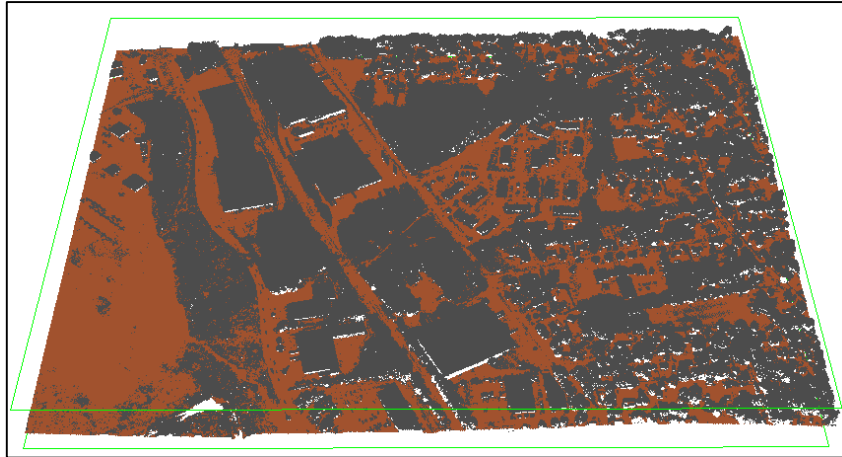


Figura 2-11: Nube de puntos ALS clasificada por primera vez. En color marrón se muestran los puntos pertenecientes al suelo “desnudo” y en gris los que no.

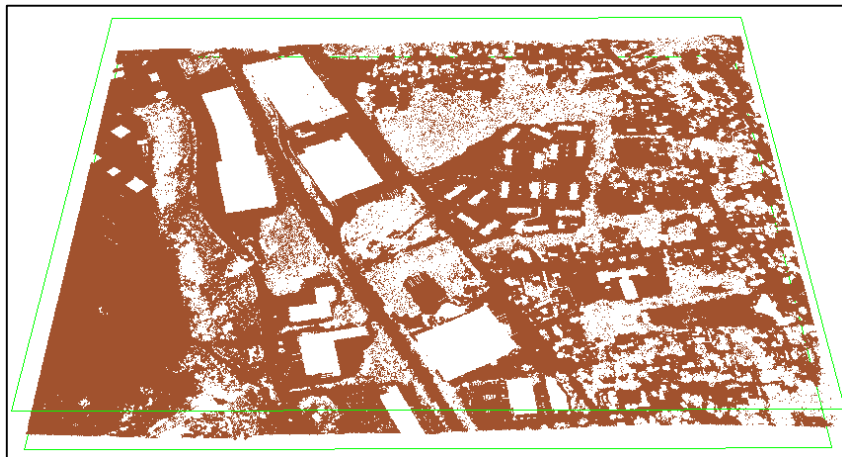


Figura 2-12: Nube de puntos ALS clasificada donde sólo se muestran los puntos pertenecientes al suelo “desnudo” luego de eliminar los que no pertenecen.

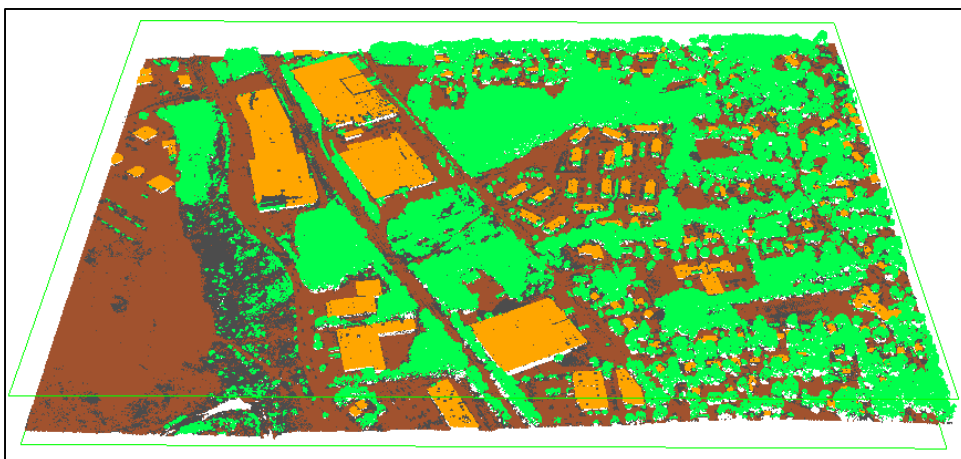


Figura 2-13: Nube de puntos ALS clasificada por segunda vez. En color marrón se muestran los puntos pertenecientes al suelo “desnudo”, en naranja los pertenecientes a edificios y los verdes corresponden a la vegetación.

## **Aplicaciones**

### Cartografía

#### *Generación de cartografía como soporte de obras de ingeniería lineales*

Generación de cartografía para uso en obras de ingeniería lineales (carreteras, vías férreas, gasoductos o canales). Para este tipo de trabajos, denominados “corredores” existen modelos específicos de sensores ALS ya que en ellos se necesita una gran precisión pero no se requiere un gran ancho de barrido, por lo que la altura de vuelo puede ser inferior a proyectos de cartografía de grandes zonas.

#### *Generación de Cartografía de líneas eléctricas*

Para este tipo de trabajo se emplean configuraciones específicas del equipo con el objetivo de obtener muchos puntos sobre los cables, ya que lo que interesa conseguir es la distancia de los mismos al terreno, a la vegetación y a los edificios. Por otro lado, la toma de datos se suele combinar con láser terrestre. De esta forma, se genera un modelo del terreno y se ajusta un modelo de catenaria para cada cable. Se detectan los puntos peligrosos, siendo los que se encuentran demasiado próximos a los cables y es posible generar un listado de los mismos con sus correspondientes distancias a los cables y un mapa con las distancias mínimas de los cables a la vegetación y al suelo.

Es así como se pueden prever problemas en el crecimiento de la vegetación con el área de seguridad de la línea eléctrica, estableciendo planes de mantenimiento.

#### *Generación de Cartografía para zonas costeras*

Existen sensores LiDAR especiales que emiten dos longitudes de onda diferentes, una para poder registrar la superficie del agua y las zonas emergidas (infrarrojo) y otra para las zonas sumergidas (verde).

#### *Actualización cartográfica (a partir de detección de cambios)*

Disponer de cartografía urbana es de suma importancia para diferentes ámbitos como planeamiento urbano, gestión, análisis territorial y medioambiental, catastro, entre otros. Por otro lado, dicha cartografía necesita ser periódicamente actualizada, hecho que la mayoría de las veces no se lleva a cabo debido a su gran complejidad y su alto costo; entonces se opta directamente por la renovación completa.

Distintos autores han propuesto metodologías de detección de cambios a partir de la utilización de datos LiDAR:

- Murakami et al. (1999) propusieron una sencilla metodología basada en la resta de antiguos Modelos Digitales de Superficies (MDS) con otros nuevos obtenidos mediante datos LiDAR.

- Vögtle y Steinle (2004) plantean la utilización de Modelos Digitales de Superficie (MDS) generados a partir de datos LiDAR de diferentes épocas para identificar edificios y comparar posteriormente los resultados, con el objetivo de detectar cambios en el entramado urbano.

Para el caso de organismos que poseen cartografía obsoleta y pretenden actualizarla se propone extraer los edificios sobre los nuevos datos adquiridos y comparar los resultados con cartografía existente para detectar cambios.

### *Cartografía 3D*

El ALS constituye una técnica efectiva para obtener precisas representaciones de ciudades en 3D con costos accesibles. Se generan modelos digitales de terreno y de superficie. La diferencia entre ambos permite obtener un modelo de superficie normalizado en 3D.

### Catastro

Efectuado un vuelo LiDAR sobre el entramado urbano y clasificando los puntos, es posible utilizando técnicas de detección de cambios identificar nuevas construcciones, así como modificaciones en construcciones. De esta manera se pueden comparar las superficies edificadas proporcionadas por los datos LiDAR con las registradas en la base de datos de Catastro y realizar un ajuste mejorando la recaudación de los impuestos relativos a la propiedad inmobiliaria

Además de detectar edificaciones no registradas se pueden distinguir incrementos de altura en edificios ya existentes en la base de datos del Catastro. De esta forma se mejora la eficacia en la detección en trabajos de gabinete frente a otros métodos manuales de detección como fotointerpretación de imágenes aéreas (ortofotos).

En estas capacidades se basan los desarrollos de los futuros catastros 3D.

### Gestión Ambiental

Existen numerosas aplicaciones de esta tecnología en Gestión ambiental. Se realizan mediciones de cubiertas de nieve o hielo, incluyendo monitorización de glaciares. Para este

tipo de trabajos, se utilizan equipos específicos que emiten con una longitud de onda que permite calcular el grosor de capa de nieve o hielo. A su vez, es posible determinar la acumulación de nieve para la estimación de riesgo de aludes.

Otra de las aplicaciones en esta materia corresponde al estudio y manejo de los recursos forestales, ya que si en una zona boscosa un porcentaje de pulsos láser alcanzan el suelo es posible construir un MDT. Por otro lado, muchos de los puntos reflejarán en la vegetación a diferentes alturas, hecho que permite el cálculo de parámetros dasométricos (altura de los árboles, diámetro de copa, densidad de arbolado, estimación de la biomasa, entre otras.)

Por otra parte, el LiDAR también es utilizado para evaluación de daños de desastres naturales (huracanes, terremotos, deslizamientos de tierra, inundaciones), pudiendo determinar el alcance de la catástrofe y las zonas más afectadas; constituyendo así una base de datos que será el soporte para futuros estudios de prevención. Además, puede utilizarse para prevención de catástrofes; uno de los ejemplos más corrientes es el estudio de riesgos de inundaciones de una determinada región.

Otras aplicaciones son el cálculos de volúmenes en minas a cielo abierto y vertederos, estudios de desplazamientos de arena en las playas después de tormentas, estudios de erosión, entre otras.

### Arqueología

Se realizan mediciones sobre sitios arqueológicos y se generan MDT para la localización de vestigios de antiguos asentamientos humanos.

Gracias a que el LiDAR tiene la capacidad de capturar información sobre el suelo aún en zonas con cubierta vegetal, es posible excluir la vegetación y detectar sitios o vestigios arqueológicos.

En un futuro próximo los arqueólogos realizarán muchas menos excavaciones, ya que podrán focalizarse en los lugares adecuados inferidos del análisis de datos LiDAR, ahorrando mucho tiempo y dinero y reduciendo el riesgo de destruir alguna estructura por error.

#### **2.5.1.3. Geometría**

Mientras que la naturaleza de la mayoría de los escáneres láser terrestre permite el funcionamiento dentro de un sistema de referencia local, el carácter del ALS requiere el empleo de un marco global, así como también de varios marcos de referencia intermedios.



Para poder comprender la geometría del LiDAR Aéreo es necesario tener conocimiento de todos los marcos de referencia que intervienen y las relaciones que existen entre ellos.

**Marcos de referencia que intervienen**

- **Marco del sensor (*Sensor frame – s*).** Como su nombre lo indica, se trata de del marco de referencia definido por los ejes principales del escáner láser. A partir de este marco, la posición de un objeto queda definida mediante la distancia determinada ( $\rho$ ) y el ángulo de escaneo ( $\theta$ ) que indica la orientación del rayo en referencia a uno de los ejes.

Según a partir de qué eje se defina el ángulo de escaneo, se determinarán las ecuaciones de la posición de un punto en dicho marco. Una posible solución es la siguiente:

$$x^s = \rho \cdot \begin{cases} 0 \\ \sin \theta \\ \cos \theta \end{cases}$$

- **Marco de la plataforma (*Body frame – b*).** Se trata del marco de referencia del vehículo que provee la movilidad (avión, helicóptero, etc.). Como el IMU está fijo a la plataforma en movimiento, sus marcos de referencia son coincidentes y por lo tanto le permite determinar las actitudes que sufre el vehículo respecto del marco de referencia inercial. Los parámetros que describen la actitud 3D en la navegación son denominados *roll* ( $r$ ), *pitch* ( $p$ ) y *yaw* ( $y$ ).

- **Marco de referencia global (*Earth Centred, Earth Fixed frame ECEF – e*).**

El marco de referencia ECEF rota con la Tierra alrededor de su eje de rotación. Como tal, un punto fijo sobre la superficie de la Tierra tiene un conjunto de coordenadas fijo. El origen y los ejes, mostrados en la **Figura 2-14** están definidos como sigue:

- El origen se ubica en el centro de la tierra.
- El eje z (denotado como  $Z_e$ ) se extiende a lo largo del eje de rotación de la Tierra, apuntando al polo norte.
- El eje x (denotado como  $X_e$ ) corta a la esfera de la tierra en latitud y longitud  $0^\circ$ . (Meridiano de Greenwich)
- El eje y (denotado como  $Y_e$ ) es ortogonal a los ejes x y z en el sentido definido por la regla de la mano derecha.

En la práctica será un marco de referencia lo más próximo posible a ITRF<sup>32</sup>, como POSGAR07.

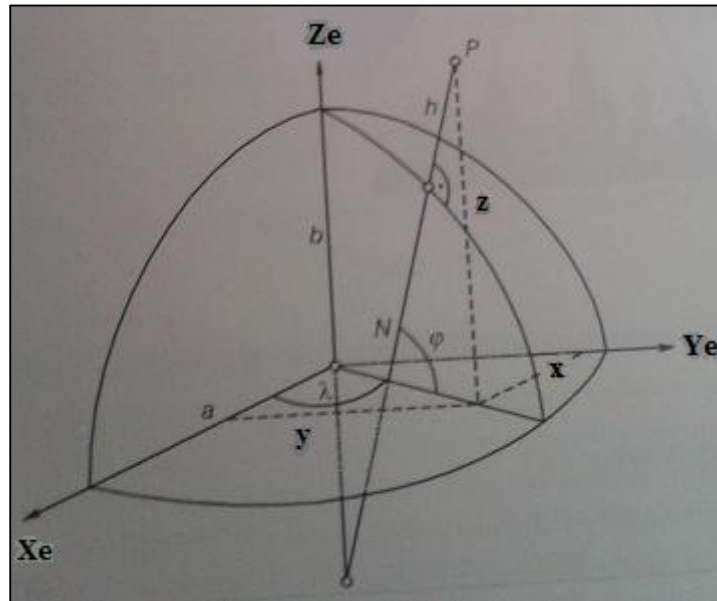


Figura 2-14: Coordenadas cartesianas y coordenadas elipsoidales.

Luego, un punto en el espacio queda definido por las coordenadas cartesianas (x,y,z) o las elipsoidales: latitud ( $\varphi$ ) longitud ( $\lambda$ ) y altura elipsoidal (h).

La relación que existe entre ambos tipos de coordenadas está determinada por la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}x &= (N + h) \cos \varphi \cos \lambda \\y &= (N + h) \cos \varphi \sin \lambda \\z &= \left( \frac{b^2}{a^2} N + h \right) \sin \varphi\end{aligned}$$

Donde N es el radio de curvatura de la sección normal al meridiano en  $P_0$ , y a,b corresponden a los semiejes mayor y menor del elipsoide adoptado.

- **Marco de referencia local (Local – Level frame – l).** Se trata de marco cuyo origen se ubica en la superficie del elipsoide adoptado y sus ejes quedan definidos por el Norte Elipsoidal, Este Elipsoidal y “Down” (NED). Se utiliza como referencia para la medida de la actitud de la plataforma.

<sup>32</sup> ITRF: International Terrestrial Reference Frame (Marcos de Referencia Terrestre Internacional).

Relaciones que existen entre los marcos antes explicados

- **Marco-s → Marco-b**. En primer lugar se deberá pasar del marco del sensor al marco de la plataforma. La relación entre un vector cualquiera  $x_s$  definido en el marco de referencia del sensor y el mismo definido en el marco de la plataforma está dada por la siguiente ecuación:

$$x^b = x_s^b + R_s^b(\omega, \varphi, k) \cdot x^s$$

Donde  $x^b$  representa la posición de un punto en el marco de referencia de la plataforma (*body frame*);  $x^s$  es la posición del mismo punto en el marco de referencia del sensor;  $x_s^b$  hace referencia a la distancia espacial entre los orígenes de los marcos s y b, es decir, la traslación u offset entre el sensor Láser e IMU (más conocido como “*lever-arm*”) y  $R_s^b(\omega, \varphi, k)$  es la matriz de rotación que representa la falta de alineación entre los marcos (comúnmente denominada “*bore-sight*”).

Tanto el valor del “*lever-arm*”  $x_s^b$  como de la matriz de rotación  $R_s^b$  son considerados constantes ya que son determinados previamente en un proceso que se conoce como Calibración. Dicho proceso es de suma importancia, motivo por el cual se desarrolla de manera separada (Ver Apartado 2.5.1.5).

- **Marco-b → Marco-l**. La transformación del marco de referencia de la plataforma al local es posible gracias a las mediciones de los parámetros de actitud *roll* (r), *pitch* (p) y *yaw* (y) determinados por el IMU en todo momento. Luego, la posición de un punto en el marco de referencia local está dada por la siguiente expresión:

$$x^l = R_b^l(r(t)p(t)y(t)) x^b$$

- **Marco-l → Marco-e**.

$$x^e = R_l^e(\varphi(t)\lambda(t)) \cdot x^l$$

Finalmente, la ecuación de observación de un sistema LiDAR aéreo está dada por:

$$x_p^e = x_b^e(t) + R_l^e(\varphi(t)\lambda(t)) * R_b^l(r(t)p(t)y(t)) \cdot x^b$$

$$x_p^e = x_b^e(t) + R_l^e(\varphi(t)\lambda(t)) \otimes R_b^l(r(t)p(t)y(t)) \otimes \left\{ x_s^b + R_s^b(\omega, \varphi, k) \rho(t) \begin{Bmatrix} 0 \\ \sin \theta(t) \\ \cos \theta(t) \end{Bmatrix} \right\}$$

En donde  $x_b^e(t)$  corresponde a la posición de la trayectoria de la plataforma dado por el sistema de posicionamiento GNSS/IMU en el marco *ECEF* (ITRF).

De la ecuación de observación, se pueden identificar claramente los observables:

- 1) Observaciones de la posición del equipo GNSS;
- 2) Observaciones IMU (*roll*, *pitch* y *yaw*);
- 3) Observaciones del sensor láser ( $\rho; \theta$ )

Vale aclarar que, los tres sistemas de medida (sensor láser, IMU y GNSS) son solidarios y deberán estar perfectamente sincronizados. Por tanto, deberán haber sido calibrados previamente para conocer perfectamente las posibles excentricidades y posiciones relativas entre ellos. Además, se incluye un reloj muy preciso que permite sincronizar todos los sensores.

#### **2.5.1.4. Registro**

Aunque las coordenadas de la nube de puntos son obtenidas a partir de aplicar la ecuación que se desarrolló en el apartado anterior expresadas en el marco ECEF, en muchas ocasiones se necesita que las mismas se encuentren en el Datum y proyección oficial. En el caso de Argentina, POSGAR 07/ Gauss Krüger.

La transformación de las coordenadas de cualquier punto de la nube del marco –e al marco nacional (*n-frame*) está dada por:

$$x_p^n = x_e^n + \mu \cdot R_e^n \cdot x_p^e$$

Donde  $x_e^n$  es el vector que indica la posición del origen del marco-e en el marco-n;  $\mu$  es el factor de escala del Datum nacional;  $R_e^n$  representa la matriz de rotación para pasar del marco-e al marco-n y  $x_p^e$  corresponde a las coordenadas de un punto dadas en el marco-e.

La parte planimétrica estaría prácticamente resuelta, ya que sólo restaría proyectar las coordenadas obtenidas en el marco de referencia nacional utilizando el sistema de proyección oficial. En cuanto a la altimetría, es necesario realizar una transformación adicional para pasar del elipsoide al geoide (u otra superficie de referencia basada en parámetros físicos).

Existen diferentes formas de realizar lo descrito, pero una de las alternativas más eficientes es realizar la transformación de las coordenadas de la trayectoria dadas por el GPS/IMU y

recién allí calcular las coordenadas de los puntos de la nube láser. Mediante este método, se estima que se reducen en un factor de 100 o más los esfuerzos computacionales.

### **2.5.1.5. Calibración**

El proceso de calibración involucra la determinación de los siguientes parámetros:

- 1) Ángulos de transformación del marco del sensor al marco de la plataforma. Matriz de rotación  $R_s^b$ .
- 2) Excentricidades. Offset entre el IMU y el sensor láser; offset entre el IMU y la antena GNSS.
- 3) Correcciones: de los ángulos de IMU y de las medidas del escáner láser.

Básicamente se distinguen dos métodos principales de calibración: calibración de laboratorio y calibración en vuelo.

El sistema integrado por los sensores LiDAR (sensor), IMU y GNSS debe ser validado ante cada levantamiento mediante una estrategia de calibración adecuada.

Por un lado, la *calibración de laboratorio* permite determinar los parámetros nominales del sensor, como son el sistemático de la distancia láser medida, (se determina midiendo distancias a distintos blancos y con diferentes factores de reflexión en un laboratorio). A su vez, se puede medir el sistemático del ángulo escaneado y la escala, midiendo distintos blancos y sus ángulos de escaneado. Por otra parte, en laboratorio también es posible determinar los ángulos de transformación del marco del sensor al marco de la plataforma. En todas estas técnicas de calibración se realizan medidas redundantes sobre un control independiente de exactitud superior. Las diferencias obtenidas son minimizadas a través del cálculo de los parámetros de calibración, con métodos como mínimos cuadrados.

Otra estrategia, muy aplicada, supone realizar un *vuelo de calibración* y el proceso denominado *Resolución de la Línea de Calibración*. Para ello se utiliza un polígono de control permanente (**Figura 2-15**), si es posible en el aeropuerto base del avión, donde se establece un control terreno de forma que las medidas LiDAR obtenidas son procesadas con el fin de verificar sus componentes (equipo GNSS, IMU y sensor láser).

Es de suma importancia que se vuele el polígono de calibración tanto longitudinal como transversalmente mediante pasadas que permitan detectar errores sistemáticos como las variaciones de altitud, anomalías de cada pasada y, demostrar la repetitividad de los resultados. Es importante que las pasadas transversales crucen todas las pasadas longitudinales para proporcionar máxima información, asimismo es necesario cubrir zonas

totalmente despejadas de vegetación y planas e invariables en el tiempo. Además del vuelo específico de calibración, cada día de vuelo es preciso utilizar una pasada longitudinal para comprobar y, si es necesario, afinar los parámetros de la calibración, especialmente los valores de roll y factor de escala.

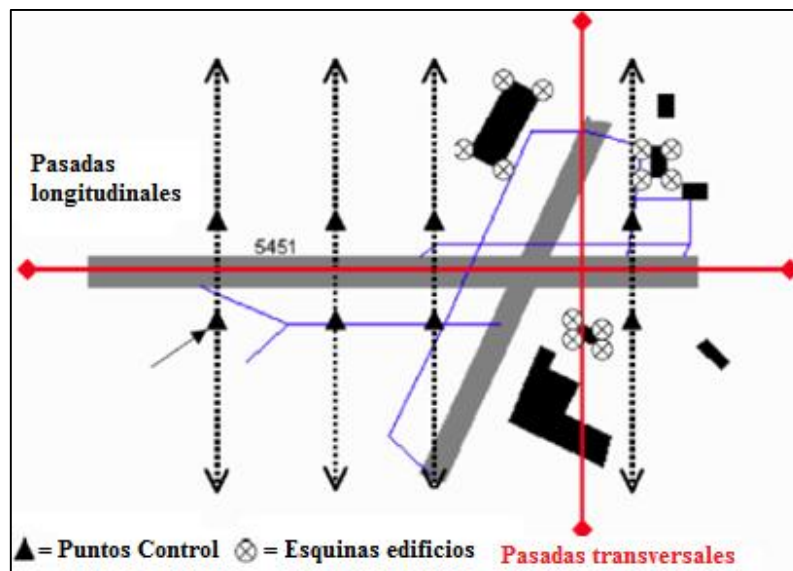


Figura 2-15: Polígono de calibración LiDAR.

### 2.5.2. LiDAR Terrestre

Como se mencionó previamente, los sistemas LiDAR aéreos y terrestres incluyen tecnologías realmente diferentes, hecho que obligó a desarrollar los temas por separado. No obstante, dentro de los terrestres, también se distinguen diferentes tipos: estáticos y móviles. Si bien ambos son considerados terrestres por no estar montados en vehículos aéreos (satélite, avión, helicóptero, globo, UAV), es posible afirmar que los sensores LiDAR terrestres móviles poseen más similitudes con los escáneres láseres aéreos que con los terrestres estáticos. Por este motivo, para lograr una mejor comprensión, ambos sub-sistemas se desarrollan a continuación de manera independiente.

### 2.5.3. LiDAR Terrestre Estático

Esta tecnología es conocida como TLS, acrónimo de *Terrestrial Laser Scanning*. Su principal característica, que la diferencia de los escáneres montados en plataformas en movimiento, es que durante la toma de datos mantiene una posición fija. Por esta falta de movimiento, no necesita ir equipada con un sistema de posicionamiento y orientación GNSS/IMU.

Según lo explicado en el Apartado 2.4, los sensores LiDAR en general utilizan dos principios de medición: Tiempo de Vuelo o Diferencia de Fase. Por otra parte, debido a los motivos expuestos, la mayoría de los sensores LiDAR terrestres se basan en el método de Diferencia de fase. Sin embargo, existen otros tipos de escáneres terrestres, que se basan en otros principios de medición: triangulación e interferometría. Este tipo de escáneres se utilizan para medir distancias muy cortas (de unos pocos metros) con altas precisiones (fracciones de milímetros). Tienen aplicaciones en el ámbito industrial (para su producción), en el ámbito patrimonial (documentación o conservación), en metrología, en investigación médica y en el registro de objetos de interés para el personal de museo y arqueólogos. Su aspecto físico es similar a las cámaras o proyectores de luz, por lo que difiere de los escáneres topográficos. Generalmente se localizan sobre plataformas, mesas o brazos robotizados, no siendo normal el empleo de trípodes.

En cuanto al desarrollo de los escáneres terrestres topográficos, como se mencionó anteriormente, en los últimos 30 años se ha implementado el uso generalizado de los láseres en el campo de la topografía y de la ingeniería. Esto se puede ver en la incorporación de los mismos en instrumentos topográficos estándar, tales como estaciones totales, niveles y dispositivos de alineación.

Teniendo en cuenta estos antecedentes, añadir un mecanismo de escaneo a las estaciones totales que ya estaban equipadas con telémetros láser y codificadores angulares parece ser un desarrollo natural dentro de estos campos.

De esta manera, en trabajos de mayor escala en los que se necesita más resolución, en lugar de que un topógrafo mediante el uso de una estación total determine la posición de puntos individuales sobre características muy específicas de las superficies a medir, se tiene un escáner láser que permite la medición automatizada y la ubicación de decenas de cientos o miles de puntos en torno a la posición en la que el instrumento se ha establecido, en un lapso de tiempo muy corto.

*Los escáneres láser topográficos están preparados para abordar estacionamientos rápidos. Su construcción se asemeja a la de una estación total topográfica, donde se combina en una única pieza el escáner, el panel de control, el almacenamiento interno, la batería y, en algunos casos, la cámara digital. Los compensadores especiales de doble eje también están integrados de modo que nivelan automáticamente el escáner. Algunos escáneres llevan acoples para receptores GNSS y/o compensadores INS para realizar un posicionamiento y una orientación directa del escáner en el espacio. Además, algunos escáneres integran*

*cámaras digitales y otros proporcionan una montura especial para ellas, dando la posibilidad de añadir información color de alta resolución a las nubes de puntos.*<sup>33</sup>

A diferencia de los escáneres móviles, los estáticos, para obtener un campo de vista 3D necesitan generar de alguna forma dos direcciones de escaneo, ya que al estar fijos, con un solo mecanismo de desviación del láser se obtendrían mediciones en 2D convirtiéndose el sistema en un perfilómetro.

Para conseguir estas dos direcciones de escaneo, existen dos posibles métodos:

- Se utilizan dos mecanismos de desviación del láser sincronizados,
- O bien se utiliza un sólo mecanismo de desviación, generalmente en la dirección vertical; y la segunda dirección se obtiene a partir de una rotación del instrumento alrededor de uno de los ejes.

Los escáneres que utilizan el primer método son denominados “de ventana” y poseen el FOV limitado, por ejemplo 40°. 40°, mientras que los que utilizan el segundo son conocidos como “panorámicos” y poseen un FOV de 360°. 80°.

A su vez, es posible considerar un tercer método que resultaría de la combinación de los dos anteriores. Se trata de los escáneres denominados “hemisféricos” que poseen una unidad de desviación (espejo) que desvía en dos direcciones montado sobre un cabezal rotatorio.

En cuanto a los tipos de mecanismos de escaneos y patrones de lectura, se utilizan los mismos que los explicados para los ALS.

#### **2.5.3.1. Productos generados**

El producto principal de esta tecnología es un modelo tridimensional preciso de todo el objeto que se midió. Esto se obtiene a partir de realizar un cálculo sobre la densa nube de puntos de toda la superficie, que se consiguió gracias a la correlación de las diferentes mediciones realizadas desde distintos puntos de vista. Los algoritmos empleados, generalmente, se basan en el cálculo de primitivas tridimensionales para relacionar los puntos próximos, luego a partir del reconocimiento del objeto medido se sustituyen muchos puntos por el objeto en sí. Una vez generado el modelo, es posible extraer información derivada; por ejemplo, secciones a partir de cortes de dirección arbitraria, cálculo de volúmenes, entre otras.

---

<sup>33</sup> Fuente: Lerma y Biosca, 2008.



Por otro lado, si se adicionan los datos multispectrales obtenidos mediante cámaras, es posible generar un modelo digital texturizado logrando una representación que resulta más próxima a la realidad.

Para mejorar la comprensión de los detalles del objeto medido y lograr una mejor representación, se suelen realizar recreaciones de realidad virtual. Las mismas podrán ser imágenes estáticas o videos realizando un movimiento en torno del objeto.

### **2.5.3.2. Aplicaciones**

Las disciplinas que encuentran en el láser escáner terrestre múltiples usos, son variadas. Las principales características del instrumento que definen la aplicación, es el alcance, la precisión y la resolución. Se pueden distinguir tres tipos según el alcance: escáner de corto alcance (miden hasta 100 m, generalmente se basan en diferencia de fase), escáner de alcance medio (registran hasta 350 m, normalmente basados en TOF) y escáner de largo alcance (capaces de registrar objetos ubicados a distancias mayores de 1 km utilizando el método de TOF).

Seguidamente se desarrollan las aplicaciones más usuales.

#### *Topografía*

Hoy día, estos escáneres son ampliamente utilizados en levantamientos mineros y subterráneos, donde sólo podían utilizarse estaciones totales debido a la evidente imposibilidad del uso de equipos GNSS. Una de las ventajas que presentan los TLS frente a las estaciones totales en este tipo de aplicación, es que los primeros no necesitan iluminación para registrar las características de la cavidad ni sus elementos, además obviamente, de la reducción de tiempos de trabajo de campo y la densidad de información.

Por otro lado, como es sabido, la principal aplicación de los ALS dentro del campo de topografía es la generación de MDT. Muchas veces, quedan zonas sin registrar por los escáneres aéreos debido a ocultaciones o inaccesibilidad. Los TLS se utilizan para cubrir dichas áreas y lograr así una nube de puntos completa.

Otra aplicación en la que las plataformas aéreas y terrestres se complementan es en el análisis 3D de bosques y zonas urbanas.

Además, son utilizados para relevamientos de hechos existentes en plantas industriales en donde el requerimiento de las empresas es ubicación y dimensión exacta sobre la maquinaria y sus componentes (tuberías, grúas, engranajes, etc.).

Si bien en la actualidad, sólo las grandes empresas tienen acceso a esta tecnología debido a los altos costos y a la imposibilidad de amortización de la misma, se espera que en un futuro cercano los profesionales independientes de la agrimensura puedan contar con este tipo de instrumental al igual que ocurrió con los equipos GNSS.

### *Ingeniería Civil*

Los TLS son utilizados para documentación y control dimensional y estructural de grandes obras (presas, viaductos, vías de comunicación). El monitoreo de deformaciones consiste en generar nubes de puntos de las estructuras en diferentes momentos y poder realizar así un análisis multitemporal.

### *Conservación patrimonial*

Sin dudas, se trata de una de las principales aplicaciones. Los TLS han adquirido un gran éxito en la documentación de edificios históricos logrando registrar los pequeños detalles arquitectónicos de las fachadas en unos pocos días de trabajo, mientras que con métodos tradicionales la escala de tiempo es de años.

A su vez, son utilizados en proyectos arqueológicos, destacándose frente a otras técnicas por su alta precisión sin necesidad de manipular los objetos. Se han registrado desde antiguos asentamientos humanos hasta monumentos, obras de arte, hallazgos paleontológicos, entre otros.

Tanto en una aplicación como en otra, se busca generar un modelo acorde para que el día de mañana se pueda construir una réplica exacta, para estudios de conservación o simplemente para divulgación científica.

### *Peritajes forenses*

Los TLS poseen especial aplicación en la documentación de escenas de accidentes de tránsito y de crímenes ya que, en ambas, es muy útil capturar la escena 3D en forma precisa y antes que sufra alteraciones.

### 2.5.3.3. Geometría

Como se mencionó con anterioridad, estos tipos de escáner láser terrestre son los que miden las superficies de los objetos que se encuentran alrededor de la posición fija (estática) que ha sido ocupada por el instrumento.

Lo hacen a través de la medición simultánea de:

- la *distancia oblicua* por medio de un telémetro láser y,
- los *dos ángulos* asociados en los planos horizontales y verticales que pasan a través del centro del instrumento por medio de codificadores angulares.

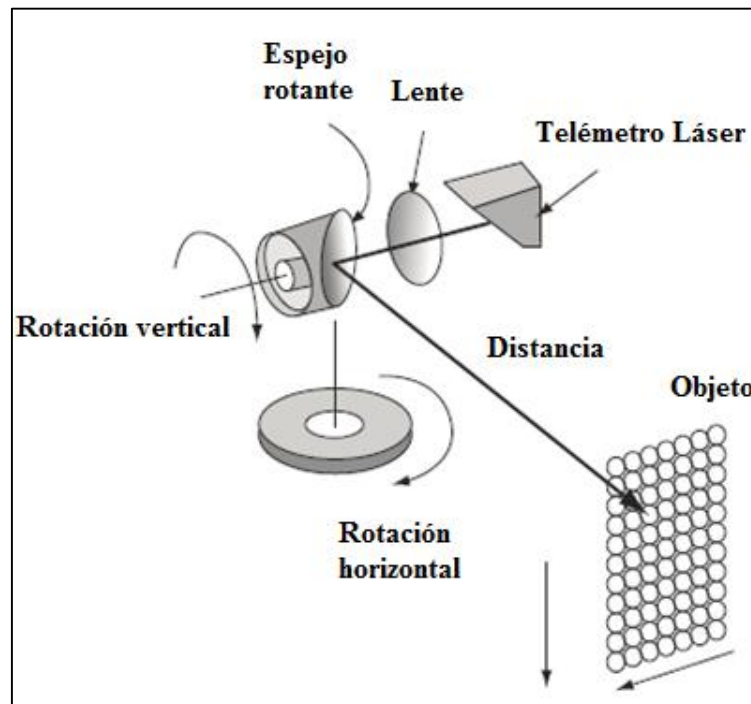


Figura 2-16: Distancia oblicua y los dos ángulos asociados en los planos horizontales y verticales que pasan a través del centro del instrumento.

De esta forma, el escáner determina las coordenadas polares de los puntos registrados en un sistema de referencia centrado en el instrumento. Luego, realiza la transformación de coordenadas polares a coordenadas cartesianas.

Finalmente, las coordenadas cartesianas de un punto medido por el sistema están dadas por las siguientes expresiones:

$$x_p = \varrho \cdot \sin \beta \cdot \cos \alpha$$

$$y_p = \varrho \cdot \sin \beta \cdot \sin \alpha$$

$$z_p = \varrho \cdot \cos \beta$$

Donde  $\vartheta$  es la distancia oblicua desde el escáner hasta el objeto,  $\alpha$  es el ángulo horizontal desde el origen de rotación y  $\beta$  es el ángulo cenital respecto de la vertical.

#### **2.5.3.4. Registro**

Los escáneres terrestres miden los puntos a partir de un sistema de referencia interno. Un objeto grande y/o complejo normalmente no puede ser relevado desde una sola ubicación del instrumento, por lo que se requieren múltiples estaciones para obtener una cobertura completa.

Estos conjuntos de datos, medidos desde diferentes estaciones, deben ser transformados o registrados a partir de sus respectivos sistemas internos hacia un sistema definido externamente. El sistema de referencia externo puede ser el adoptado oficialmente en el país, un sistema local definido para el proyecto en cuestión o se puede adoptar uno de los sistemas internos de uno de los escaneos (a dicho escaneo se lo denomina de referencia). Normalmente, se necesita que la nube de puntos esté vinculada a un sistema de referencia geocéntrico oficial.

El proceso de registro puede ser directo o indirecto.

##### *Registro directo*

En este método, se deben conocer tanto las coordenadas del posicionamiento del escáner (mediante alguna técnica geodésica-topográfica) como los ángulos de orientación respecto de un sistema de referencia único para el proyecto. De esta manera, las coordenadas de un punto medido por el escáner se obtienen directamente en el sistema de referencia elegido, sin necesidad de calcular parámetros de transformación para pasar de un sistema a otro. Luego, dichas coordenadas están dadas por la siguiente expresión:

$$x_p = x_0 + \vartheta \cdot \sin \beta \cdot \cos \alpha$$

$$y_p = y_0 + \vartheta \cdot \sin \beta \cdot \sin \alpha$$

$$z_p = z_0 + \vartheta \cdot \cos \beta$$

Donde  $x_0, y_0, z_0$  son las coordenadas de la estación del escáner en el sistema de referencia elegido.

Esta técnica no requiere solape entre los escaneos, aunque siempre es aconsejable para evitar huecos.

### *Registro indirecto*

Este tipo de registro involucra en su proceso dos pasos distintos: la estimación de los parámetros de registración y la aplicación de la transformación a la nube de puntos entera.

Los puntos en que se basa el procedimiento de registración se pueden clasificar en dos categorías: registración con puntos correspondientes y registración cuando la correspondencia no existe.

Dentro de este método existen diferentes técnicas: Registración basada en objetos de referencia (*Target-based registration*), ICP (*Iterative Closest Point*) y *Feature-based registration*. A continuación se desarrollan cada una de ellas.

La *registración basada en objetos de referencia* pertenece al tipo de registración en la que existen puntos correspondientes entre los diferentes sistemas de referencias. Estos puntos, se consiguen con objetivos señalizados que se colocan dentro del campo de vista del escáner. Los objetivos son generalmente sobremuestreados, y el conjunto de puntos redundante se utiliza para estimar las coordenadas 3D del centro del objetivo en el marco del sensor. Luego, estas coordenadas se utilizan como observaciones para la estimación de los parámetros.

Los objetos de referencia pueden ser planos o con una primitiva geométrica tal como una esfera.

La estructura exacta de los objetivos planos varía según el fabricante. Algunos están especialmente fabricados para que sean compatibles con el equipo láser; por otro lado, suelen construirlos con un respaldo magnético con el fin de facilitar el montaje de los mismos sobre superficies metálicas, por ejemplo cuando se trabaja en sectores industriales. Otros entregan plantillas digitales que se pueden imprimir en impresoras láser de gran calidad. Sin embargo, hay una característica que generalmente comparten: el contraste entre las diferentes partes del objetivo para lograr una determinación del centro del mismo con un alto grado de exactitud.

Los objetivos con una primitiva geométrica más comunes son las esferas y los hemisferios. Este último combina un objetivo plano y media esfera de manera que sus centros coincidan para permitir una fácil determinación por taquimetría. El radio de las esferas es un valor conocido, el cual se ingresa en el software de procesamiento para que este reconozca rápidamente las esferas registradas en cada escena.

Idealmente, las ecuaciones de observación para la estimación de parámetros de transformación se expresan en términos de las coordenadas esféricas. Por su solución única, nueve coordenadas de tres puntos no colineales son obligatorias, aunque más puntos son deseables para la redundancia.

El algoritmo de registración ICP (*Iterative Closest Point*) es utilizado cuando no existe una correspondencia exacta de punto a punto entre nubes de puntos, es decir, cuando en el relevamiento no se hizo uso de objetos de referencia.

En este caso, para poder relacionar los diferentes escaneos obtenidos desde distintos puntos de vista, se utilizan puntos medidos bien definidos sobre los objetos en las zonas de solape. El procedimiento se basa en la identificación de puntos homólogos en dos nubes de puntos diferentes, aproximadamente orientadas. Luego, como su nombre lo indica, el algoritmo trabaja de forma iterativa ajustando los puntos homólogos mediante el cálculo por mínimos cuadrados utilizando estimadores robustos para minimizar las diferencias entre las coordenadas, hasta alcanzar un umbral deseado.

Actualmente la investigación está centrada en el tercer método, *feature-based registration*. En lugar de utilizar puntos para estimar los parámetros de registración, utiliza primitivas geométricas (planos, esferas y cilindros) presentes en las nube de puntos. Esta técnica propone dos enfoques:

- Un método indirecto, en el que las nubes de puntos son segmentadas para identificar los *features*. Los parámetros de los *features* son entonces estimados según la forma geométrica que corresponda. Los parámetros de registro se estiman minimizando la suma de las diferencias al cuadrado entre los parámetros del modelo del *feature*.
- Un método directo que es más riguroso pero converge más lentamente. En este caso, las estimaciones de los parámetros del método indirecto se utilizan como valores aproximados. La función objetivo, es reducir al mínimo la suma de los cuadrados de las distancias ortogonales entre los puntos y sus respectivos *geometric features*. Por lo tanto, los procesos de registro y de modelado, que tradicionalmente se realizaron de forma independiente, se combinan en uno solo.

Una de las ventajas, es que a diferencia de los enfoques basados en ICP, se necesita poco o ningún solapamiento entre las nubes de puntos. El único requisito es que porciones de los *features* aparezcan en dos (o más) nubes de puntos.

### **2.5.3.5. Calibración**

La calibración de los escáneres láser terrestres puede abordarse desde al menos dos puntos de vista. Uno de ellos es calibración componente individual, mientras que el otro es sistema completo auto-calibración. El primero es intuitivo y puede realizarse a partir de procedimientos e infraestructura convencional, aunque su aplicación acarrea problemas de índole práctico. El último es óptimo, en el sentido que todos los errores sistemáticos son ajustados simultáneamente; aunque requiere de redes geométricas muy robustas.

### **2.5.4. LiDAR Terrestre Móvil**

Los sistemas de cartografía móvil MMS<sup>34</sup> consisten básicamente en un auto, camioneta o bote equipado con cámaras y equipos de posicionamiento GNSS. Si a dicho sistema se le adiciona un escáner láser y una Unidad de Medida Inercial (IMU), se tiene un LiDAR Terrestre Móvil, también conocido como MLS<sup>35</sup>.

Al igual que los ALS, utilizan un escáner láser que mide en un plano 2D ya que la tercera dimensión se genera mediante el movimiento del vehículo. Exceptuando la distancia a la cual se encuentran las superficies a medir (edificios, vegetación, mobiliario urbano, carreteras, etc.) el funcionamiento es similar al de los escáneres láser aerotransportados.

La ubicación de cada perfil que se está midiendo se logra a partir de un sistema de posicionamiento que comprende un receptor GNSS integrado con un IMU. En este punto, los MLS presentan un inconveniente que en el caso de los ALS no existe; en zonas urbanas se pueden dar geometrías débiles de la constelación de satélites y hasta se puede llegar a perder la señal por edificios altos y otros objetos de altura. Para mitigar este inconveniente, se adjunta un odómetro instalado en alguna de las ruedas del vehículo. Todos los dispositivos están conectados a una unidad de control desde el cual el operador dirige la captura de coordenadas 3D de millones de puntos.

Si bien en el mercado existe una amplia variedad de sistemas, una configuración típica de los MLS puede constar de los siguientes componentes:

- Uno o dos receptores GNSS
- Un IMU con una frecuencia de 100 Hz
- Un odómetro

---

<sup>34</sup> MMS: *Mobile Mapping System (Sistema de cartografía móvil)*.

<sup>35</sup> MLS: *Mobile Laser scanning System (Sistema de barrido láser móvil)*.

- Dos cámaras digitales
- Dos escáneres laser

Después de la recolección de los datos en campo, debe calcularse la trayectoria del vehículo, luego se procesan las nubes de puntos y las imágenes. Como en los ALS, el cálculo de la trayectoria se realiza a partir de la integración de las mediciones GNSS, IMU, a las que ahora se suman los registros del odómetro.

Si bien la captura de la información en campo es muy rápida, al tratarse de enormes volúmenes de datos, el procesamiento no es trivial. Se requiere de un software específico para gestionar y analizar los miles de millones de puntos. Hoy día, las investigaciones ponen especial énfasis en la extracción automática de características (señales de tráfico, postes de luz, entre otros) para acelerar el trabajo engorroso de la identificación manual.

#### **2.5.4.1. Productos generados**

Mediante los datos capturados por los distintos sensores que componen un sistema LiDAR Terrestre Móvil se pueden obtener múltiples productos relacionados con las vías por las que transitó el vehículo.

De la información brindada por los sensores láser, el producto más demandado es el Modelo Digital de superficie de la vía. Pruebas de campo han demostrado que se puede lograr una precisión de hasta dos centímetros, motivo por el cual dicho modelo se convierte en una fuente de información ideal para obtener perfiles (transversales o longitudinales), entre otros cálculos.

A partir de la captura de las cámaras digitales, se generan imágenes georreferenciadas que permiten una rápida exploración de la vía relevada. A su vez, estos datos son utilizados para darle color a cada punto láser, logrando una nube de puntos con textura que posibilita una representación más fiel de la realidad. Son además muy convenientes para la realización de inventarios, por ejemplo viales.

Por otro lado, al almacenar datos sobre el entorno de las vías, muchas veces, se utiliza dicha información para completar relevamientos LiDAR aéreos y generar así un modelo de ciudad 3D, que en caso de realizarse mediante un terrestre estático demandaría mucho más tiempo.

#### **2.5.4.2. Aplicaciones**

Debido a que generalmente, los MLS utilizan un vehículo terrestre (auto, camioneta, tren), la principal aplicación, con un alto potencial de éxito comercial, es en el área de la



Cartografía sobre vías de comunicación. Normalmente, dicha cartografía, se necesita para la construcción, para mantenimiento e inspección, para análisis de seguridad, para estudios ambientales o simplemente para la generación de bases de datos en donde se cuente con inventarios de objetos de la zona.

El cartografiado de caminos mediante métodos tradicionales es una tarea que consume mucho tiempo y recursos. Esta técnica proporciona un enorme ahorro de tiempo en la captura de información de la vía en sí y de su entorno, ya que es capaz de adquirir millones de puntos por hora junto con decenas de gigabytes de imágenes. Otra ventaja, es que, gracias a que los datos están siendo capturados a una velocidad de 100 km/h no es necesario interrumpir el tráfico.

## 3.APLICACIÓN

### 3.1. Tareas de apoyo al relevamiento LiDAR

Los puntos láser medidos se registran y se almacenan en un sistema de referencia que tiene relación con la posición del escáner. Por otro lado, la nube de puntos final que se busca obtener mediante un escáner láser terrestre, en la mayoría de los casos, surge de la unión de diferentes escaneos tomados desde distintos puntos de vista.

Luego, para lograr empatar todos los escaneos, como se explicó en el Apartado 2.5.3.4, se deberá pasar desde cada sistema de referencia propio del escaneo a un sistema de referencia general. Se puede adoptar como sistema general:

- 1) un sistema interno: el sistema de referencia de uno de los escaneos (escaneo de referencia);
- 2) un sistema externo:
  - local (definido por el comitente);
  - global (generalmente el provisto por el marco de referencia oficial).

Si se elige la opción 1), el problema se reduce a aplicar cualquier técnica de registro indirecto.

En el caso de elegir la opción 2), existen dos alternativas:

- Si se dispone de un escáner que tiene la capacidad de realizar un posicionamiento y una orientación directa (por ejemplo, mediante receptores GNSS y/o compensadores INS), no existen mayores dificultades ya que se realiza un registro directo.

- Si el escáner no permite el registro directo, es necesario asignar coordenadas a un conjunto de objetos de referencia o a puntos bien definidos de la superficie relevada.

Como uno de los objetivos planteados en el presente trabajo es obtener una nube de puntos georreferenciada y el escáner disponible no tiene la capacidad de registro directo, fue necesario analizar qué técnicas utilizar para obtener las coordenadas de algunos puntos de la nube. Al tratarse de una zona con mucha cantidad de vegetación y edificios de gran altura, se descartó la posibilidad de trabajar directamente con equipos GNSS, y se optó por las técnicas clásicas. Para ello, se diseñó y materializó una poligonal planialtimétrica medida con estación total y nivel. Con el objeto de conseguir coordenadas POSGAR 07, se proyectó la medición con equipos GNSS sobre tres puntos de la misma poligonal.

Lo descrito con anterioridad tiene el propósito de dejar en claro que en un relevamiento LiDAR terrestre; las mediciones GNSS, con estación total, nivel u otro instrumento, constituyen *tareas de apoyo* necesarias sólo si el producto a entregar debe ser expresado en un sistema de referencia diferente al definido por el propio escáner.

### **3.1.1. Marco de referencia**

El producto que se propone obtener, es una nube de puntos con coordenadas planimétricas en el Marco de Referencia Geodésico Nacional POSGAR07 y coordenadas altimétricas referidas al 0 del IGN.

Seguidamente se realiza una descripción de los marcos (planimétrico y altimétrico) adoptados.

#### Marco de Referencia Geodésico – POSGAR07

POSGAR07 se convirtió en el nuevo Marco de Referencia Geodésico Nacional oficial el 15 de Mayo de 2009 por disposición del Director del Instituto Geográfico Nacional, sustituyendo, al hasta entonces vigente, POSGAR 94.

Se encuentra basado en ITRF2005 Época 2006.632, constituyendo la materialización sobre el territorio nacional del más moderno sistema de referencia a nivel mundial compatible con el marco regional SIRGAS<sup>36</sup> y responde a los más estrictos estándares de precisión y ajuste en vigencia.

---

<sup>36</sup> SIRGAS: Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas.

Gracias a que utiliza como “red de orden cero” el conjunto de estaciones permanentes GNSS de la Red RAMSAC, posibilita el uso integrado de los datos de las mismas aplicados a la nueva realización y define simultáneamente la Red Oficial GNSS.

En cuanto al diseño de la red, POSGAR07 fue medido sobre los puntos de la red POSGAR 94, añadiendo más de 50 nuevas marcas que perfeccionan la geometría espacial de la red y optimizan los resultados del ajuste.

La Red POSGAR07 está compuesta por 178 puntos que fueron medidos durante 36 horas y procesados mediante el software científico GAMIT-GLOBK.

#### Marco de Referencia Vertical – Red de Nivelación Argentina (RN-Ar)

Hace aproximadamente 100 años el Instituto Geográfico Militar (IGM) – actualmente Instituto Geográfico Nacional (IGN) – inició las labores topográficas y geodésicas que permitieron la construcción y medición de la red de nivelación de la República Argentina. Esta red materializa el sistema vertical del país, cuyo origen es el nivel medio del Océano Atlántico establecido en el año 1923 mediante observaciones mareográficas realizadas en el puerto de Mar del Plata por el Ministerio de Obras Públicas de la Nación.

La red altimétrica consta de 1.924 líneas de nivelación y 36.203 pilares localizados a la vera de rutas y caminos. Las líneas son clasificadas en líneas de Alta Precisión (I orden), de Precisión (II orden), y Topográficas (III orden). Las primeras dividen al territorio nacional en polígonos cerrados o mallas y en poligonales abiertas o periféricas (sobre el litoral marítimo o límites internacionales). Las segundas se desarrollan en el interior de las mallas generadas por las líneas de Alta Precisión y dividen a cada polígono en seis u ocho partes. Por último, las topográficas densifican las mallas.

Las precisiones son milimétricas para las líneas de I y II orden y centimétricas para las líneas de III orden.

Mediante nivelaciones de alta precisión se le proporcionó cota al punto de nivelación principal o fundamental del país, que se encuentra en el Parque Independencia de la Ciudad de Tandil (Provincia de Buenos Aires). A este punto se lo denomina con la sigla PARN<sup>37</sup>. A las cotas referidas al nivel medio del mar se las denomina también cotas IGN.

Una discusión más detallada de estas alturas, implica introducir el concepto de geoide como superficie equipotencial de referencia de las mismas. Se denominan entonces alturas

---

<sup>37</sup> PARN: Punto Altimétrico de Referencia Normal.

ortométricas. El geoide difiere del nivel medio del mar en una cantidad conocida como superficie topográfica del mar (SST: Sea Surface Topography).

### **3.1.2. Elección de los puntos y diseño de la poligonal**

De lo expuesto en el Apartado 3.1, se desprende que el principal condicionante para la elección de los puntos de la poligonal de apoyo, es la posición y el entorno de la superficie a medir con el escáner. Es primordial establecer puntos con coordenadas conocidas próximos a las zonas de relevamiento LiDAR, para garantizar que desde allí se podrán medir los objetos de interés sobre el espacio escaneado.

Otros elementos de consideración, son aquellos relacionados con las características de la zona de trabajo y con el propósito del relevamiento.

En el trabajo propuesto se identificaron los siguientes:

- Tres puntos de la poligonal debían tener un horizonte conveniente para ser medidos con GNSS. Cabe destacar que la zona de trabajo se caracteriza por tener mucha vegetación y edificios de gran altura, por lo que la elección de estos puntos no fue trivial. En un primer momento, los elegidos fueron PF5, PF7 y PF9; pero por problemas en los primeros resultados GNSS del PF7, se decidió extender la poligonal agregando el PF12 en una zona con menos obstrucciones.
- Como el relevamiento LiDAR incluye parte del interior del Edificio Central, fue necesario que al menos un punto de la poligonal se ubique allí.
- Al momento de las mediciones, los jardines de acceso a la Facultad de Ingeniería (frente al Edificio Central), estaban en pleno proceso de renovación con el propósito de buscar embellecer los espacios verdes y adecuarlos para un mejor aprovechamiento de los estudiantes. Esto se convirtió en otro condicionante, en primer lugar porque, estaban trabajando removiendo la tierra, plantando árboles, colocando postes y otras tareas; y en segundo lugar, no se podía invadir dicha zona con la colocación de estacas, hierros o clavos que garanticen la ubicación de los puntos fijos a posteriori.
- Por último, se buscó que además de que haya intervisibilidad entre un punto, el anterior y su consecutivo, exista intervisibilidad entre la mayor cantidad de puntos para ir cerrando figuras e ir verificando antes de seguir avanzando.

En la **Figura 3-1** se muestra un croquis de la poligonal de apoyo.

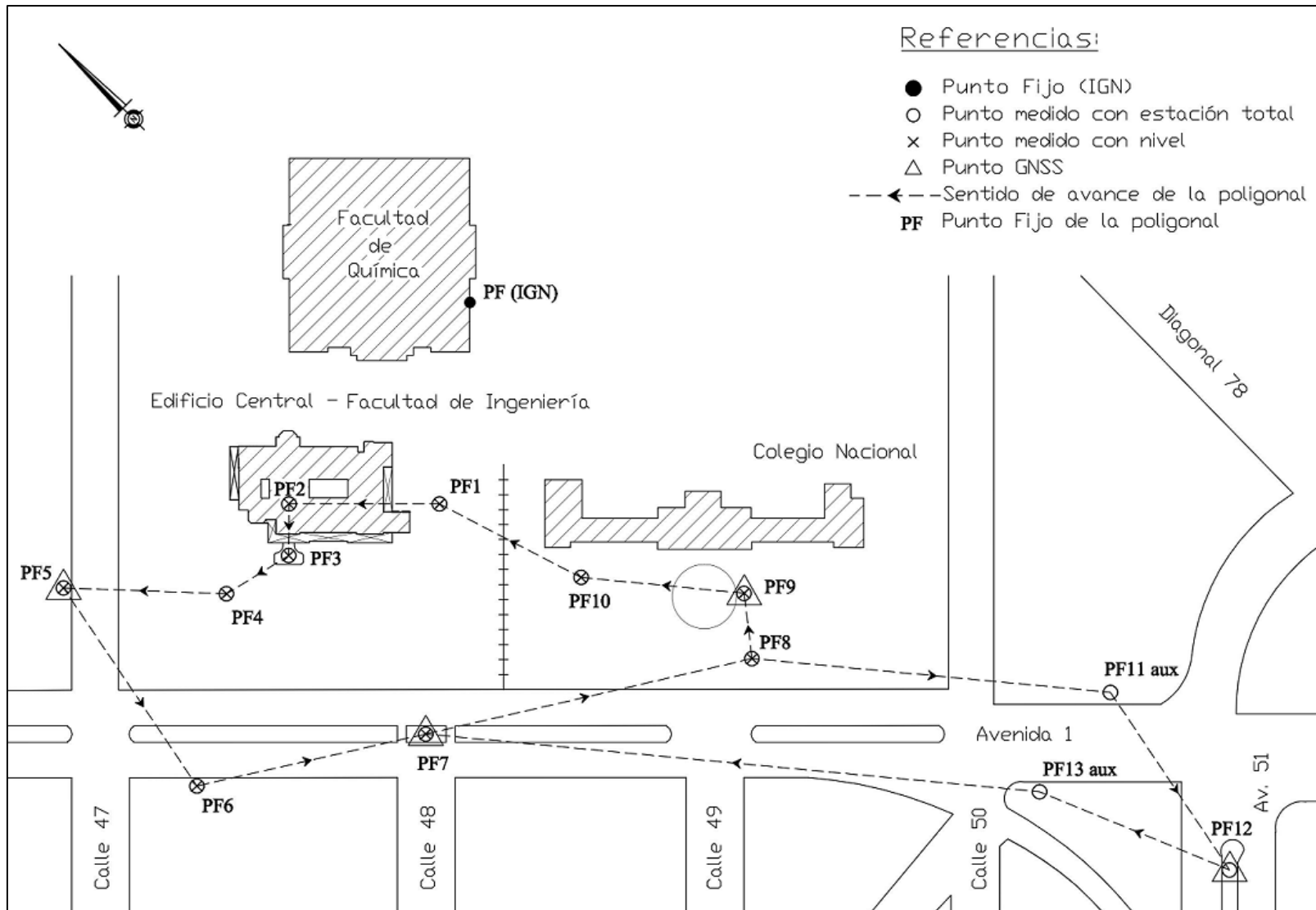


Figura 3-1: Poligonal de apoyo al Relevamiento LiDAR.

### 3.1.3. Relevamiento Planialtimétrico

Uno de los desafíos del presente trabajo es lograr una adecuada integración de diferentes tecnologías. Para obtener el producto final, se realizaron mediciones con estación total, nivel automático, equipos GNSS y LiDAR estático terrestre.

A continuación se desarrolla la metodología adoptada con cada instrumento utilizado para conformar la poligonal:

Para resolver la *parte planimétrica*, se utilizó una Estación Total Trimble M3 5, un mini-prisma y una placa reflectante. (**Figura 3-2**).



Figura 3-2: Estación total, mini-prisma y placa reflectante que fueron utilizados.

Se estableció un sistema de referencia local y se utilizó el método de ángulos y distancia (7 mediciones). Se procedió de la siguiente manera: una vez orientado el instrumento en el PF1 se bisectó al PF2, obteniendo de esta forma las coordenadas del PF2. Se continuó así, siguiendo el sentido de avance antes expuesto (**Figura 3-1**) hasta cerrar la figura midiendo desde el PF10 al PF1. El cierre final resultó de 3 mm en N y 3 mm en E. Sin embargo, ese no fue el único cierre que se realizó. A modo de control, a medida que se fue avanzando se fueron cerrando figuras bisectando puntos atrás, obteniendo como peor incoherencia un valor de 2 mm. (**Figura 3-3**).

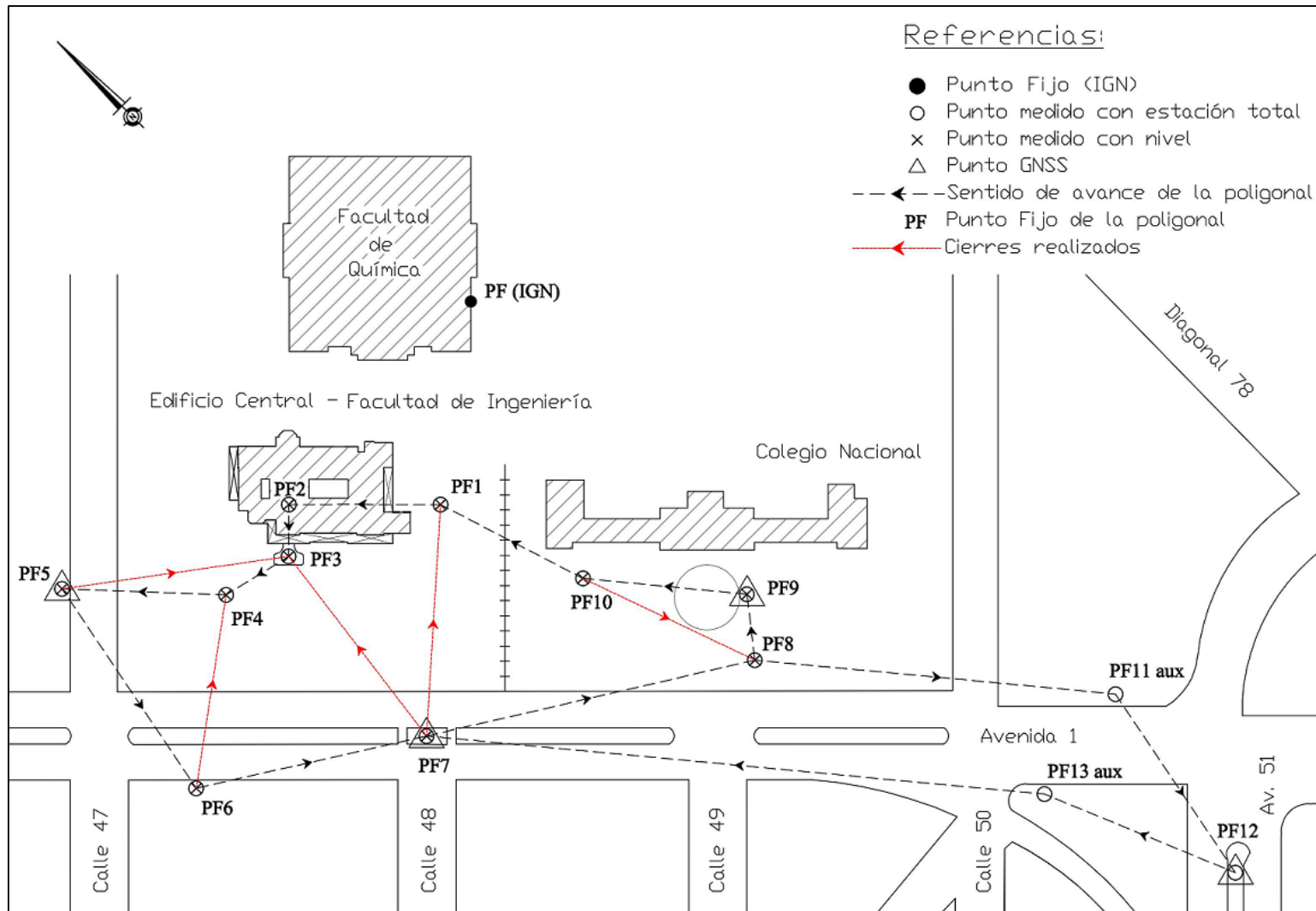


Figura 3-3: Poligonal de apoyo al relevamiento LiDAR con los cierres realizados.

Como ya fue mencionado, por problemas en las primeras determinaciones GNSS, se decidió extender la poligonal de apoyo con el objetivo de posicionar un nuevo punto fijo con mejor horizonte. Se agregaron los puntos PF11aux, PF12 y PF13aux según la misma metodología, partiendo del PF8 y cerrando en el PF7, obteniendo como cierre 2 mm en N y 1 mm en E.

Todos los puntos fueron materializados mediante clavos, con excepción de: PF2, PF11aux y PF13 aux. En el caso del PF2, por estar dentro del Edificio Central de la FI se lo materializó mediante un elemento existente, específicamente una de las piedras del mosaico de granito. Los puntos fijos PF11aux y PF13 aux no se materializaron ya que su única finalidad era oficiar de puntos de paso para extender la poligonal hasta una zona con mejores condiciones para realizar mediciones GNSS.

Durante toda la campaña se trabajó con mucha rigurosidad en el estacionamiento del instrumento y en la colocación de la placa reflectante/mini-prisma sobre el punto. Al utilizar directamente la placa o el mini prisma sobre el punto, se reducen en gran medida los errores ocasionados por una mala verticalización.

Para resolver la parte *altimétrica* se realizó nivelación geométrica mediante un nivel automático PENTAX 28X. (**Figura 3-4**).



Figura 3-4: Nivel automático y mira utilizadas.



Antes de comenzar, se llevó a cabo la comprobación de la existencia o no de error de colimación del nivel. Para ello, se efectuó la nivelación de dos puntos, primero desde el medio y luego desde un lugar muy próximo a uno de los dos puntos. Como el desnivel obtenido fue el mismo, se concluyó que el instrumento estaba exento de error.

Se partió del punto fijo ubicado en la cara SE del edificio de Química (**Figura 3-5**) de cota +19,591 referida al O del IGN.



Figura 3-5: Punto Fijo ubicado en la cara SE del edificio de Química. Se trata de un punto de Nivelación de la Provincia de Buenos Aires. Esta nivelación se encuentra referida al 0 del IGN, por lo tanto, dicho punto posee cota IGN.

En primer lugar, se realizó un transporte de cota hasta el PF1 de la poligonal. Se finalizó la nivelación en el punto fijo de Química, determinándose el error de cierre a partir de la diferencia entre la cota conocida de este punto y la cota calculada del mismo mediante la nivelación, arrojando un valor de 0 mm. De esta manera, se obtuvo la cota del PF1, siendo +20,115.

Luego, partiendo del PF1 se realizó otro transporte de cota, determinándose cada una de las cotas de los puntos fijos que integran la poligonal original, cerrando la nivelación en el punto de arranque (PF1) con un error de cierre (e) de + 3mm.

Para la *georreferenciación* de la poligonal se trabajó, en un primer momento, con los siguientes equipos GNSS doble frecuencia: \*Receptor Trimble 4700, Antena Compact L1/L2 con plato de tierra; \*Receptor Trimble 4000, Antena MC L1/L2 con plato de tierra. Ambos reciben señal solamente de la constelación de satélites GPS. En esta primera campaña de medición GNSS, se relevaron los puntos PF5, PF7 y PF9. Los resultados obtenidos fueron inaceptables, hecho que obligó a realizar una segunda campaña. Los motivos de los resultados erróneos fueron: uno de los cables de los equipos se encontraba en

malas condiciones y produjo múltiples cortes en las señales recibidas; se trata de una zona con considerable cantidad de obstrucciones.

En la segunda campaña de mediciones GNSS, se trabajó con equipos que además de recibir señales de la constelación GPS, reciben señales de la constelación GLONNAS. Esto se hizo con el objetivo de garantizar la recepción de señales de una mayor cantidad de satélites. Se trata de dos equipos doble frecuencia: \* Topcon Hiper + con antena incorporada, \*Receptor Topcon Legacy, Antena Legant 2 (**Figura 3-6**). Por otro lado, se decidió extender la poligonal y ubicar otro punto con mejor horizonte para reemplazar el PF7.



Figura 3-6: Equipos GNSS utilizados en la segunda campaña. Izquierda: Receptor Topcon Hiper + con antena incorporada. Derecha: Receptor Topcon Legacy, Antena Legant 2.

Se realizaron mediciones GNSS geodésicas sobre los puntos PF5, PF9 y PF12 de la poligonal. Se llevaron a cabo dos sesiones diferentes, cada una de aproximadamente 1 h 45 min: \*Sesión 1: PF5, PF12, LPGS; \*Sesión 2: PF9, P12, LPGS. (Ver **Figura 3-7**).

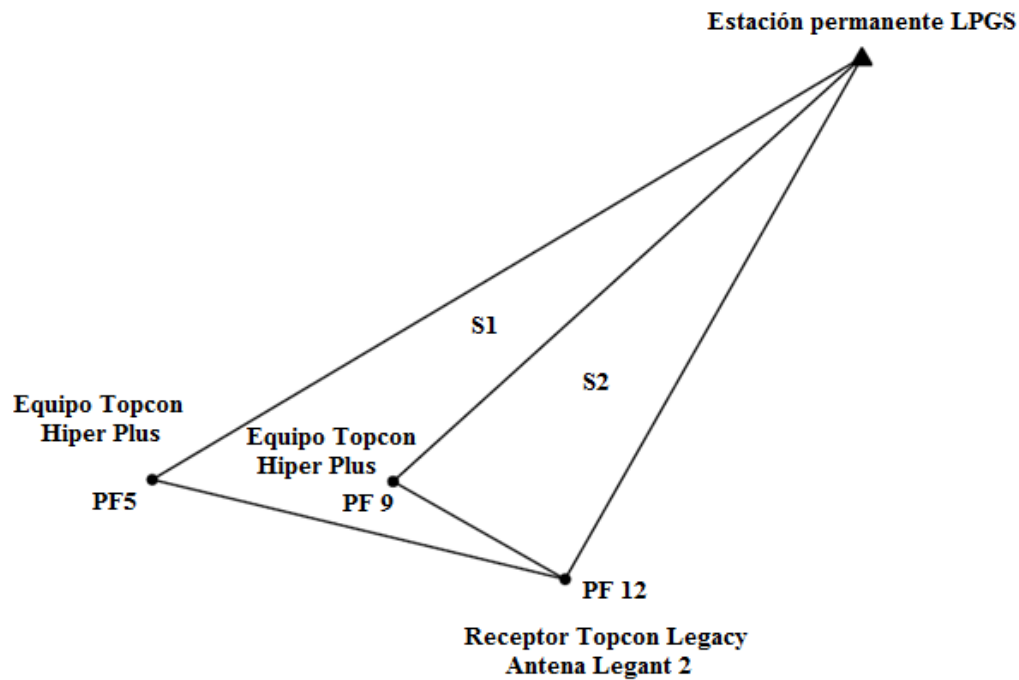


Figura 3-7: Croquis correspondiente a la segunda campaña de mediciones GNSS.

El método empleado fue posicionamiento estático diferencial tomando como punto de coordenadas conocidas la estación permanente LPGS, dando una base máxima próxima a 1.300 m.

Los recaudos que se tomaron fueron los siguientes: las antenas se colocaron de tal manera que su orientación coincida con el norte; se tomó la altura inclinada de las antenas a por lo menos dos lugares de la misma, antes de comenzar las mediciones y finalizadas la mismas; se identificaron las obstrucciones y se registraron las posiciones de las burbujas de los niveles esféricos una vez finalizadas las mediciones.

En campo se confeccionaron planillas de nivelación, planillas de medición GNSS y esquemas de obstrucciones. En gabinete se realizaron las monografías correspondientes a cada punto de la poligonal con croquis y fotografías del lugar. Esta información se encuentra en el Anexo II.

### **3.1.4. Procesamiento de la Poligonal**

#### *Planimetría*

Debido al valor del cierre, los datos obtenidos de la estación total fueron utilizados sin mediar cálculos posteriores. No obstante, en algunas situaciones, será necesario realizar la correspondiente compensación.

### *Altimetría*

Como se mencionó anteriormente, el error de cierre obtenido fue de +3 mm. Por otra parte, al arrancar la nivelación en un punto fijo de cota conocida y cerrarla en el punto de arranque, la misma es considerada de 3er o 4º orden. La expresión de Tolerancia que se adopta en nivelaciones de 3er y 4º orden es:

$$T(mm) = \pm 10 \cdot \sqrt{L (km)}^{38}$$

Debido a las exigencias planteadas en el presente trabajo, se decidió reducir la tolerancia en la mitad. Luego:

$$T(mm) = \pm 5 \cdot \sqrt{L (km)}$$

Donde L es el valor de la distancia total recorrida expresada en kilómetros,  $L = 505,80 \text{ m} = 0,5058 \text{ km} \Rightarrow T = \pm 3,6 \text{ mm}$ . Como el error es inferior a la tolerancia ( $e < T$ ) se concluye que la medición es válida y se procede a compensar el mismo (Ver Anexo II). El criterio adoptado para compensar la nivelación se basa en considerar que el error cometido es proporcional a la distancia recorrida, por lo tanto a mayor distancia recorrida se cometerá mayor error.

$$\text{corrección a aplicar a cada punto} = \frac{c \cdot \text{distancia acumulada}}{\text{distancia total de nivelación}}$$

Donde  $c = \text{corrección a aplicar a la nivelación} = -e$ .

### *Georreferenciación*

El software utilizado para el procesamiento de las observaciones GNSS fue Trimble Business Center (TBC).

La metodología adoptada consistió en realizar un primer procesamiento con todas las características preestablecidas y luego un mejoramiento de cada línea base al análisis de los errores típicos, el rastreo de satélites y residuales.

Se definió como punto de control la estación permanente LPGS ingresando las coordenadas POSGAR07 de la misma, las cuales se obtuvieron de la página oficial del IGN:

---

• <sup>38</sup> Fórmula: ROBERTO MÜLLER. Compendio General de Topografía Teórico Práctica. Tomo III. Volumen I. Triangulación y Nivelación terrestre y subterránea. Cuarta Edición. Página 220.

<http://www.ign.gob.ar/>. (Ver Anexo II). LPGS pertenece a la red RAMSAC y es una estación de referencia internacional.

Los vectores se procesaron con la solución L1 debido a que el vector de mayor distancia no superaba los 1.300 m.

A continuación se muestra la forma de la Red (**Figura 3-8**) y se expone información de importancia resultado del procesamiento (**Tabla 3-1**).

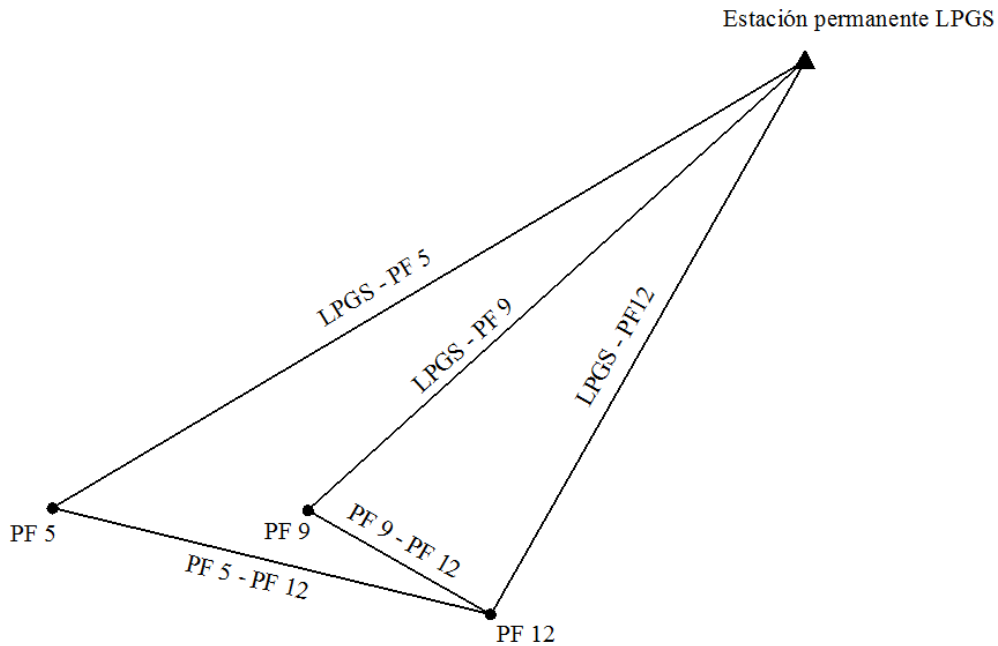


Figura 3-8: Vectores de la Red

Línea Base	Tipo de solución	Distancia (m)	RMS <sup>39</sup> (m)	Inicio	Fin	Duración
LPGS - PF5	Fija	1230,356	0,012	09:11:14	11:01:29	01:50:15
PF5 - PF12		387,049	0,031	09:34:14	11:01:29	01:27:15
LPGS - PF9		1085,112	0,022	11:26:59	13:31:29	02:04:30
PF9 - PF12		176,647	0,032	11:26:59	13:18:59	01:52:00
LPGS - PF12		1044,665	0,018	09:33:59	13:18:59	03:45:00

Tabla 3-1: Tipo de solución, longitud y RMS de cada vector.

Los indicadores (RMS) de la **Tabla 3-1** muestran únicamente calidad interna de las soluciones GNSS; por eso es importante realizar un control externo que permita dimensionar la calidad real de las determinaciones.

<sup>39</sup> RMS: Root Mean Square (Error medio cuadrático).

En este trabajo, el control en las mediciones GNSS se consideró de fundamental importancia por tratarse de una zona cubierta de obstrucciones.

Con los vectores individuales ya procesados, se procedió a realizar el cierre de las figuras y el análisis de los resultados obtenidos.

En primera instancia se realizaron los cierres correspondientes a una sola sesión (**Figura 3-9**). Si bien este cierre no incluye vectores independientes, representa un control interno que siempre es conveniente realizar. Tanto el cierre 1 como el 2 arrojaron resultados próximos a cero (vertical 3 mm en el peor caso).

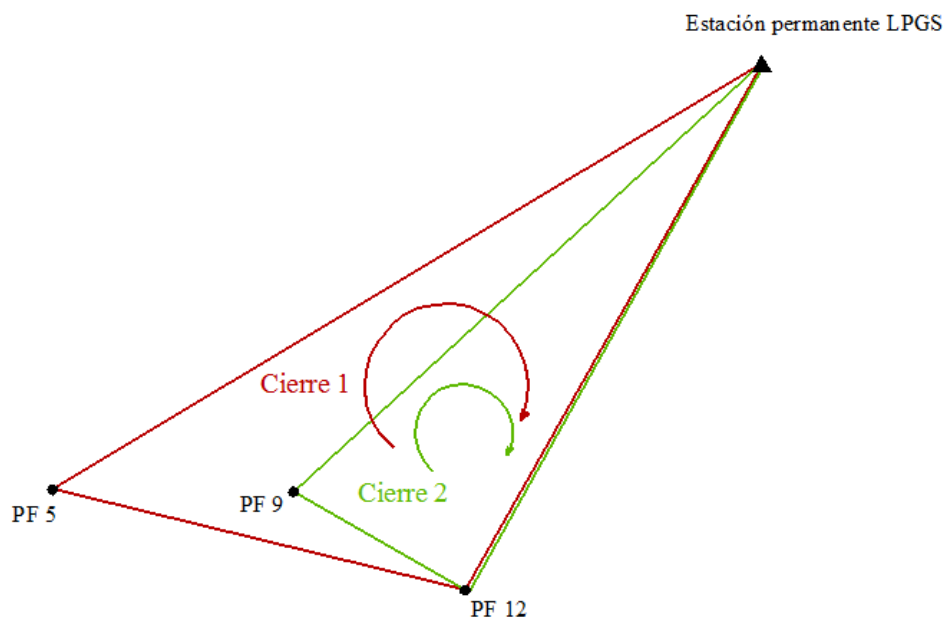


Figura 3-9: Cierres correspondientes a una sola sesión.

El cierre que otorga información relevante y que permite evaluar la precisión de la red es el que involucra sesiones independientes. Para ello se calcularon las coordenadas geodésicas del PF12 por los dos caminos diferentes correspondientes a las sesiones 1 y 2 respectivamente: \* LPGS-PF5; PF5-PF12; \* LPGS-PF9; PF9- PF12. El valor de este cierre también resultó próximo a cero, donde la mayor discrepancia se encontró en la coordenada altura (3 mm).

En consecuencia, en este caso es innecesario realizar un ajuste de la red. No obstante, en cada caso se debe analizar la necesidad de realizar un ajuste.

Finalmente, las coordenadas del PF12 se obtuvieron a partir de promediar los resultados otorgados por los dos caminos antes mencionados. En la **Tabla 3-2** Se exponen las coordenadas geodésicas de los puntos fijos PF5, PF9 y PF12.

Coord. geod.	$\varphi$	$\lambda$	h
5	-34°54'25,8410"	-57°56'44,7058"	34,249
9	-34°54'30,5190"	-57°56'38,3457"	35,639
12	-34°54'35,5791"	-57°56'35,0769"	33,854

Tabla 3-2: Coordenadas geodésicas de los puntos fijos: PF5, PF9 y PF12.

Con las coordenadas geodésicas en el sistema de referencia POSGAR 07 de tres puntos de la poligonal (PF5, PF9 y PF12), se procedió a la georreferenciación de la misma. En otras palabras, las coordenadas planimétricas determinadas en un sistema local de cada uno de los puntos que integran la poligonal se transformaron a coordenadas planimétricas en el sistema global POSGAR 07. Para ello se realizaron los siguientes pasos:

- 1) *Transformación de coordenadas geodésicas (POSGAR 07) a coordenadas planas (GK<sup>40</sup>-POSGAR 07).* Se proyectaron las coordenadas geodésicas de los puntos PF5, PF9 y PF12 (obtenidas a partir de observaciones GNSS) mediante la proyección Gauss Krüger. La faja oficial que correspondería utilizar sería la número 6 ( $\lambda=-57^\circ$ ), encontrándose la zona de trabajo apartada  $1^\circ$  del meridiano central. Luego, el módulo de deformación lineal para la distancia más larga involucrada (PF5-PF12) es  $m=1,00009$ , lo que se traduce en un error de 3,5 cm en 388 m.

Es necesario recordar, que la tecnología LiDAR tiene precisiones milimétricas, por lo cual se decidió trabajar en Faja N°9. Se trata de una faja creada en la zona de trabajo a través de la utilización del software Geocalc con la finalidad de reducir errores debido al distanciamiento del centro de faja.

En la **Tabla 3-3** se muestran los parámetros utilizados para definir el sistema de proyección.

---

<sup>40</sup> GK: Gauss-Krüger.

Falso Norte:	0
Falso Este:	9.500.000
Latitud origen	S 90° 00' 00"
Longitud central:	W 57° 57' 00"
Factor de escala	1
Elipsoide	WGS84

Tabla 3-3: Parámetros utilizados para definir el sistema de proyección.

$$\begin{pmatrix} \varphi \\ \lambda \end{pmatrix}_{\text{POSGAR07}} \rightarrow \begin{pmatrix} N \\ E \end{pmatrix}_{\text{GK-POSGAR07}}$$

- 2) *Transformación de coordenadas planas en un sistema de referencia local (SL) a coordenadas planas en un sistema de referencia global (GK-POSGAR07).* Se realizó una roto-traslación de todos los puntos que integran la poligonal. Se definió como primer punto de traslación el PF12, ya que corresponde al que tuvo mayor duración en las observaciones GNSS y al que resultó de un promedio de dos sesiones independientes que otorgaron resultados muy coherentes. Mediante un segundo punto, se le dio orientación (azimut) a los puntos de la poligonal. Para esto, se utilizó el PF5 por dos motivos: de los dos puntos restantes es el que posee un mejor valor de RMS, y a su vez, corresponde al punto que se encuentra más alejado del punto de pivote, dando como resultado un vector de mayor longitud.

Como es sabido, para pasar de un sistema de referencia a otro es necesario obtener parámetros de traslación, rotación y escala. Hasta el momento, se establecieron los parámetros de traslación  $\Delta X$  y  $\Delta Y$  y se calculó el de rotación, pero nada se dijo sobre el de escala. La razón de ello es que se decidió conservar el parámetro escala del sistema de referencia local ya que se priorizó la calidad geométrica que resulta de las mediciones con estación total frente a las determinaciones GNSS; de forma contraria, se estaría deformando la red.

Otra manera de hallar los parámetros es a partir de un ajuste clásico por mínimos cuadrados en el que participan las coordenadas de los 3 puntos en ambos sistemas.

- 3) *Análisis del error.*

Se determinaron las diferencias entre los valores de las coordenadas Norte y Este del PF5 obtenidas con estación total, y transformadas al sistema global POSGAR 07, con aquellas proyectadas a partir de observaciones GNSS.



$$N PF5_{ET} - N PF5_{GNSS} = +0,005 m$$

$$E PF5_{ET} - E PF5_{GNSS} = -0,004 m$$

Luego, la diferencia en la distancia es:

$$\overrightarrow{PF12 PF5_{ET}} - \overrightarrow{PF12 PF5_{GNSS}} = +0,006m$$

Recordar que el punto PF5 solo fue utilizado para fijar la orientación.

El mismo procedimiento sobre el punto PF9 arroja los siguientes resultados:

$$N PF9_{ET} - N PF9_{GNSS} = -0,005 m$$

$$E PF9_{ET} - E PF9_{GNSS} = +0,006 m$$

$$\overrightarrow{PF12 PF9_{ET}} - \overrightarrow{PF12 PF9_{GNSS}} = +0,007m$$

Por tratarse de distancias muy cortas los desniveles entre los puntos PF5 y PF9 que resultan de la nivelación geométrica y de las observaciones GNSS, pueden ser comparados:

$$\begin{aligned} \Delta H (cota PF9 - cota PF5)_{nivel} - \Delta h(alt. elip. PF9 - alt. elip PF5)_{GNSS} = \\ 1,394 m - 1,390 m = 0,004 m \end{aligned}$$

Estas comparaciones muestran una extraordinaria coherencia entre las 3 técnicas involucradas: GNSS, Nivelación geométrica (Nivel) y poligonal clásica (Estación Total).

### 3.1.5. Resultados Finales

En la **Tabla 3-4** se volcaron los resultados finales de cada una de las mediciones descriptas con anterioridad.

Leyendo la **Tabla 3-4** de izquierda a derecha: en las columnas (1) y (2) se encuentran las coordenadas N y E de los puntos fijos en un sistema de referencia local (SL) obtenidas a partir de mediciones con estación total; las columnas (3) y (4) muestran las coordenadas geodésicas  $\varphi$  y  $\lambda$  en POSGAR 07 conseguidas mediante mediciones GNSS; en las columnas (5) y (6) se exponen las coordenadas POSGAR 07 proyectadas en Gauss-Krüger Faja N°9 obtenidas luego de la roto-traslación; finalmente en la columna (7) se muestran las cotas IGN de cada punto fijo determinadas a partir de mediciones con nivel.

<b>Resultados</b> <b>Puntos Fijos</b>	<b>Planimetría</b>						<b>Altimetría</b>
	<b>N(SL)</b>	<b>E(SL)</b>	<b>φ</b>	<b>λ</b>	<b>N(P07-GK-F9)</b>	<b>E(P07-GK-F9)</b>	<b>H(IGN)</b>
<b>1</b>	<b>1000,000</b>	<b>2000,000</b>	<b>—</b>	<b>—</b>	<b>6.137.613,838</b>	<b>9.500.500,998</b>	<b>20,115</b>
<b>2</b>	<b>1007,700</b>	<b>2051,742</b>	<b>—</b>	<b>—</b>	<b>6.137.649,323</b>	<b>9.500.462,561</b>	<b>19,673</b>
<b>3</b>	<b>1021,642</b>	<b>2049,928</b>	<b>—</b>	<b>—</b>	<b>6.137.639,169</b>	<b>9.500.452,836</b>	<b>19,602</b>
<b>4</b>	<b>1033,807</b>	<b>2066,030</b>	<b>—</b>	<b>—</b>	<b>6.137.644,088</b>	<b>9.500.433,264</b>	<b>18,924</b>
<b>5</b>	<b>1052,329</b>	<b>2114,790</b>	<b>-34°54'25,8410"</b>	<b>-57°56'44,7058"</b>	<b>6.137.670,465</b>	<b>9.500.388,266</b>	<b>18,165</b>
<b>6</b>	<b>1088,494</b>	<b>2071,704</b>	<b>—</b>	<b>—</b>	<b>6.137.614,225</b>	<b>9.500.387,101</b>	<b>18,682</b>
<b>7</b>	<b>1067,360</b>	<b>1999,057</b>	<b>—</b>	<b>—</b>	<b>6.137.570,875</b>	<b>9.500.449,109</b>	<b>19,473</b>
<b>8</b>	<b>1036,622</b>	<b>1899,991</b>	<b>—</b>	<b>—</b>	<b>6.137.512,963</b>	<b>9.500.535,162</b>	<b>19,759</b>
<b>9</b>	<b>1016,923</b>	<b>1901,240</b>	<b>-34°54'30,5190"</b>	<b>-57°56'38,3457"</b>	<b>6.000.555,555</b>	<b>6.000.555,555</b>	<b>19,559</b>
<b>10</b>	<b>1021,041</b>	<b>1960,370</b>	<b>—</b>	<b>—</b>	<b>6.000.555,555</b>	<b>6.000.555,555</b>	<b>19,740</b>
<b>11aux</b>	<b>1017,467</b>	<b>1755,285</b>	<b>—</b>	<b>—</b>	<b>6.000.555,555</b>	<b>6.000.555,555</b>	<b>—</b>
<b>12</b>	<b>1050,043</b>	<b>1727,741</b>	<b>-34°54'35,5791"</b>	<b>-57°56'35,0769"</b>	<b>6.000.555,555</b>	<b>6.000.555,555</b>	<b>—</b>
<b>13aux</b>	<b>1045,921</b>	<b>1788,030</b>	<b>—</b>	<b>—</b>	<b>6.000.555,555</b>	<b>6.000.555,555</b>	<b>—</b>

Tabla 3-4: Coordenadas de los puntos de la poligonal en los diferentes sistemas de referencia utilizados.

## 3.2. Relevamiento LiDAR

### 3.2.1. Instrumento

El relevamiento se realizó con un escáner láser 3D marca Trimble modelo TX5 (**Figura 3-10**). Este equipo fue adquirido por la UNLP (FCAG y FBA) en Diciembre de 2014, y es el primero de su tipo que pertenece a una universidad nacional.



Figura 3-10 Fotografía del escáner láser 3D marca Trimble modelo TX5 durante el relevamiento del patio interior del Edificio Central de la Facultad de Ingeniería.

Junto con el escáner se adquirió un set de objetos de referencia: seis (6) esferas y cinco (5) tableros cuadriculados. Dicho set permite realizar la técnica de registración basada en objetos de referencia. A su vez, para poder referenciar las esferas mediante mediciones con estación total, se compró un mini-prisma que tiene la particularidad de poseer la misma base que tienen las esferas y el tamaño del radio de las mismas. De esta manera, al bisectar el mini-prisma se consigue las coordenadas del centro de la esfera. (**Figura 3-11**).



Figura 3-11: Fotografías de las esferas, tablero cuadriculado y mini-prisma disponibles.

A continuación se enuncian las características principales del escáner láser 3D Trimble TX5.

- Funciona por medio del envío de un haz de láser infrarrojo ( $\lambda=905$  nm) hacia el centro de un espejo giratorio. El espejo desvía el láser en rotación vertical. (**Figura 3-12**). De acuerdo con el estándar IEC 60825-1:2007, Ed. 2.0, el escáner está clasificado como un sistema láser Clase 3R<sup>41</sup>.
- Método de medición: diferencia de fase.
- Frecuencia de 976.000 Hz
- Cubre un campo de  $360^\circ \cdot 300^\circ$ . (**Figura 3-12**)
- Alcance: 120 m.
- Gestión de datos: los datos se almacenan en una tarjeta SD.
- Posee una cámara a color integrada de 70 megapíxeles.
- Los escaneos tienen la opción de contar con datos posicionales derivados de los diferentes sensores que posee el escáner. Estos datos pueden ser: *altitud* del sensor de altura, *orientación* de la brújula e *inclinación* del compensador de doble eje. Esta información, si está disponible, se utiliza para una alineación (registro) aproximada inicial y automática de los escaneos después de su importación.

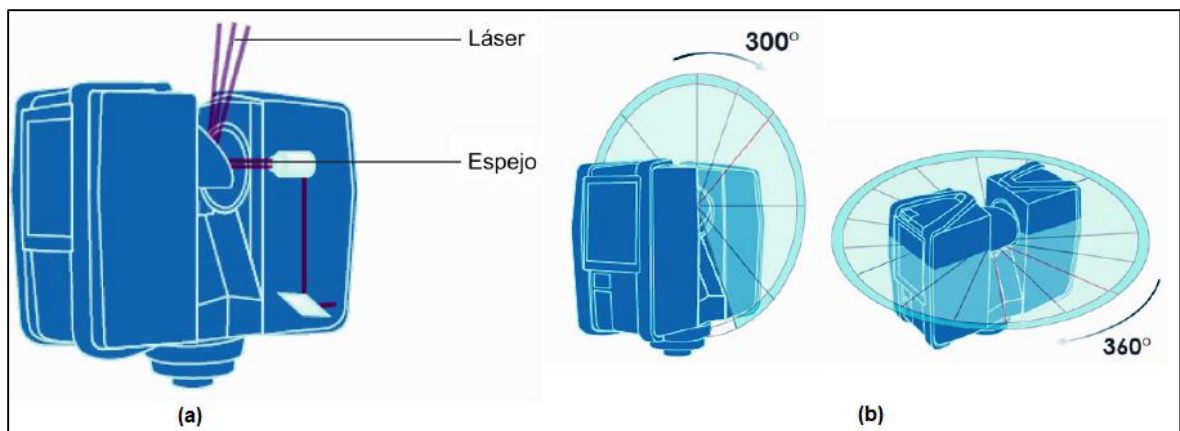


Figura 3-12 (a): Figura que muestra cómo el espejo desvía el láser en rotación vertical. (b) Campo de visión que cubre el escáner.

### 3.2.2. Campaña

Como en cualquier relevamiento, el realizado con LiDAR necesita de una planificación previa. Es sabido que, las mediciones que cuentan con una programación de antemano

<sup>41</sup> Láser Clase 3R: [http://www.sprl.upv.es/IOP\\_RF\\_01%28a%29.htm](http://www.sprl.upv.es/IOP_RF_01%28a%29.htm)

originan mejores resultados logrados con los recursos humanos necesarios y en menor tiempo, por lo tanto todo se traduce en un menor costo.

El objeto, su entorno, la precisión requerida y las especificaciones técnicas del escáner que se dispone son determinantes para elegir algunos de parámetros del proceso de medición: densidad de puntos, distancia máxima al objeto, ángulo máximo de reflexión, cantidad de estaciones, tipo de registro (directo o indirecto), entre otros.

El entorno, específicamente, condicionará en gran medida la técnica a utilizar para realizar el registro. Si el objeto está bajo cubierta no se podrán utilizar receptores GNSS por lo que el registro directo no sería una opción factible, teniendo que recurrir a técnicas topográficas. Si se decide realizar un registro indirecto basado en objetos de referencia, habrá que definir ubicaciones adecuadas para dichos objetivos.

### **3.2.3. Distribución de las estaciones LiDAR**

Un punto de especial importancia a considerar en un relevamiento LiDAR es la cantidad de estaciones necesarias. Si bien el instrumento demora pocos minutos en realizar un relevamiento típico desde una estación, es necesario recordar que por cada escaneo se registran millones de puntos los cuales deben ser almacenados. Aunque este tipo de equipo permite obtener mucha cantidad de información, se debe ser criterioso y generar sólo la necesaria ya que luego los datos deben ser procesados. El procesamiento de la información LiDAR, no es un tema trivial, de hecho se estima que la relación trabajo de campo/trabajo de gabinete es 1/10.

Es bueno recordar, que NO es necesario estacionar el equipo sobre coordenadas conocidas. Como se explicó en el Apartado 2.5.3.3, las coordenadas X, Y y Z de cada punto son calculadas utilizando la distancia y los ángulos de la rotación del espejo y la rotación horizontal. Estos ángulos se codifican simultáneamente con la medición de la distancia. La distancia, el ángulo vertical y el ángulo horizontal forman las coordenadas polares ( $\delta$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ), que luego se transforman en coordenadas cartesianas (x, y, z). Por lo tanto, el escáner determina las coordenadas polares de los puntos registrados en un sistema de referencia centrado en el instrumento.

En general, la cantidad y la ubicación de las estaciones necesarias surgen de un análisis de los siguientes elementos:

- Objetivo del relevamiento / producto a entregar;
- Tamaño del objeto/superficie a relevar;
- Ocultaciones que otros elementos próximos pueden provocar;
- Detalle que se requiere para generar el producto encomendado;
- Angulo máximo de reflexión, en función de la precisión que se desea. Cuanto más se aleje del ángulo de 90° (incidencia perpendicular sobre la superficie) peor será la determinación del punto a medir.
- Circunferencia sin información alrededor de cada estación debido al campo de visión del instrumento;
- Técnica de registración. En caso de aplicar la registración basada en objetos de referencia (artificiales), se deben respetar una serie de principios básicos que se desarrollan en el Apartado 3.2.4 que condicionan las posiciones del escáner.

En la **Figura 3-13** y en la **Figura 3-14** se muestran dos croquis con la ubicación de las estaciones elegidas para el relevamiento de la fachada y parte del interior del Edificio Central de Ingeniería y de la fachada del Colegio Nacional. En ambos relevamientos la técnica de registro que se definió fue la basada en objetos de referencia artificiales y la referenciación se programó mediante mediciones de los objetivos con estación total a partir de la poligonal planialtimétrica confeccionada ya que el entorno no permitía realizar mediciones GNSS.

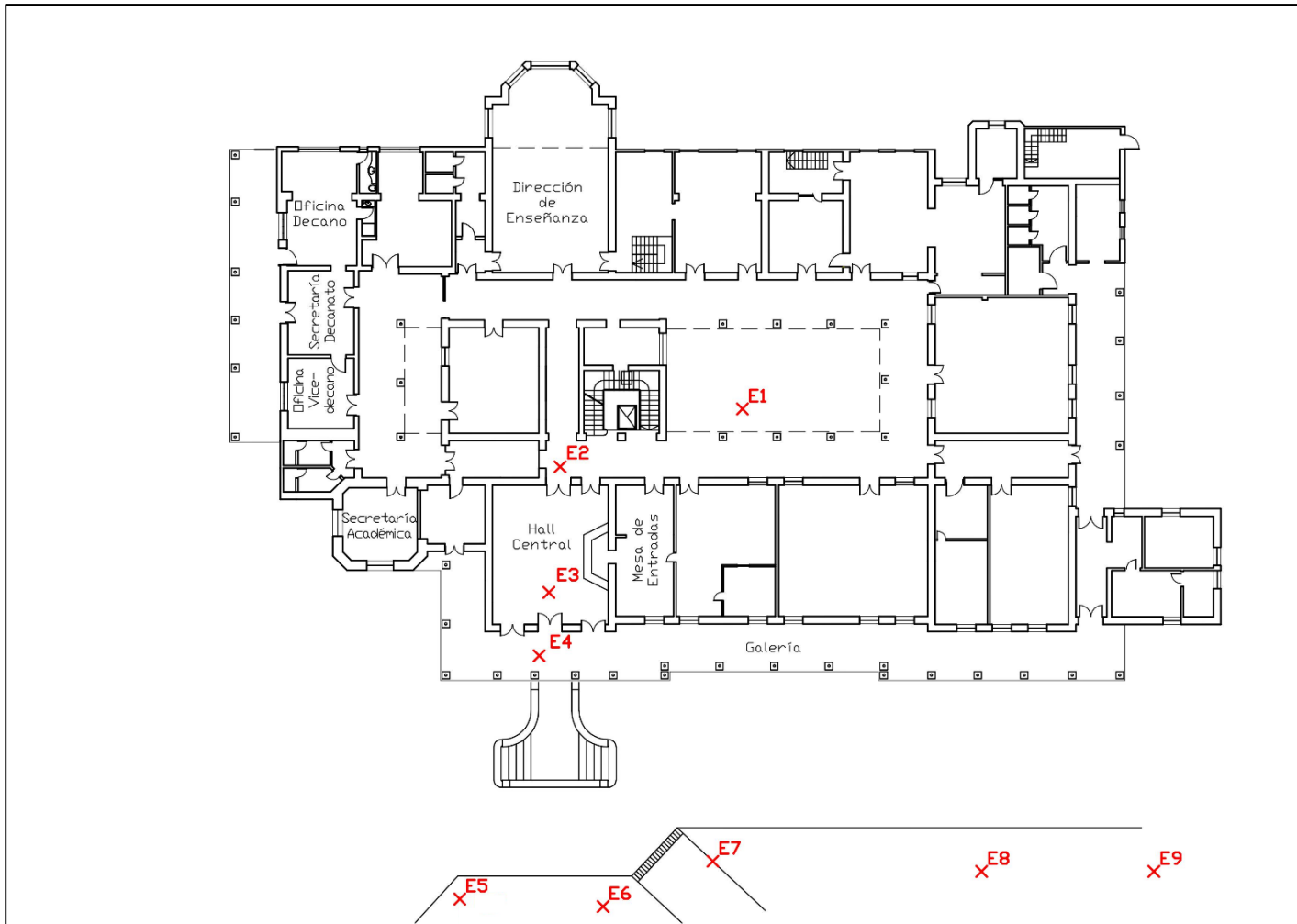


Figura 3-13: Distribución de las estaciones realizadas en el relevamiento LiDAR del Edificio Central de la Facultad de Ingeniería.

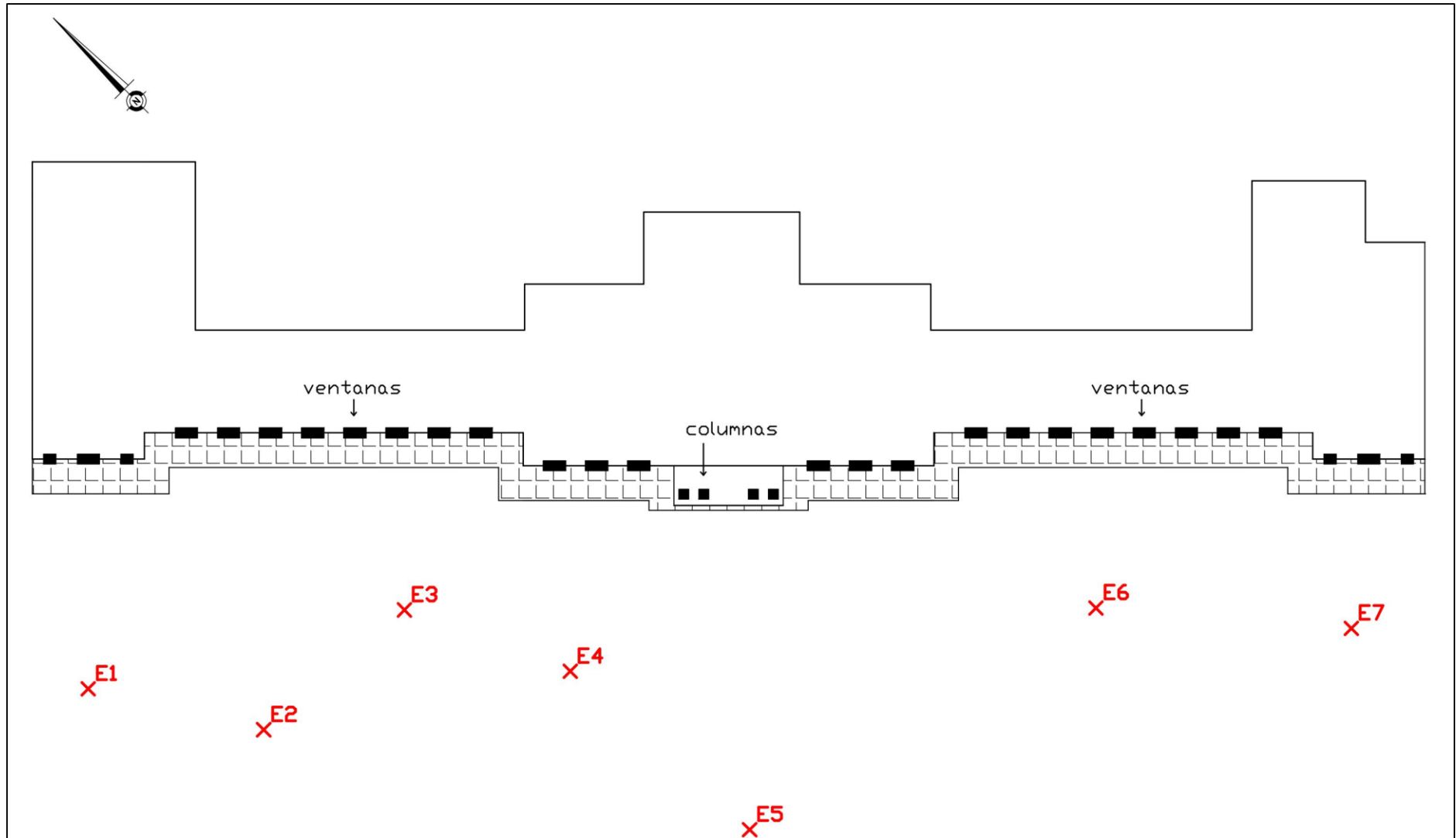


Figura 3-14: Distribución de las estaciones realizadas en el relevamiento LiDAR del Colegio Nacional de la UNLP.



### 3.2.4. Objetos de referencia

En la mayoría de los software de procesamiento de datos LiDAR se pueden utilizar dos tipos objetos de referencia para el registro:

- *Naturales*: planos, losas, conductos, puntos de esquina, entre otros.
- *Artificiales*: colocados en forma manual, como esferas u objetivos en papel (objetivos circulares planos o de tablero cuadriculado).

Ante cada escaneo, es necesario garantizar que existan suficientes objetos de referencia en el campo de visión del mismo para que no haya problemas durante el proceso posterior de registro. Si bien dicho proceso, se puede realizar puramente sobre la base de objetivos naturales, se recomienda mejorar el entorno escaneado con objetos de referencia artificiales adicionales (esferas/ objetivos de tablero cuadriculado), ya que en la mayoría de los casos se obtienen resultados más precisos y se ahorra mucho tiempo de procesamiento.

A partir de pruebas realizadas, se determinó que utilizando referencias naturales se obtiene un RMS del orden del milímetro en un tiempo de procesamiento estimado en 5 minutos para cada escaneo; mientras que utilizando referencias artificiales (específicamente esferas), se obtiene un RMS submilimétrico en un tiempo de trabajo de 30 segundos por escaneo.

Independientemente de qué tipo de referencia se utilice para realizar el registro, al momento del relevamiento se debe asegurar que los objetivos se visualicen en más de un escaneo. Un objetivo que sólo está visible en un escaneo es inútil para lograr una nube de puntos integrada. Matemáticamente se necesitan tres referencias correspondientes en los dos escaneos que desea registrar entre sí. En el caso del escáner Trimble TX5, como los datos de inclinación capturados con el compensador de doble eje (clinómetro) sirven como una referencia, teóricamente, solo se necesitarían otras dos. No obstante, se recomienda contar con un mayor número debido a que mejora los resultados y facilita el proceso.

Seguidamente se desarrollan una serie de principios básicos que deben tenerse en cuenta para definir la ubicación de los objetivos artificiales, con especial énfasis sobre las esferas y los tableros cuadriculados, que son los objetos disponibles en el sistema utilizado.

- No deben posicionarse en forma simétrica. Se deben ubicar a distintas distancias con respecto al escáner y se los debe distribuir en diferentes niveles en el área de escaneo. En lo posible, se debe evitar la disposición lineal.

- Se deben ubicar a una distancia del escáner que no supere la distancia máxima establecida. Esto se debe a que, para que el software de procesamiento reconozca el objeto, el mismo debe poseer una determinada cantidad de puntos de escaneo en su superficie. Si no se alcanza dicha cantidad, el objeto no podría ser utilizado para realizar el registro. La distancia máxima está en función de la resolución que se utilice en el escaneo y del tamaño del objeto. En caso de no poder ubicar las referencias a una distancia adecuada del escáner, existen dos posibles soluciones: aumentar la resolución de escaneo o aumentar el tamaño de los objetivos. En el caso del escáner Trimble TX5 y el software de procesamiento SCENE:
  - Los objetivos de esfera deben tener al menos 60 puntos de escaneo en su superficie. Por ejemplo, si se escanea con una resolución de 1/4 y se utilizan esferas de diámetro de 145 mm, la distancia al escáner no debe superar los 18 metros. Si el diámetro de las esferas se aumenta a 200 mm, la distancia al escáner podría extenderse a 45 m.
  - Los objetivos de tablero cuadrulado deben tener al menos cuatro puntos de escaneo por cuadrante. Por ejemplo, al utilizar referencias de tablero cuadrulado A4 y escanear con una resolución de 1/4, la distancia al escáner no debe superar los 15 metros. Otras reglas a tener en cuenta con este tipo de referencia son:
    - el ángulo con el cual incide el haz láser no debe ser menor a 45°;
    - no deben acoplarse a superficies curvas.
- Se deben elegir lugares que garanticen la inamovilidad de los objetivos a lo largo de todo el tiempo que demore realizar los escaneos que los involucren. Tanto las esferas en su base, como los tableros cuadrulares en su respaldo, poseen una superficie imantada que les permite aferrarse a superficies metálicas para conservar la misma posición. En relevamientos que abarquen zonas muy transitadas, es necesario utilizar señales (conos, cinta de peligro) que adviertan sobre la ubicación de los objetivos. Si bien los relevamientos LiDAR del presente trabajo se realizaron un día sábado, justamente por este motivo, una vez finalizado el escaneo desde la estación E5 y mientras se estaba trasladando el equipo hacia la estación E6, un estudiante que pasaba por allí por curiosidad tomó con sus manos una de las esferas. En el momento en que movió la esfera, la misma quedó sin utilidad para ensamblar los escaneos tomados desde E5 y E6. De todas formas, se contaba con más de tres objetos de

referencia entre dichas estaciones; por lo que se siguió relevando sin problemas. Dicha experiencia, muestra la importancia de elegir lugares que garanticen la inamovilidad de los objetivos y estar pendiente a ello; y por otro lado, la importancia de trabajar con más de tres objetos de referencia entre escaneos consecutivos.

Hasta aquí, se mencionaron elementos a considerar al momento de determinar la ubicación de los objetos de referencia, cuando se los utiliza sólo con el propósito de conseguir la integración de todos los escaneos, adoptando como sistema de referencia uno de los *sistemas internos* de uno de los escaneos (a dicho escaneo se lo denomina de referencia). Sin embargo, los objetivos a su vez sirven para referenciar los datos en un *sistema externo*, que puede ser un sistema local o un sistema global. Para ello, es necesario determinar las coordenadas de los objetivos en el marco de referencia que se desee, a partir de mediciones GNSS o técnicas clásicas topográficas. En el caso de las esferas, se determinan las coordenadas del punto central; para los tableros cuadrículados, se determinan las coordenadas del punto central de los cuatro cuadrantes.

De esta manera, la referenciación en un sistema externo se convierte en otro condicionante a la hora de ubicar los objetos de referencia. Si la misma se pretende lograr mediante mediciones GNSS, entonces los objetivos deberán posicionarse en lugares que posean las condiciones necesarias para poder realizarlas (libres de obstrucciones). En el caso de las esferas, si se realizan mediciones con estación total, las mismas deberán ubicarse en sitios donde luego se pueda colocar de manera exacta el mini-prisma (lugares planos) que permite determinar las coordenadas del punto central. (**Figura 3-15**).

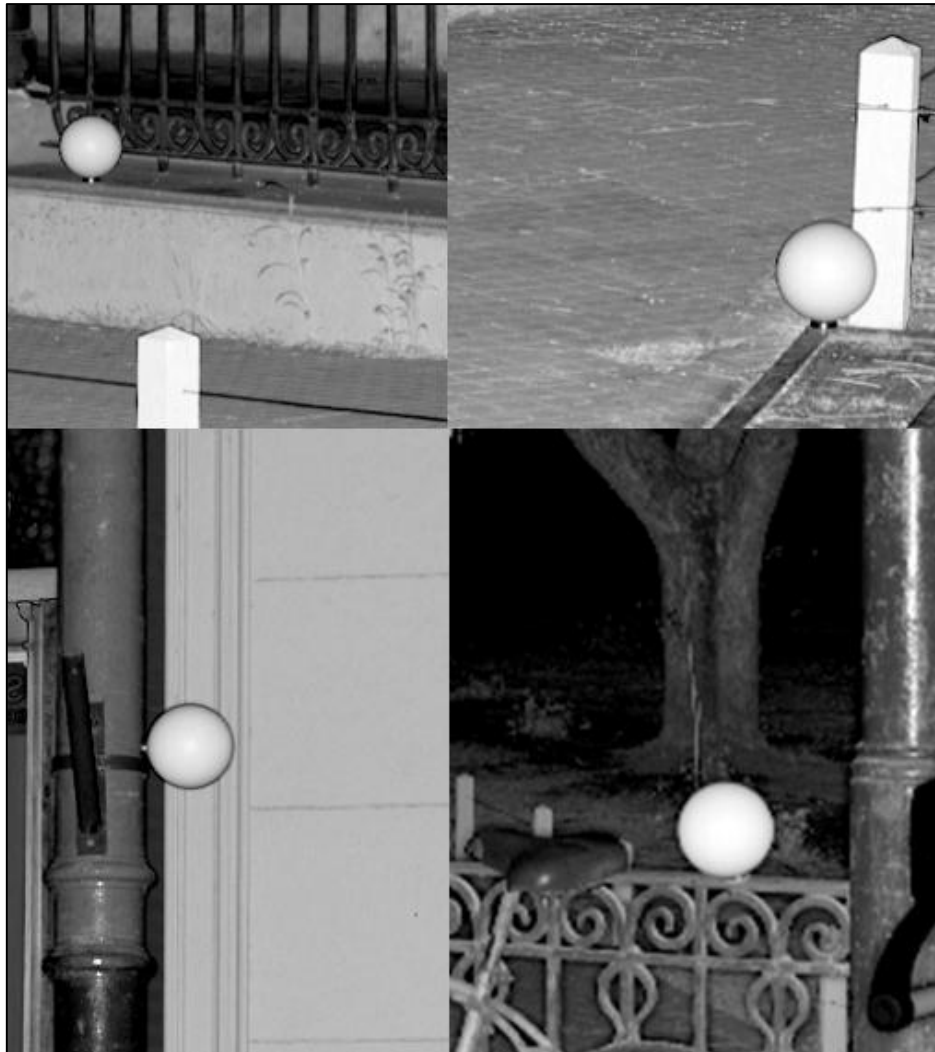


Figura 3-15 Las dos imágenes de arriba corresponden a esferas que poseen una ubicación apropiada para referenciar mediante mediciones con estación total, mientras que las de abajo NO tienen una ubicación apta para colocar el mini-prisma ya que se encuentran aferradas mediante su base imantada a superficies metálicas curvas.

En los relevamientos realizados, se utilizaron los dos tipos de referencias artificiales disponibles: esferas y tableros cuadrículados. La elección de la distribución de los mismos se basó en: \*asegurar que entre escaneos consecutivos existan como mínimo tres objetos de referencia en común; \*garantizar que algunos de ellos tengan posiciones adecuadas para ser medidos con estación total; \* respetar los principios básicos enunciados anteriormente.

Seguidamente se exponen croquis que muestran la distribución de los objetos de referencia artificiales, y a su vez, se distinguen los objetos que fueron georreferenciados. (**Figura 3-16** y **Figura 3-17**).

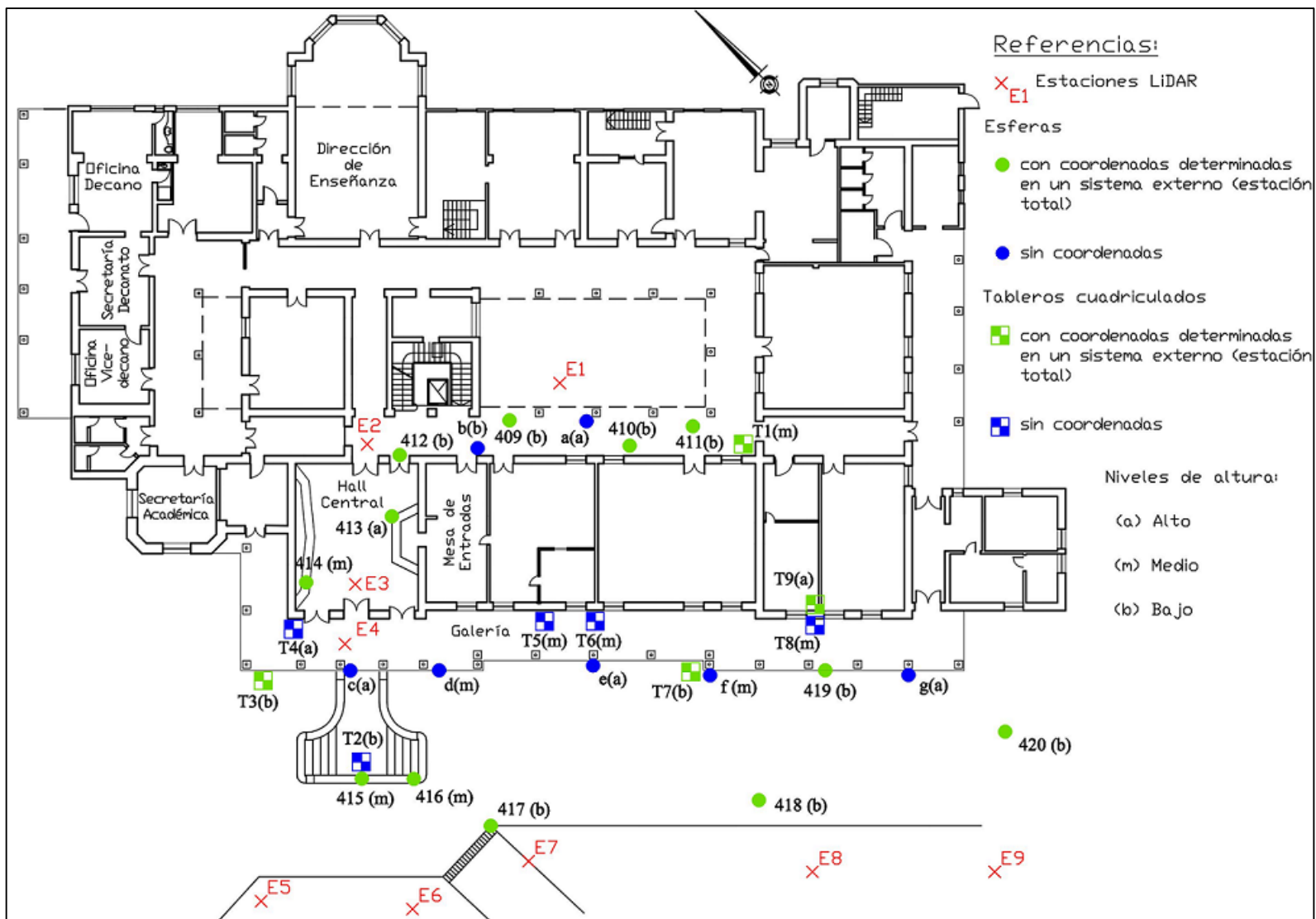


Figura 3-16: Distribución de los objetos de referencia artificiales durante el relevamiento LiDAR del Edificio Central.

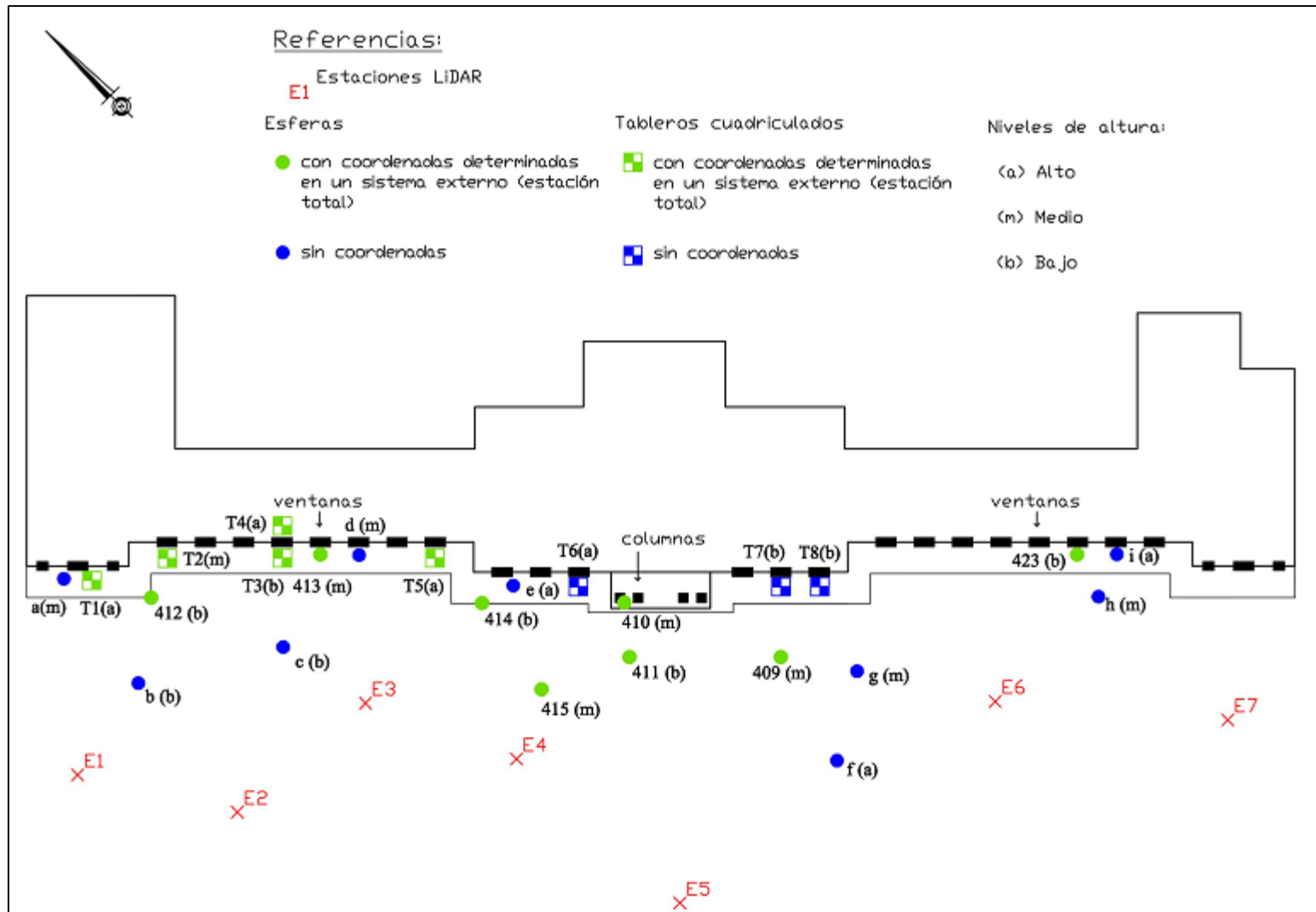


Figura 3-17: Distribución de los objetos de referencia artificiales durante el relevamiento LiDAR del Colegio Nacional.

Como se mencionó anteriormente, debido a que la zona en que se desarrolla el trabajo se encuentra cubierta con vegetación alta, la referenciación se consiguió mediante mediciones con Estación Total. Para ello, se estacionó la misma sobre los puntos de la poligonal ubicados frente a los edificios (PF4, PF9 y PF10) y desde allí se bisectaron los objetivos que se posicionaron con la finalidad de lograr la georreferenciación. Para tener un control y que la determinación de coordenadas de las referencias no sea una radiación, se realizó estación libre y nuevamente se determinaron las coordenadas de los mismos objetivos. De este control, resultó discrepancia milimétrica, con la excepción de algunos de los tableros cuadrículados colocados en el Edificio Central. Esto se debe a que los mismos se fijaron a la pared mediante cinta de papel (para no arruinar la pintura) y con el correr del tiempo se comenzaron a despegar y a desplazar.

La referenciación de los tableros cuadrículares se logró simplemente bisectando el punto de intersección de los cuatro cuadrantes. Para el caso de las esferas, se utilizó el mini-prisma que posee la misma base y el tamaño del radio de las mismas. Para asegurar que el prisma se ubique exactamente en la posición que ocupó la esfera, se colocaron previamente *stickers* que poseen la forma de la base de ambos elementos. (Ver **Figura 3-18**).



Figura 3-18 . Izquierda: fotografía del modelo de *stiker* utilizado que marca la posición de una esfera. Derecha: fotografía del mini-prisma ubicado sobre el *stiker* para conseguir las coordenadas del punto central de la esfera que ocupó ese lugar.

A partir de pruebas realizadas de manera previa al trabajo (fase de investigación) se determinó que la versión que se dispone del software de procesamiento presenta varias debilidades en la referenciación en un sistema externo de objetivos de referencia naturales. Por ello, sólo se midieron objetivos de referencia artificiales.

Si bien en gabinete se dispone de una nube de puntos 3D y de fotos de toda la zona tal cual estaba al momento de la observación (incluyendo los objetos de referencia), se recomienda que durante el trabajo de campo se generen croquis en los cuales queden plasmados los distintos objetivos referenciados con un código y el tipo de medición que fue efectuada. En el Anexo III, se adjunta un modelo de planilla que fue diseñado con este objetivo. Su utilización ha redundado en un sensible ahorro de tiempo del trabajo en gabinete y en el reaseguro de los objetos identificados.

### **3.2.5. Parámetros a configurar en cada escaneo**

Previo a cada escaneo se deben configurar una serie de parámetros que le indican al escáner de qué forma y qué datos debe registrar. En el LiDAR Trimble TX5 existen dos maneras de establecerlos: seleccionarlos en forma manual o elegir un perfil de escaneo, que es un conjunto predefinido de parámetros.

A continuación se describen los principales parámetros de ajuste:

- *Resolución:* hace referencia a la cantidad de planos verticales que se registran, por lo tanto este parámetro determina la cantidad de puntos de escaneo resultante. Los posibles valores a seleccionar son: 1/1; 1/2; 1/4; 1/8; 1/10; 1/16; 1/20; 1/32. Si se selecciona una resolución de 1/2 significa que de cada dos planos verticales, el escáner registrará sólo uno. A mayor resolución, mayor tiempo de escaneo.  
La elección de este parámetro depende del tipo de producto que se pretenda lograr, de las irregularidades de la superficie y de la distancia a la cual se encuentre la superficie a relevar. Por ejemplo, si se solicita el relevamiento de un edificio histórico con el objetivo de crear una base de datos para que el día de mañana se construya una réplica o para que se pueda restaurarlo sin introducir modificaciones y generar una copia idéntica al original, probablemente la resolución será la completa, es decir 1/1, ya que se requiere del máximo nivel de detalle. En cambio, si se pretende determinar el volumen de una montaña de tierra de una fábrica de ladrillos, con una resolución de 1/4 seguramente sea más que suficiente.
- *Calidad:* cuántas veces mide el escáner cada plano vertical. Se puede seleccionar una calidad de hasta 8X, es decir, 8 pasadas por plano. A mayor calidad, menor ruido de los datos de escaneo pero mayor tiempo de escaneo. El hecho de que el escáner realice más de una pasada por plano, sirve para detectar anomalías. Por ejemplo, si se realiza un escaneo con una calidad de “4X” y en una de las pasadas se cruza una



persona, luego el escáner descartará dicha medición ya que posee otras tres con diferente valor.

- *Rango de escaneo horizontal y vertical:* es posible limitar el área vertical y horizontal de escaneo con el propósito de relevar sólo lo necesario ahorrando tiempo de trabajo y memoria en el dispositivo de almacenamiento.
- *Sensores:* se puede habilitar o inhabilitar el uso de los sensores incorporados en el escáner para que los datos recolectados por los mismos sean utilizados automáticamente en el proceso posterior de registro de escaneo.
  - *Compensador de doble eje (clinómetro):* los datos de este sensor se utilizan para nivelar en forma automática los datos de escaneo capturados. La inclinación del escaneo se mide en forma electrónica y se guarda en cada escaneo.
  - *Brújula electrónica:* mide la orientación del escáner en la superficie terrestre.
  - *Altímetro:* este sensor de altura barométrica determina la altitud de la posición actual del escáner. Dicha determinación de altitud está basada en la medición de la presión atmosférica.

Antes de comenzar el relevamiento, es posible elegir una posición y asociarle una determinada altura para que la misma se considere como referencia. Todas las mediciones posteriores del altímetro se realizarán teniendo como base esta altura de referencia. Para el registro de escaneos, basta con conocer la diferencia de altitud de las diversas posiciones del escáner.
- *Filtros:* se puede habilitar o inhabilitar el uso de filtros mientras se realiza el escaneo.
  - *Contorno nítido:* este filtro elimina los puntos de escaneo que se originan al tocar dos objetos con un impacto de láser, lo cual ocurre principalmente en el borde de los objetos.
  - *Cielo nítido:* este filtro elimina los puntos de escaneo que se originan al no tocar ningún objeto; esto sucede principalmente cuando se escanea el cielo.
- *Escaneo con color:* es posible activar o desactivar el registro de escaneos con color. Si se realiza el relevamiento con esta opción habilitada, los escaneos contendrán imágenes digitales que el escáner capturará en forma automática durante la toma de datos.

La configuración del escáner se puede realizar a través de una interfaz de pantalla táctil. A su vez, tiene la opción de control remoto WLAN que permite iniciar, detener, ver o descargar escaneos a distancia.

Para los relevamientos de los edificios se trabajó con los sensores, los filtros y la opción de color. En cuanto a los valores seleccionados de resolución, es necesario recordar que el objetivo particular planteado para el escaneo fue lograr la obtención de un modelo 3D, debidamente georreferenciado, de alta calidad geométrica (1 a 3 cm) y resolución (cientos de puntos/m<sup>2</sup>). Partiendo de ello, para los escaneos en el interior del Edificio Central se estableció una resolución 1/4; mientras que para los de las fachadas se seleccionó una resolución de 1/2 ya que se trata de edificios de gran altura y a medida que el blanco se encuentra a una mayor distancia del escáner la cantidad de puntos por unidad de superficie disminuye. Se trabajó con una calidad de “3X” ya que para el tipo de relevamiento y en las condiciones que se hizo el mismo se asume que tres pasadas por planos, son suficientes para detectar anomalías.

En el Anexo III se adjuntan las planillas de relevamiento LiDAR en las cuales se encuentran plasmados los parámetros seleccionados para cada escaneo.

### **3.3. Procesamiento de datos LiDAR**

#### **3.3.1. Software**

Para procesar los datos LiDAR se utilizó el software propietario SCENE que fue adquirido junto con el escáner. Fue especialmente diseñado para ver, administrar y trabajar con extensos datos de escaneos en 3D realizados con escáneres láser de alta resolución. Posee diversas herramientas y funciones como, visualización en 3D, filtros, reconocimiento automático de objetos, registro de escaneos y posicionamiento, colorización automática de escaneos, mediciones, exportación de las nubes de puntos en diferentes formatos, entre otras.

Por otro lado, también se utilizó el software propietario Real Works, principalmente para la exploración de los datos ya que, a partir del estudio del mismo se determinó que se trata de un software diseñado para un procesamiento posterior que permite obtener productos más elaborados.

#### **Escaneos**

El escáner láser Trimble TX5 almacena los escaneos en una tarjeta SD extraíble. Para cada escaneo genera varios archivos y los coloca en una carpeta con el nombre del escaneo

especificado. Durante el proceso de importación, SCENE combina todos los archivos de esta carpeta en un archivo de escaneo \*.fls.

Estos archivos de extensión \*.fls son los archivos de escaneo tal cual los registra el escáner. Contienen millones de registros de datos que incluyen:

- coordenadas de cada punto en un sistema de referencia local que tiene como origen la posición del escáner;
- valor de intensidad (reflectancia);
- imágenes capturadas con la cámara fotográfica del escáner, si el escaneo se registró con color;
- datos de los sensores utilizados durante el escaneo;
- información acerca de la configuración utilizada para realizar el escaneo.

En cuanto al tamaño de los archivos, a modo de ejemplo, un escaneo que se realizó con una resolución 1/4, calidad 3X y un rango de escaneo total (horizontal: 360°; vertical: -60° a 90°) ocupa aproximadamente 180 MB. Por otro lado, el tiempo que demanda un escaneo de tales características es de aproximadamente 7 minutos.

### **3.3.2. Gestión/Edición inicial de los datos**

Al cargar los escaneos por primera vez, SCENE ofrece la posibilidad de aplicar un conjunto de filtros predeterminados: filtro para puntos de escaneo oscuros y filtro para puntos de escaneo dispersos. Es recomendable la aplicación de los mismos, ya que con el primero se eliminan los puntos que poseen un valor bajo de intensidad debido a que con ellos sólo ingresa una pequeña cantidad de luz al escáner, por consiguiente, es altamente probable que introduzcan ruido; con el segundo se eliminan los puntos de escaneo que se originan al incidir sobre dos objetos con un impacto de láser o sin reflejar en ninguno, por ejemplo el cielo.

Como se trabajó con los sensores internos habilitados, al importar los datos el software automáticamente lee la información registrada por los mismos y la utiliza para lograr una alineación inicial. Esta alineación inicial es simplemente una ubicación aproximada de los escaneos. Para conseguir una buena integración es necesario aplicar alguna técnica de registro. Por ejemplo, si se relevó un edificio que tiene planta baja y planta alta, gracias a los datos del altímetro al importarlos el software reconoce que un escaneo se encuentra más alto respecto del otro.

En la **Figura 3-19** y en la **Figura 3-20** se muestran capturas de pantalla una vez cargados todos los datos, que reflejan que si bien los mismos poseen una alineación aproximada se debe realizar el registro para lograr una nube integrada.

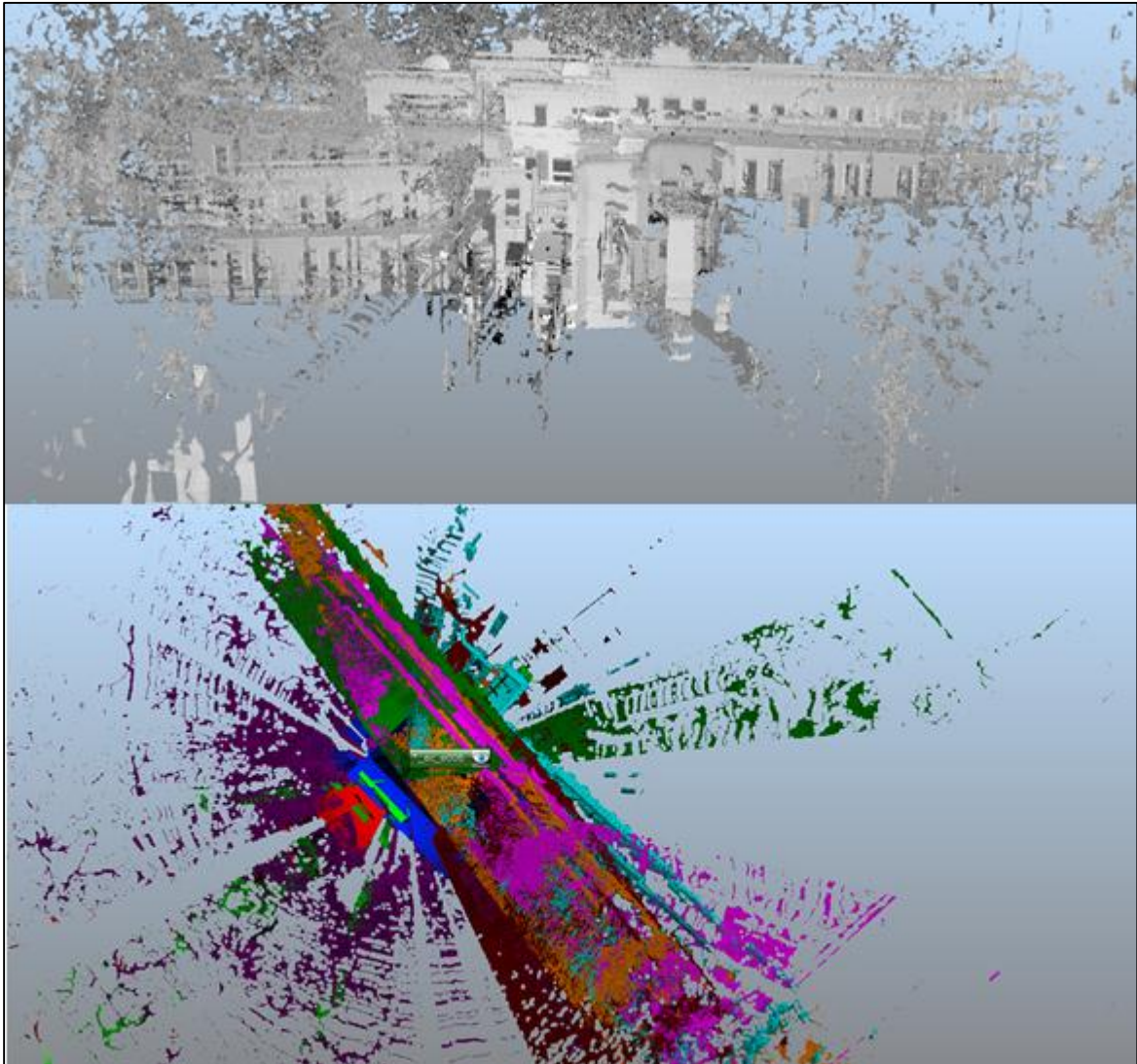


Figura 3-19. Imagen superior: Vista en corte de todos los escaneos realizados en el Edificio Central. Imagen inferior: Vista en planta de todos los escaneos realizados en el Edificio Central, donde cada uno de ellos tiene asociado un color diferente.

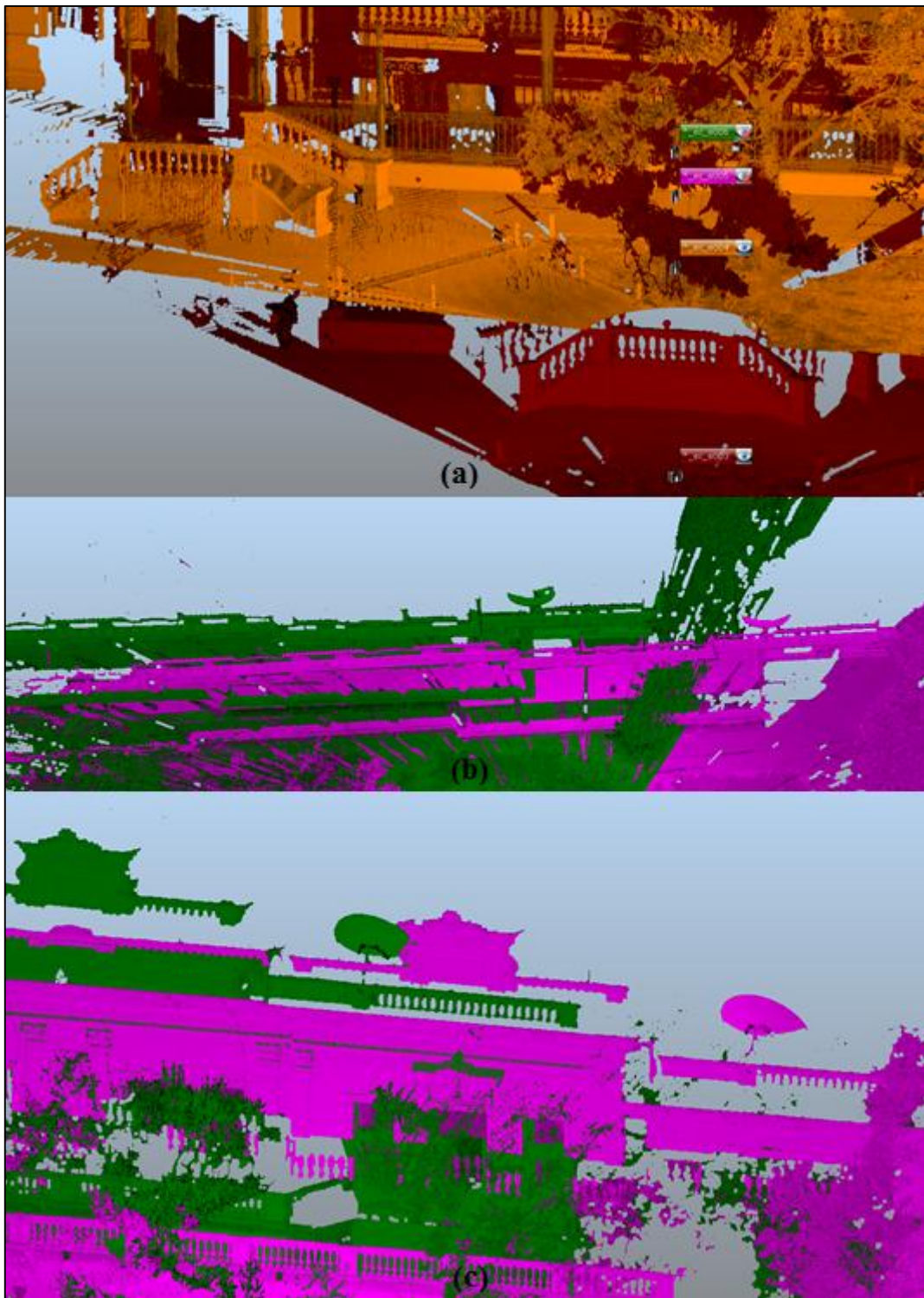


Figura 3-20: se muestran capturas de pantalla estando visibles sólo dos escaneos (cada uno con un color distinto) donde se aprecia mejor la alineación aproximada. (a): Escaneos correspondientes a las estaciones E8 y E9 del relevamiento del Edificio Central. (b) y (c): Escaneos correspondientes a las estaciones E6 y E7 del relevamiento del Edificio Central. Vista planta y vista corte respectivamente.

Una vez cargados los datos, se exploraron los mismos para verificar a primera vista cómo resultaron y si todo el área a relevar y los objetos de referencia habían sido capturados. Lo ideal, sería realizar este paso en campo ya que en caso de identificar algún escaneo con error se podría relevar nuevamente. Para ello es necesario contar con una computadora portátil que posea una serie de requerimientos mínimos para poder gestionar grandes volúmenes de datos.

Al explorar los datos se observaron dos cuestiones importantes a analizar:

- 1) En los escaneos realizados en el interior del Edificio Central, se identificaron zonas sin información en forma de circunferencia (**Figura 3-21**). Recordando que en dichos escaneos se utilizó el rango horizontal y vertical máximo y que según muestra la **Figura 3-13** se realizó una estación por habitación, ese círculo sin información es el que se genera alrededor de la posición de estación del escáner debido al campo de visión que posee el mismo.

La elección de la cantidad de estaciones y de los rangos establecidos se hizo adrede con el propósito de mostrar el fenómeno. En relevamientos donde se necesita una cobertura total (escaneos de plantas industriales por ejemplo), esta situación debe ser debidamente considerada.

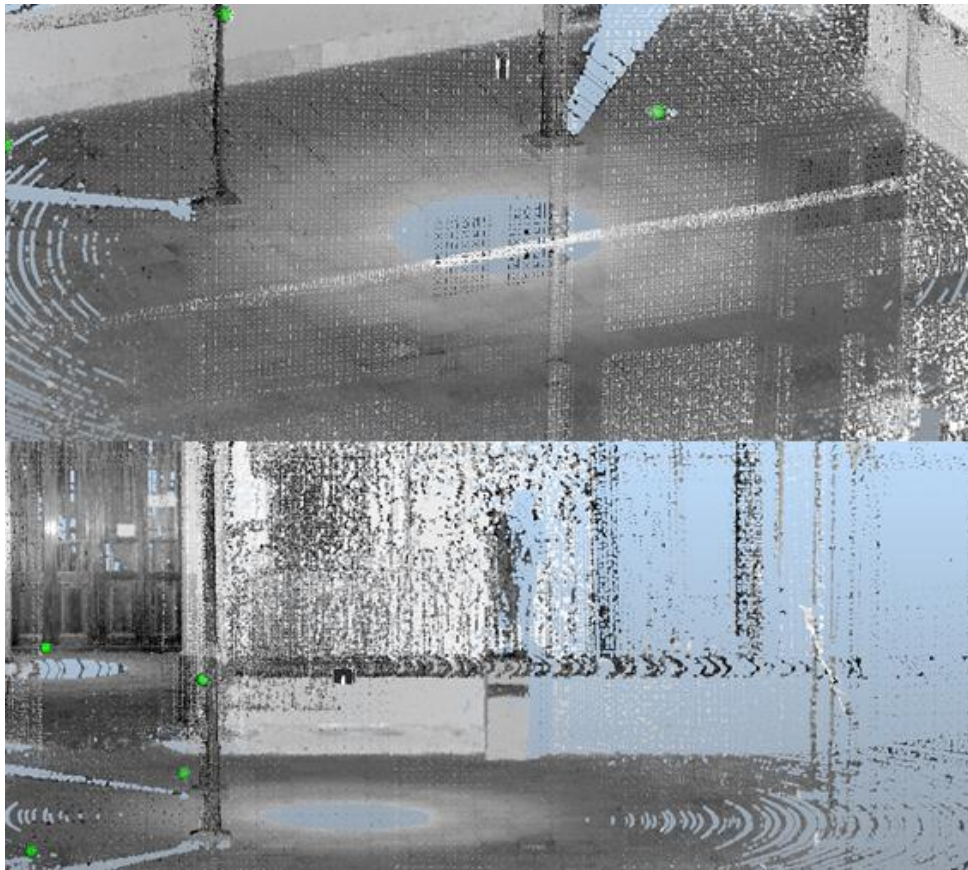


Figura 3-21: Tanto la imagen superior como la imagen inferior, corresponden a capturas de pantallas tomadas desde diferentes puntos de vista de la nube de puntos resultante del escaneo realizado desde E1 en el Edificio Central de la Facultad de Ingeniería.

- 2) Tanto en los escaneos del Edificio Central como en los del Colegio Nacional, se distinguen zonas sin información.

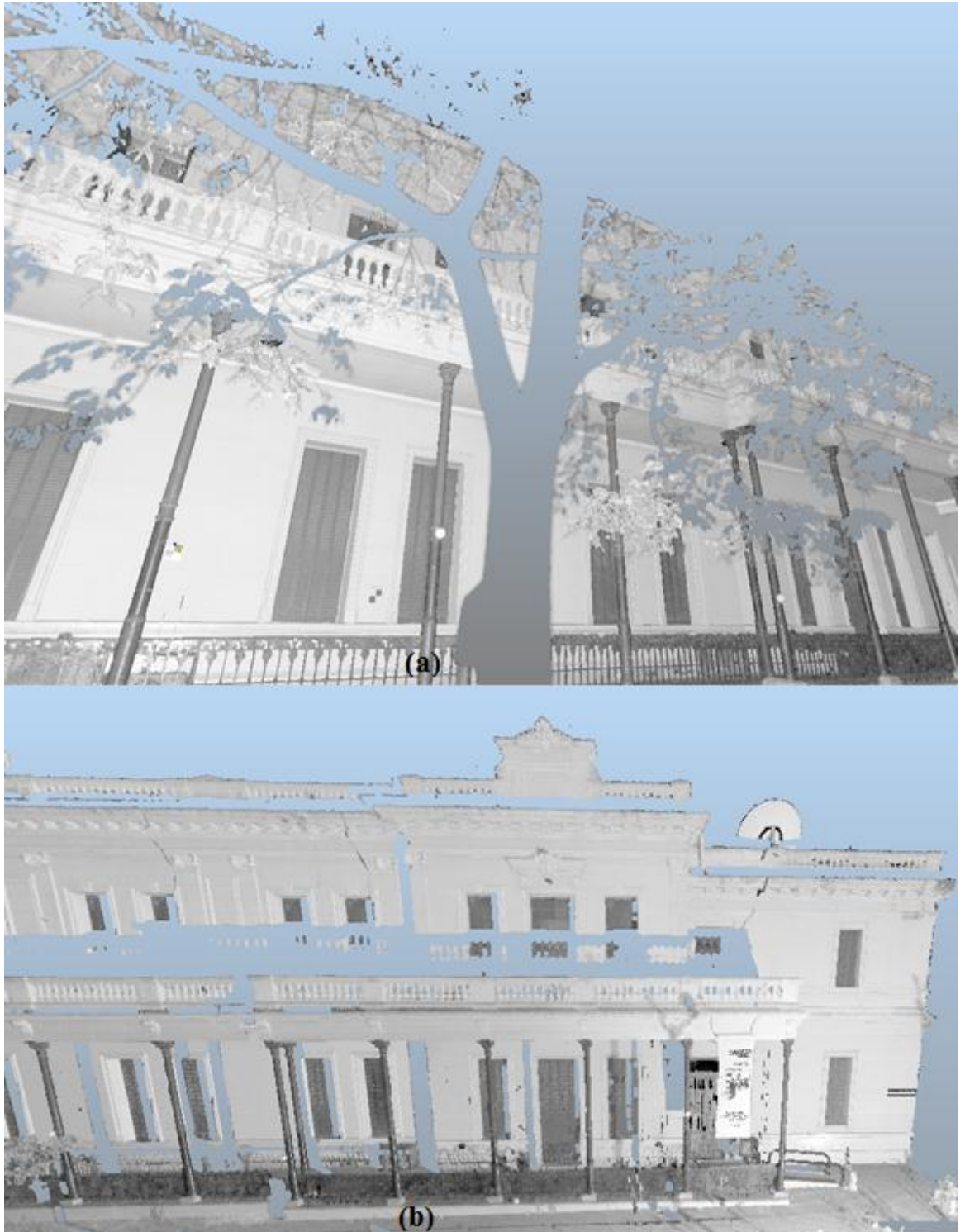


Figura 3-22: Nube de puntos en las cual se identifican zonas sin información.

Estas zonas son producto de lo que se conoce como “sombras LiDAR”. En la **Figura 3-23** se muestra dicho fenómeno.

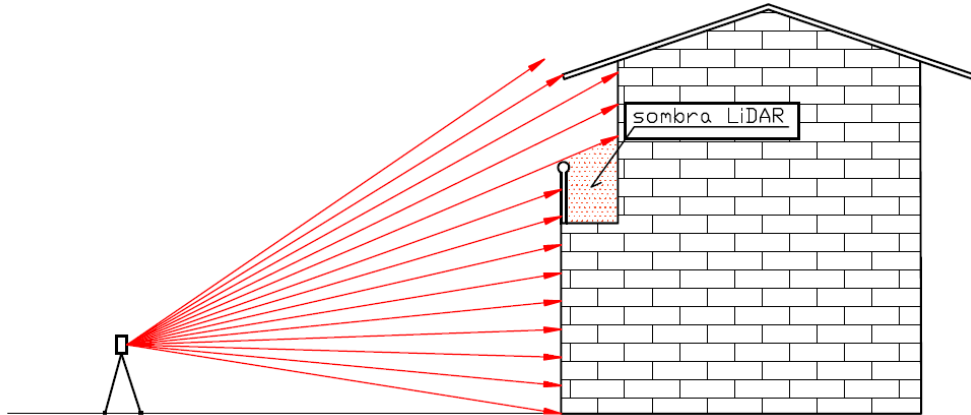


Figura 3-23: Zonas de sombra en el registro LiDAR.

Como se observa, la sombra LiDAR se produce cuando una superficie se interpone entre el rayo láser y el blanco a relevar, es decir donde el sensor no ha llegado a medir puntos. No se debe confundir este concepto con la sombra producida por cualquier objeto debido a la luz, de hecho, el LiDAR tiene la capacidad de medir objetos en sombra teniendo como única limitación la aplicación de color RGB a dichos puntos.

Por este motivo, es tan importante realizar un reconocimiento previo de la zona de trabajo para determinar, en función del objetivo (nivel de detalle y precisión) del relevamiento, si la superficie requiere varios estacionamientos para un registro completo, teniendo en cuenta las posibles ocultaciones o sombras que otros elementos próximos puedan provocar.

En el caso de la **Figura 3-22 (a)** se muestra una sombra LiDAR producida por un árbol, mientras que en la **Figura 3-22 (b)** la sombra es producida por las columnas y barandas del balcón de la planta primer piso.

En el caso del presente trabajo, si se necesitara un relevamiento completo con gran nivel de detalle de toda la fachada de los edificios, sería necesario el empleo de estructuras en forma de andamio que garanticen una cobertura completa.

Antes de comenzar con el proceso de registro en el cual es necesario identificar los objetos de referencia, se realizó una limpieza en forma manual sobre cada uno de los escaneos eliminando mediante la herramienta de selección de polígonos información sobre la zona aledaña de los edificios. De esta manera, se facilita el posterior proceso de registro, conservando sólo los datos que son de interés (**Figura 3-24** y **Figura 3-25**).



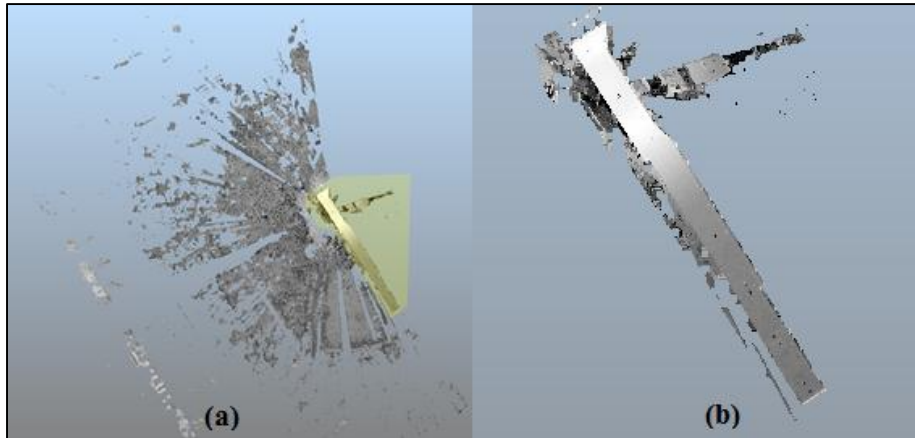


Figura 3-24: nube de puntos resultante de la estación E4. (a): Vista en planta de la nube de puntos con el polígono que limita la información que interesa conservar. (b): Vista en planta de la nube de puntos luego de eliminar los puntos que se encuentran afuera del polígono.

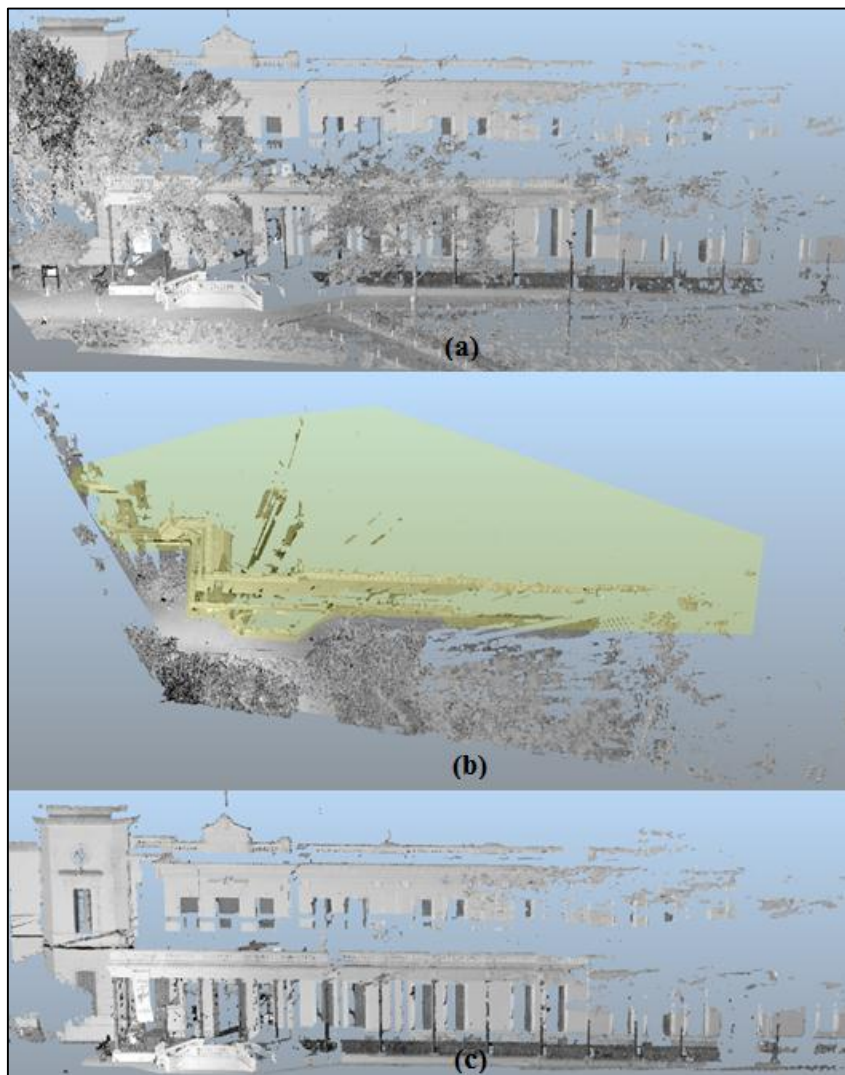


Figura 3-25: nube de puntos resultante de la estación E5. (a): Vista en corte de la nube de puntos original. (b): Vista en planta de la nube de puntos con el polígono que limita la información que

interesa conservar. (c): Vista en corte de la nube de puntos luego de eliminar los puntos que se encuentran afuera del polígono.

### **3.3.3. Registro**

El registro de escaneos incluye básicamente transformaciones de Similitud o de Helmert entre sistemas de referencia cartesianos en 3D. Como para pasar de un sistema a otro es necesario determinar 7 parámetros: 3 de traslación, 3 de rotación y 1 de escala, se concluye que al menos se deben conocer las coordenadas de 3 puntos en los dos sistemas de referencia. No obstante, en este caso el factor de escala carece de sentido. Pues se trata del mismo instrumento, trabajando en las mismas condiciones y en forma consecutiva.

*Sistema general adoptado: sistema interno (escaneo de referencia)*

En principio se realizó el registro adoptando como referencia el sistema interno de uno de los escaneos. Para el relevamiento del Edificio central se adoptó como escaneo de referencia el correspondiente a la estación E6, mientras que para el Colegio Nacional se adoptó el de la estación E3. En este caso, la elección de los mismos fue determinada automáticamente por el software ya que previamente no se estableció ninguno en forma manual.

La finalidad de este tipo de registro es la determinación de la calidad y consistencia geométrica de la nube de puntos LiDAR, ya que se está trabajando únicamente con información aportada por el escáner, sin integrar mediciones realizadas con otros instrumentos.

El proceso de registro consistió en identificar en cada uno de los escaneos los objetos de referencia asignándole a cada uno un nombre. El criterio utilizado para nombrar fue el siguiente:

- Para los tableros cuadrículados, se utilizó la letra “T” en mayúscula seguida de un número: T1, T2, T3,...
- Para las esferas se realizó una distinción entre: las que poseían coordenadas de su punto central determinadas mediante mediciones con estación total, para lograr referenciar la nube en el sistema externo elegido (GK-POSGAR 07 en planimetría, IGN en altimetría) y las que tenían como único propósito conseguir una nube de puntos integrada en uno de los sistemas internos. Para las primeras se utilizó el número que tenía el *stiker* colocado en la base, mientras que para las segundas se utilizaron letras minúsculas: “a”, “b”, “c”.

Para identificar los objetivos en forma manual, el software ofrece una vista de correspondencia dividida. En esta vista, la pantalla se divide en dos ventanas con el objetivo de cargar en la izquierda un escaneo y en la derecha el escaneo consecutivo. De esta manera, se van reconociendo los objetos de referencia correspondientes.



Figura 3-26: (a): Vista de correspondencia dividida con los escaneos de las estaciones E1 y E2 del relevamiento del Colegio Nacional. (b): Identificación de esferas correspondientes. (c): Identificación de tableros cuadrículados correspondientes. (d): Vista de correspondencia dividida con los escaneos de las estaciones E1 y E2 del relevamiento del Colegio Nacional con todos los objetos de referencia asimilables identificados.

Una vez identificados los objetos de referencia, lo que hace el software es calcular los parámetros de registración (rotación, traslación y escala) para cada uno de los escaneos a partir los puntos correspondientes entre escaneos, ya que se conocen las coordenadas de dichos puntos en los dos sistemas de referencia: origen y final. Luego, aplica los respectivos parámetros y obtiene una nube de puntos integrada.

*Sistema general adoptado: sistema externo (POSGAR07; IGN)*

En segunda instancia, se llevó a cabo el registro estableciendo como sistema de referencia POSGAR 07. Para la planimetría se utilizó proyección Gauss-Krüger, y la altimetría se expresó en el marco vertical definido por la red altimétrica del IGN.

El relevamiento LiDAR realizado con el TX5 corresponde muy aproximadamente a un sistema topocéntrico orientado según el horizonte astronómico. Luego, las alturas resultantes de una secuencia amplia de mediciones realizadas desde sucesivas estaciones, estarán afectadas por el campo de la gravedad terrestre. Tener en cuenta que el alcance del sensor es del orden de 100 m.

Por eso, para los controles altimétricos se trabajó con alturas referidas al marco de referencia vertical del IGN, asignadas a los diferentes puntos a partir de nivelación geométrica.

Por el contrario, cuando se trabaja sobre plataformas móviles terrestres o aéreas, el posicionamiento es definido en todos los casos con GNSS. Entonces, la geometría 3D queda definida a partir del marco de referencia geodésico asociado a GNSS (por ej. POSGAR07) Consecuencia de ello, las coordenadas de cada punto serán, la latitud, la longitud y la altura geodésica. Si la última componente desea ser expresada como una altura física referida al geoide, será necesario aplicar un modelo de transformación de alturas ó más precisamente, un modelo de geoide.

Con este registro se pasa de un sistema de referencia topocéntrico arbitrario (Normal según la vertical del lugar –nivelado- y orientación arbitraria) a un sistema de referencia geocéntrico (POSGAR07). Para lograr ello, además de realizar la identificación de los mismos objetivos correspondientes que se utilizaron para el registro con sistema interno, se importó un archivo de extensión \*csv con las coordenadas determinadas en dichos sistemas (POSGAR07; IGN) de los puntos de ajuste seleccionados (algunos de los objetos de referencia). El resto de los objetivos artificiales a los cuales se les dieron coordenadas, se reservaron para realizar la validación externa de la nube de puntos integrada.

Para la nube correspondiente al Edificio Central, se realizaron tres registros con sistema externo, variando la cantidad de puntos de ajuste, y la distribución de los mismos. El propósito fue analizar el comportamiento de los resultados en función de las diferentes configuraciones utilizadas. (**Tabla 3-5**).

Registro	Puntos de ajuste utilizados	Cantidad
1	T1, 410, 415, 417, T7, 419,420	7
2	418,419,420	3
3	411,415,420	3

Tabla 3-5: Registros con sistema externo realizados para el Relevamiento del Edificio Central.

Para el registro con sistema externo de la nube del Colegio Nacional, se utilizaron los siguientes objetos de referencia artificiales con coordenadas (puntos de ajuste): 412, 415, 410, 411, 409 y 423.

### **3.3.4. Escaneos con color**

Además de la información geométrica, un escaneo contiene información de reflectancia e, incluso, información de color de los puntos de escaneo individuales.

En el caso del escáner láser Trimble TX5, gracias a que posee una cámara integrada, si se registró un escaneo con la opción de color habilitada, este también contendrá las imágenes digitales que el escáner tomó en forma automática durante el levantamiento. Luego, a posteriori de la medición, es posible agregar información de color a cada punto del escaneo.

Si por algún motivo durante el escaneo, el escáner no pudo tomar las fotos, por ejemplo, el relevamiento se realizó de noche, aún es posible agregar información de color mediante la toma de imágenes digitales del entorno escaneado. No obstante, para ello se deben cumplir ciertos requisitos:

- La imagen digital debe estar libre de distorsiones causadas por la lente.
- Es necesario conocer la posición, la orientación y el factor de zoom de la cámara o que estos parámetros sean computables.

Gracias a que en los relevamientos realizados se trabajó con dicha opción habilitada, luego de lograr las nubes de puntos integradas, las mismas fueron coloreadas consiguiendo un modelo con textura que representa la realidad de manera más fiel.

### **3.3.5. Producto**

El producto obtenido como resultado de este trabajo incluye dos modelos digitales 3D georreferenciados y texturizados de alta resolución (densidad mínima: 10.000 puntos/m<sup>2</sup>), y calidad geométrica. Uno corresponde a la fachada de rumbo SO del Edificio Central de la Facultad de Ingeniería (**Figura 3-27, Figura 3-28, Figura 3-29, Figura 3-30 y Figura 3-31**) y parte de su interior; el otro, a la fachada de rumbo SO del Colegio Nacional (**Figura 3-32; Figura 3-33; Figura 3-34 y Figura 3-35**).

Dichos modelos se disponen en diversos formatos: E57, VRML, DXF, XYZ de texto, XYZ binario, IGES, PTS, PTX y POD (Pointtools).



Figura 3-27: Modelo Digital 3D georreferenciado y texturizado de la fachada de rumbo SO del Edificio Central de la Facultad de Ingeniería.



Figura 3-28: Modelo Digital 3D georreferenciado y texturizado de la fachada de rumbo SO del Edificio Central de la Facultad de Ingeniería desde otro punto de vista.

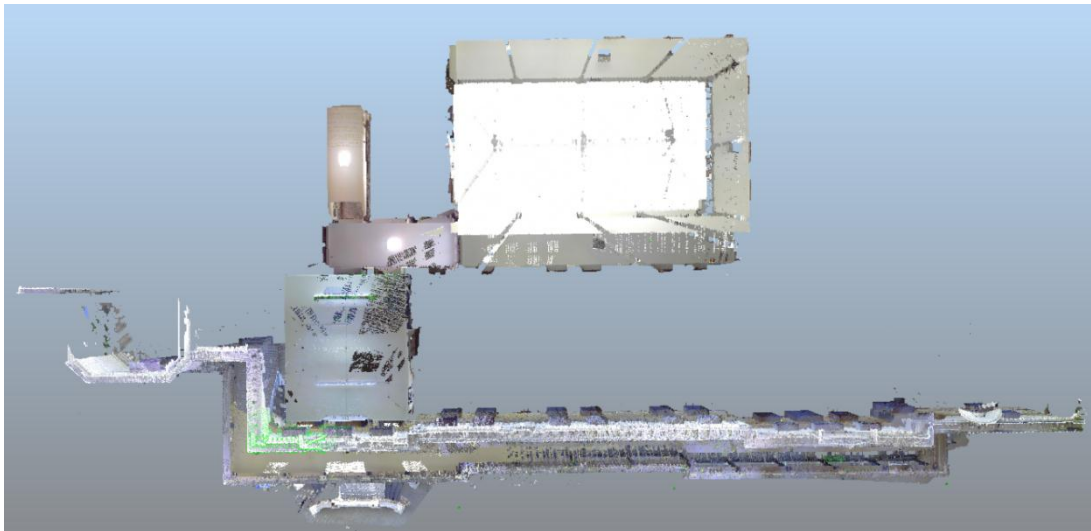


Figura 3-29: Modelo Digital 3D georreferenciado y texturizado de la fachada de rumbo SO y parte del interior del Edificio Central de la Facultad de Ingeniería. Vista planta.



Figura 3-30: Zoom de la zona de la galería de la nube de puntos resultante de la fachada de rumbo SO del Edificio Central de la Facultad de Ingeniería.



Figura 3-31: Zoom de la zona del patio central de la nube de puntos resultante de la fachada de rumbo SO y parte del interior del Edificio Central de la Facultad de Ingeniería.



Figura 3-32: Modelo Digital 3D georreferenciado y texturizado de la fachada de rumbo SO del Colegio Nacional.





Figura 3-33: Zoom de la zona superior-central de la nube de puntos resultante de la fachada de rumbo SO del Colegio Nacional.



Figura 3-34: Zoom de la zona superior-derecha de la nube de puntos resultante de la fachada de rumbo SO del Colegio Nacional.

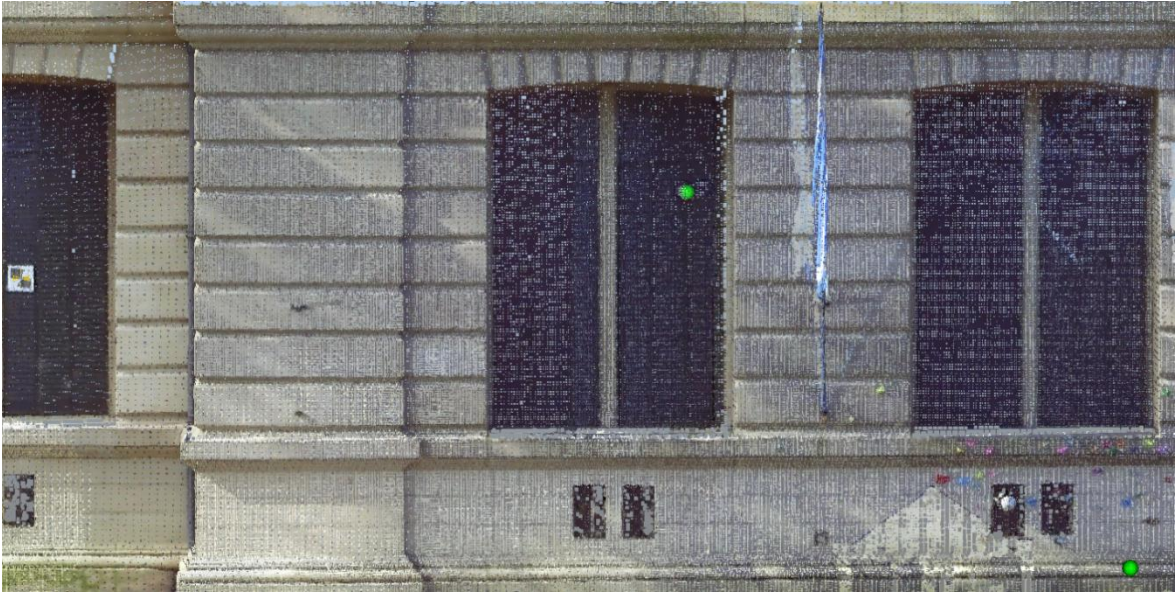


Figura 3-35: Zoom de la zona inferior-central-izquierda de la nube de puntos resultante de la fachada de rumbo SO del Colegio Nacional.

### **3.3.6. Análisis de los resultados del registro**

Para evaluar las nubes de puntos se realizaron dos tipos de análisis:

- 1) *Evaluación interna.* Finalizado el registro, el software muestra diferentes parámetros estadísticos que indican la calidad con que se empataron los escaneos. No obstante, es necesario tener en claro que dichos parámetros muestran la desviación de un objeto comparado con los objetos de los escaneos circundantes. No hay en cambio, una estimación de cómo se transmite ese indicador en el conjunto. En relevamientos lineales, en donde se construye una cadena de escaneos, la imprecisión total puede ser mucho mayor que la indicada por los parámetros estadísticos del software.
- 2) *Evaluación externa* mediante:
  - a. un conjunto de puntos de control externos de coordenadas obtenidas con métodos independientes de LiDAR., que permiten evaluar la exactitud (accuracy) de los modelos 3D obtenidos. Estos puntos son los objetos de referencia artificiales.
  - b. medidas lineales tomadas con distanciómetro de mano, que posibilitan un control relativo. En el Anexo III se muestran croquis en los que se observan las medidas lineales tomadas.

*Registro con sistema de referencia general interno (escaneo de referencia)*

Con el registro de escaneos realizado, el software expone una tabla en la que se pueden ver los pares de referencia que se utilizaron para empatar los escaneos, ordenados por su tensión. El valor “tensión” describe la discrepancia en distancia, en el sistema de referencia adoptado (general), entre la posición de dos objetos de referencia correspondientes en el Escaneo 1 y el Escaneo 2. A partir de estos valores es posible identificar los pares de referencia que están causando problemas en el registro. Luego, si entre escaneos consecutivos existen más de tres objetos de referencia se pueden eliminar los que están generando inconvenientes y mejorar el resultado del registro.

Para el caso del relevamiento del Edificio Central, se eliminaron los tableros cuadrículados T4 y T6 de todos los escaneos, y la esfera “e” de los escaneos correspondientes a las estaciones E6 y E9. Los valores de tensión altos sobre los objetos mencionados se atribuyen a: para los tableros, una ligera modificación en su posición durante el levantamiento por una mala fijación; en el caso de la esfera, la misma fue eliminada de los escaneos correspondientes a las estaciones más lejanas, por lo tanto su valor de tensión alto se debe a una peor definición del punto central ocasionada por tener escasa cantidad de puntos de escaneo sobre su superficie.

Para el Colegio Nacional, se eliminaron los tableros cuadrículados T1 y T2 de las estaciones E1 y E2; T3 y T4 de las estaciones E2 y E3; y la esfera “a” de la estación E1 y E2. Por otra parte, se generó un plano como objeto de referencia natural llamado “P1” mediante una de las paredes de la fachada, para mejorar el empate entre los escaneos tomados desde E1 y E2. En este caso, los valores altos de tensión para los tableros se pueden atribuir a que en uno de los dos escaneos consecutivos el haz incidió sobre los mismos con un ángulo muy oblicuo, lo que ocasiona una definición deficiente del punto central; para la esfera no se pudieron encontrar motivos que expliquen el valor de tensión arrojado.

En la **Tabla 3-6**, se exponen los siguientes parámetros: \*media: describe la discrepancia entre dos escaneos correspondientes; \*número de puntos con una falla menor a 4 mm, mostrado en porcentaje; \*superposición: muestra la cantidad de puntos de escaneo que se superponen en los dos escaneos, expresado en porcentajes; \*puntos utilizados: número de puntos de escaneo que se utilizaron para el cálculo estadístico; \*estadísticas generales.

Escaneo	Escaneo	Media (mm)	< 4mm (%)	Superposición (%)	Puntos utilizados	Estadísticas generales	
						Media (mm)	< 4mm (%)
Edificio Central							
E7	E6	1,8	75,4	79,3	34347	1,5	80
E8	E7	1,7	73,2	79,5	38568		
E4	E3	1,7	74	33,1	30194		
E9	E8	1,6	79,9	87,8	39891		
E2	E1	1,5	75,5	16,9	9555		
E5	E6	1,4	81,4	71,1	31523		
E4	E6	1,2	84,9	60,7	41646		
E3	E2	1	91,2	56,6	98039		
Colegio Nacional							
E5	E4	5,8	36,6	78,2	33817	3,2	60,3
E6	E5	3,8	52	26,2	18682		
E7	E6	2,8	66,7	76,4	58201		
E2	E3	2,8	65	39,2	28189		
E4	E3	2,4	66,9	50,9	32247		
E1	E2	2	74,8	79,5	81033		

Tabla 3-6: Parámetros estadísticos de los registros que poseen como sistema de referencia general uno de los sistemas propios de los escaneos, del Edificio Central y del Colegio Nacional.

Como se observa, la discrepancia entre escaneos correspondientes del relevamiento del Colegio Nacional resultó el doble frente a la que arrojó el relevamiento del Edificio Central. Se trata de un resultado esperable, donde las hipótesis que justifican dicho comportamiento son las siguientes:

- En ambos relevamientos se trabajó con la misma resolución. Sin embargo, las estaciones LiDAR en el caso del Colegio Nacional, se ubicaron más apartadas del edificio debido a que la altura del mismo así lo demandaba. De otra forma, se hubiese perdido mucha información. Esto da como resultado, que la cantidad de puntos sobre la superficie de los objetos de referencia artificiales sea menor. Luego, el software reconoce el objeto y estima las coordenadas de su punto central con parámetros estadísticos más deficientes.

- Al encontrarse el escáner a una distancia mayor del blanco, los puntos resultan de un rayo láser que recorrió una trayectoria de mayor longitud. El haz puede representarse como un cono de energía, y a mayor distancia aumenta el tamaño de la huella del haz láser sobre el objeto incidido. En consecuencia, el punto registrado corresponde a la integración de un sector de la superficie reflejada.

Por otra parte, se seleccionaron distintos pares de objetos de referencia a los cuales se les habían determinado las coordenadas y se calcularon valores de la distancia euclidiana en 3D. Luego, se contrastaron dichos valores obtenidos a partir del cálculo con coordenadas (obtenidas mediante mediciones con estación total) y los valores de distancia resultantes de medir los mismos pares de referencia en las nubes de puntos registradas. (**Tabla 3-7**).

Pares de objetos de referencia	Distancia calculada a partir de las coordenadas resultantes de mediciones con estación total (m) [1]	Distancia obtenida a partir de mediciones en la nube de puntos registrada (m) [2]	$\Delta D$ (m) [1]-[2]
Edificio Central			
410-411	3,705	3,703	+0,002
419-420	10,108	10,107	+0,001
415-420	36,248	36,245	+0,003
Colegio Nacional			
415cn-411cn	8,097	8,096	+0,001
409cn-423cn	33,170	33,166	+0,004
413cn-414cn	17,601	17,598	+0,003
412cn-423cn	93,624	93,615	+0,009
Promedio			+3,3 mm
Desviación Estándar			+2,7 mm

Tabla 3-7: Evaluación externa de las nubes registradas. Distancias obtenidas de forma indirecta mediante estación total vs. distancias obtenidas de forma indirecta mediante LiDAR).

Un tema que llama la atención es que la comparación de distancias muestra una suerte de tendencia en los signos. Esto podría ser atribuible a un problema de escala entre los diferentes instrumentos.

Por otra parte, como se explicó con anterioridad, los parámetros estadísticos que determina el software no tienen en cuenta cómo se trasmite la imprecisión de un escaneo a otro. Luego,

para tener un orden de magnitud de la transmisión de la imprecisión se compararon distancias (determinadas de forma indirecta con estación total y determinadas a partir de mediciones en la nube de puntos LiDAR) que atravesasen de punta a punta los edificios e involucren la mayor cantidad posible de estaciones LiDAR.

Para el Edificio Central se determinó la distancia entre las esferas 415 y 420, la misma involucra 6 de las 9 estaciones LiDAR realizadas. La discrepancia hallada fue de 3 mm, que resulta coherente con la estadística global calculada por el software (1RMS=1,5 mm), ya que se ubica en 2RMS.

Para el Colegio Nacional se determinó la distancia entre las esferas 412 y 423, la misma involucra 7 de las 7 estaciones LiDAR realizadas. La discrepancia hallada fue de 9 mm, también coherente con la estadística global del software (1RMS=3,2 mm), aunque en los límites de la correspondiente campana de Gauss (<3RMS). Debe considerarse que la distancia involucrada es muy superior a las incluidas en cada una de los escaneos.

Por otro lado, se determinaron el promedio y la desviación estándar de todas los  $\Delta D$  resultantes, tomando a todo como un conjunto sin discriminar entre el Edificio Central y el Colegio Nacional, ya que los relevamientos se llevaron a cabo el mismo día, con el mismo instrumental y en las mismas condiciones ambientales.

Vale aclarar que, los  $\Delta D$  resultantes, no son íntegramente atribuibles a impresiones resultantes de los empates entre escaneos LiDAR. Las determinaciones con estación total también poseen sus errores que influyen en los valores de discrepancias halladas. Recordar que los errores de cierre de la poligonal fueron de 3 mm en N y 3 mm en E. En consecuencia, las diferencias encontradas se ubican en el límite de la capacidad de la técnica utilizada para el control.

Otro control que se realizó sobre las nubes registradas con sistemas internos, consistió en comparar determinaciones lineales realizadas con un distanciómetro de mano con las correspondientes inferidas a partir de la nube de puntos registrada. Vale aclarar que los valores de las distancias obtenidas con distanciómetro de mano resultaron de un promedio de 10 mediciones con una desviación estándar en el orden del milímetro. (**Tabla 3-8**).

Distancia	Distancia resultante de mediciones con distanciómetro de mano (m) [1]	Distancia obtenida a partir de mediciones en la nube de puntos registrada (m) [2]	$\Delta D$ (m) [1]-[2]
Edificio Central			
D1	18,571	18,569	+0,002
D2	5,154	5,152	+0,002
D3	5,108	5,105	+0,003
Colegio Nacional			
D1	4,198	4,196	+0,002
D2	2,315	2,314	+0,001
D3	34,598	34,597	+0,001

Tabla 3-8: Evaluación externa de las nubes registradas. Distancias obtenidas de forma directa mediante distanciómetro de mano vs. distancias obtenidas de forma indirecta mediante LiDAR.

Los valores de la tabla **Tabla 3-8** muestran discrepancias del mismo orden de las halladas en la tabla **Tabla 3-7**. Nuevamente, se observa una sistematicidad en el signo que podría estar indicando un posible problema en el factor de escala entre las diferentes tecnologías utilizadas para determinar las medidas lineales.

*Registro con sistema de referencia general externo (GK-POSGAR07; IGN)*

Realizado este registro, se tiene una de nube donde cada punto posee coordenadas: Norte-Este POSGAR 07- GK Faja N°9; cota H referida al 0 del IGN.

Antes de comenzar con el análisis, es válido recordar con qué objetos de referencia con coordenadas conocidas se realizaron los registros 1,2 y 3 del Edificio Central:

Registro	Puntos de ajuste utilizados	Cantidad
1	T1, 410, 415, 417, T7, 419,420	7
2	418,419,420	3
3	411,415,420	3

En la **Tabla 3-9**, se exponen los siguientes parámetros resultantes de cálculos estadísticos realizados por el software de procesamiento: \*media: describe la discrepancia entre dos escaneos correspondientes; \*número de puntos con una falla menor a 4 mm, mostrado en porcentaje; \* superposición: muestra la cantidad de puntos de escaneo que se superponen en

los dos escaneos en porcentajes; \*puntos utilizados: número de puntos de escaneo que se utilizaron para el cálculo estadístico; estadísticas generales.

	Escaneo	Escaneo	Media (mm)	< 4 mm (%)	Superposición (%)	Puntos utilizados	Estadísticas generales	
							Media (mm)	< 4 mm (%)
Colegio Nacional								
	E2	E3	7,2	29,3	39,1	28168	3,8	55,8
	E6	E5	4,3	47,5	26,4	18707		
	E7	E6	3,6	55,2	78,5	58892		
	E3	E4	3,3	57,1	66,6	68126		
	E4	E5	2,4	71,6	65,3	60821		
	E1	E2	2,0	74,1	79,3	87145		

Tabla 3-9: Parámetros estadísticos de los registros que poseen como sistema de referencia general POSGAR07/IGN, del Edificio Central y del Colegio Nacional

El análisis de esta tabla es equivalente al que se realizó para el registro con sistema interno (**Tabla 3-6**). El incremento de la media que se observa, tanto para el relevamiento del Edificio Central como para el del Colegio Nacional se atribuye a que en este registro se agrega información de georreferenciación adicional que suma un fuerte condicionamiento con nuevos errores.

Se seleccionaron aquellos objetos de referencia artificiales a los cuales se les habían determinado las coordenadas pero que no se utilizaron para realizar el registro. En la **Tabla 3-10** se puede observar la comparación entre las coordenadas de los objetos determinadas mediante mediciones con estación total y las obtenidas a partir de la nube LiDAR una vez registrada. En la **Tabla 3-11** se exponen los valores estadísticos (promedio y desviación estándar) sobre los  $\Delta N$ ,  $\Delta E$ ,  $\Delta H$  de los registros 1,2 y 3 del Edificio Central.



“Agrimensura 3D con tecnología LiDAR”

Registro del relevamiento del Edificio Central										
	Objeto de referencia (puntos de control)	Coordenadas resultantes de mediciones mediante topografía clásica (m) [1]			Coordenadas resultantes de mediciones en la nube de puntos LiDAR (m) [2]			[1]-[2]		
		N	E	H	N	E	H	ΔN	ΔE	ΔH
Registro 1	409	6137644,393	9500469,899	19,726	6137644,393	9500469,900	19,726	0	-0,001	0
	411	6137637,603	9500476,221	19,735	6137637,603	9500476,221	19,736	0	0	-0,001
	412	6137646,957	9500463,413	19,816	6137646,959	9500463,414	19,814	-0,002	-0,001	0,002
	413	6137645,180	9500460,476	20,967	6137645,178	9500460,472	20,962	0,002	0,004	0,005
	414	6137645,780	9500455,620	20,189	6137645,777	9500455,619	20,184	0,003	0,001	0,005
	416	6137635,937	9500453,860	20,075	6137635,936	9500453,858	20,076	0,001	0,002	-0,001
	418	6137625,388	9500467,067	19,289	6137625,375	9500467,078	19,292	0,013	-0,011	-0,003
	T3	6137643,954	9500448,599	19,237	6137643,955	9500448,603	19,236	-0,001	-0,004	0,001
T9	6137624,469	9500474,510	22,584	6137624,461	9500474,528	22,583	0,008	-0,018	0,001	
Registro 2	409	6137644,393	9500469,899	19,726	6137644,402	9500469,908	19,717	-0,009	-0,009	0,009
	410	6137639,428	9500472,997	19,748	6137639,438	9500473,008	19,739	-0,01	-0,011	0,009
	411	6137637,603	9500476,221	19,735	6137637,615	9500476,231	19,726	-0,012	-0,01	0,009
	412	6137646,957	9500463,413	19,816	6137646,966	9500463,421	19,808	-0,009	-0,008	0,008
	413	6137645,180	9500460,476	20,967	6137645,186	9500460,482	20,959	-0,006	-0,006	0,008
	414	6137645,780	9500455,620	20,189	6137645,788	9500455,629	20,182	-0,008	-0,009	0,007
	415	6137637,958	9500452,169	20,716	6137637,970	9500452,176	20,713	-0,012	-0,007	0,003
	416	6137635,937	9500453,860	20,075	6137635,947	9500453,865	20,072	-0,01	-0,005	0,003
	417	6137633,438	9500456,478	19,146	6137633,447	9500456,481	19,143	-0,009	-0,003	0,003
	T1	6137634,180	9500477,940	21,251	6137634,193	9500477,950	21,241	-0,013	-0,01	0,01
	T3	6137643,954	9500448,599	19,237	6137643,969	9500448,612	19,233	-0,015	-0,013	0,004
	T7	6137627,064	9500468,056	19,438	6137627,084	9500468,026	19,438	-0,02	0,030	0
T9	6137624,469	9500474,510	22,584	6137624,462	9500474,530	22,583	0,007	-0,02	0,001	

“Agrimensura 3D con tecnología LiDAR”

Registro del relevamiento del Edificio Central										
	Objeto de referencia	Coordenadas resultantes de mediciones mediante topografía clásica (m) [1]			Coordenadas resultantes de mediciones en la nube de puntos LiDAR (m) [2]			[1]-[2]		
		N	E	H	N	E	H	ΔN	ΔE	ΔH
Registro 3	409	6137644,393	9500469,899	19,726	6137644,390	9500469,898	19,726	0,003	0,001	0
	410	6137639,428	9500472,997	19,748	6137639,426	9500472,998	19,748	0,002	-0,001	0
	412	6137646,957	9500463,413	19,816	6137646,955	9500463,413	19,811	0,002	0	0,005
	413	6137645,180	9500460,476	20,967	6137645,176	9500460,474	20,962	0,004	0,002	0,005
	414	6137645,780	9500455,620	20,189	6137645,776	9500455,620	20,184	0,004	0	0,005
	416	6137635,937	9500453,860	20,075	6137635,936	9500453,859	20,076	0,001	0,001	-0,001
	417	6137633,438	9500456,478	19,146	6137633,435	9500456,476	19,147	0,003	0,002	-0,001
	418	6137625,388	9500467,067	19,289	6137625,380	9500467,062	19,292	0,008	0,005	-0,003
	419	6137621,971	9500473,054	19,712	6137621,97	9500473,056	19,712	0,001	-0,002	0
	T1	6137634,180	9500477,940	21,251	6137634,091	9500478,065	21,250	0,089	-0,125	0,001
	T3	6137643,954	9500448,599	19,237	6137643,955	9500448,603	19,237	-0,001	-0,004	0
	T7	6137627,064	9500468,056	19,438	6137627,08	9500468,026	19,439	-0,016	0,030	-0,001
T9	6137624,469	9500474,510	22,584	6137624,461	9500474,529	22,584	0,008	-0,019	0	
Registro del relevamiento del Colegio Nacional										
	413	6137567,652	9500536,059	21,463	6137567,653	9500536,064	21,466	-0,001	-0,005	-0,003
	414	6137552,575	9500544,976	19,735	6137552,577	9500544,978	19,734	-0,002	-0,002	0,001

Tabla 3-10: Evaluación externa de las nubes registradas (coordenadas obtenidas mediante estación total vs. coordenadas obtenidas de la nube de puntos LiDAR una vez registrada).

Registro	Promedio (m)			Desviación Estándar (m)			N° de puntos
	$\Delta N$	$\Delta E$	$\Delta H$	$\Delta N$	$\Delta E$	$\Delta H$	
1	0,003	-0,003	0,001	0,005	0,007	0,003	9
2	-0,010	-0,006	0,006	0,006	0,012	0,003	13
3	0,008	-0,008	0,001	0,025	0,036	0,003	13

Tabla 3-11: Promedio y desviación estándar sobre los  $\Delta N$ ,  $\Delta E$ ,  $\Delta H$  de los Registros 1,2 y 3 del Edificio Central.

Si bien la lectura de la **Tabla 3-10** es sencilla, siempre es conveniente acompañar los números con una representación gráfica. A continuación se exponen tres gráficos correspondientes a los Registros 1, 2 y 3 respectivamente del Edificio Central (**Figura 3-36**, **Figura 3-37** y **Figura 3-38**), donde en el eje de las ordenadas se representan los valores de  $\Delta N$ ,  $\Delta E$  y  $\Delta H$  de cada punto de control y en el eje de las abscisas la coordenada Norte de cada punto. Para que sean fácilmente comparables, se asignó el mismo rango de ordenadas a los 3 gráficos.

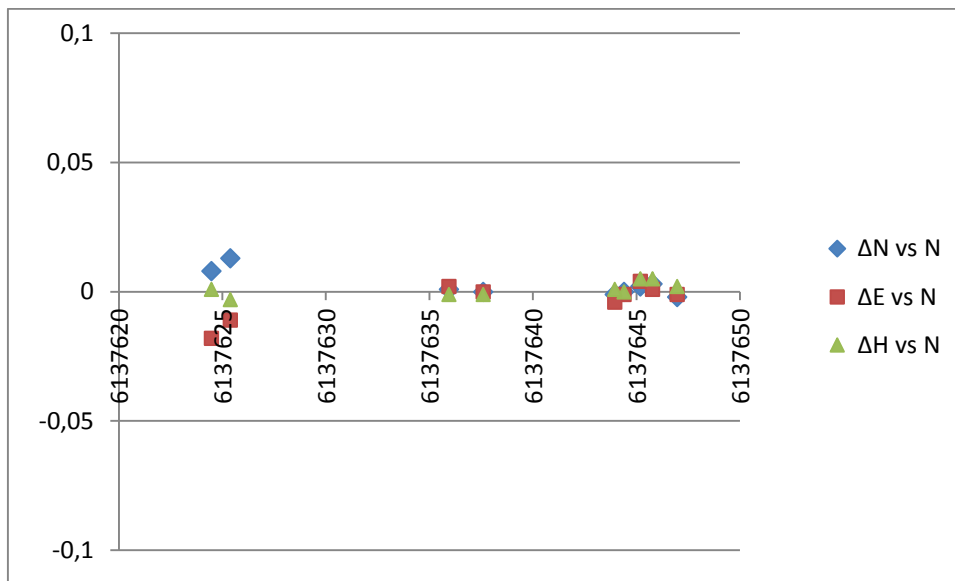


Figura 3-36: Registro N°1. Valores de  $\Delta N$ ,  $\Delta E$  y  $\Delta H$  de cada punto de control.

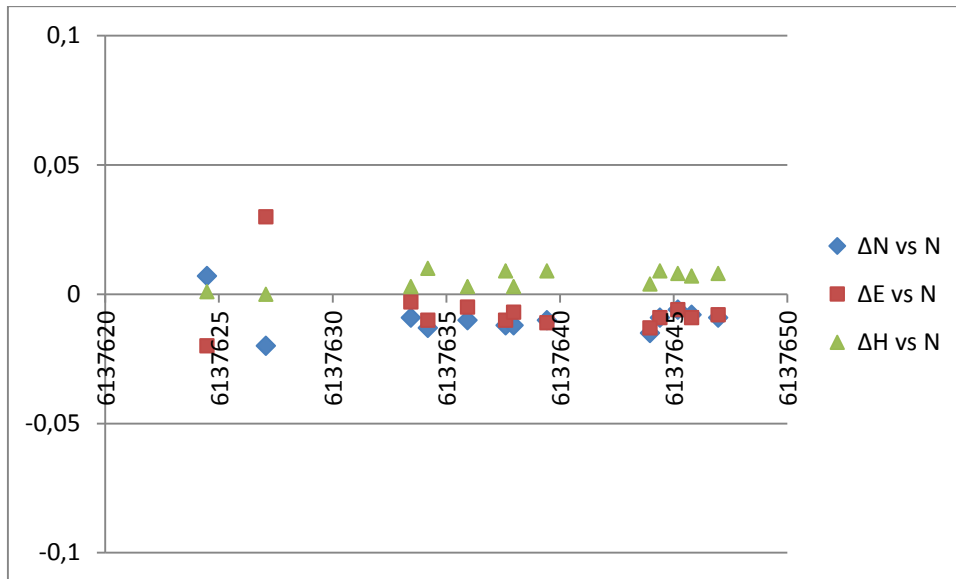


Figura 3-37: Registro N°2. Valores de  $\Delta N$ ,  $\Delta E$  y  $\Delta H$  de cada punto de control.

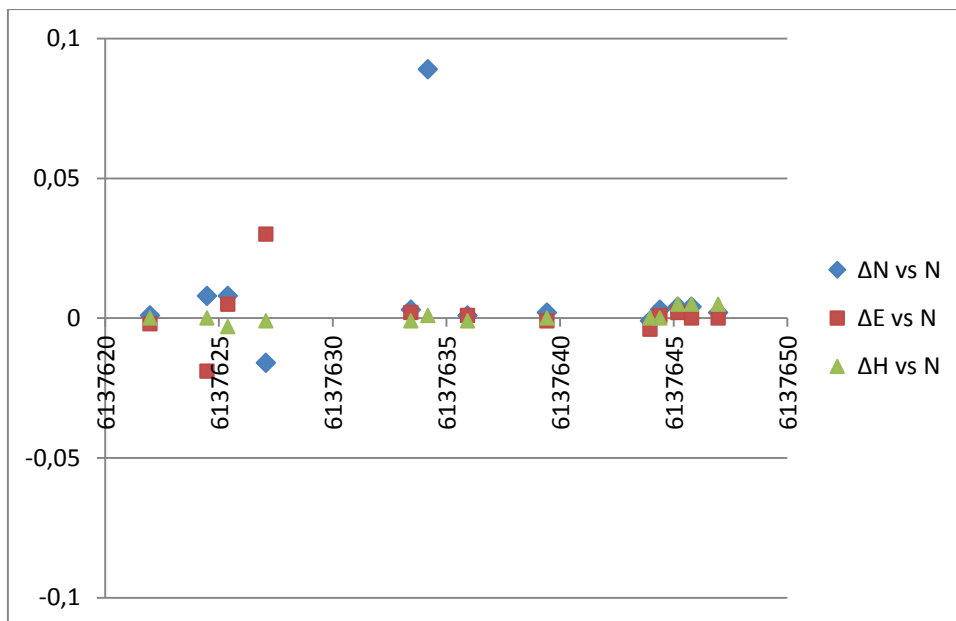


Figura 3-38: Registro N°3. Valores de  $\Delta N$ ,  $\Delta E$  y  $\Delta H$  de cada punto de control

Un elemento común a los tres registros es el comportamiento de la componente vertical, que muestra una coherencia superior frente a las componentes horizontales. Este resultado, puede estar relacionado con dos factores originados en la medición LiDAR y en la metodología utilizada para determinar las alturas de los puntos de control:

- Los puntos de control se encuentran en un rango vertical de visión muy estrecho ( $\pm 10^\circ$ ), por lo que la huella del haz láser no experimentará deformaciones sensibles y se parecerá mucho a un círculo. En consecuencia, la componente vertical determinada con LiDAR estará muy bien definida.

- Las alturas de los mismos puntos fueron determinadas con Nivelación Geométrica y cortas radiaciones con Estación Total. El cierre de la nivelación fue de 3 mm.

En consecuencia, ambos elementos convergen hacia una correspondencia poco viciada por los errores inherentes a ambas técnicas.

Otro elemento común es que las mayores diferencias están asociadas a los tableros cuadrículados. Como ya fue mencionado, algunos sufrieron cambios de posición durante el relevamiento; pero se los utilizó como puntos de control con la finalidad de evidenciar el impacto de dicha circunstancia. Otra razón que influye en estos resultados, es el ángulo de incidencia del haz láser sobre los mismos, que cuando es oblicuo genera una huella de forma elipsoidal que afecta la determinación del punto central del tablero. Este fenómeno, tiene en general un efecto mucho menor en la determinación del centro de la esfera.

El registro 1 se realizó con un número de objetos de referencia que supera en 4 al mínimo necesario y con una distribución homogénea sobre todo el relevamiento. Esto provoca un muy buen condicionamiento geométrico del sistema. El orden de los desvíos es de milímetros, por lo cual la estadística es en principio muy buena. No obstante, como se verá más adelante estos indicadores no son suficientes para evaluar totalmente la calidad del registro.

En el registro 2 los puntos de referencia fueron intencionalmente agrupados en uno de los extremos del relevamiento. De esta manera, el resto de los escaneos no afectados por estos puntos deberían comportarse de manera similar al registro interno. Los resultados obtenidos colocan a este registro como el peor de los tres.

El registro 3 tiene sólo tres puntos de referencia pero muy bien distribuidos. La estadística y la distribución de los desvíos es en principio peor que en el registro 1.

La discusión ya realizada sobre los tableros cuadrículados, hace necesario un análisis más detallado y diferenciado entre el comportamiento de estos objetos y las esferas. Para ello, se recalcularon los parámetros estadísticos excluyendo los tableros de puntos de control. En la **Tabla 3-12** se comparan los valores de promedio y desviación estándar sobre los  $\Delta N$ ,  $\Delta E$ ,  $\Delta H$  de los registros 1,2 y 3 del Edificio Central que resultan de muestras diferentes:

- a) Tomando todos los puntos de control (esferas y tableros cuadrículados);
- b) Excluyendo a los tableros cuadrículados de puntos de control.

	Registro	Promedio (m)			Desviación Estándar (m)			N° de puntos
		$\Delta N$	$\Delta E$	$\Delta H$	$\Delta N$	$\Delta E$	$\Delta H$	
Con tableros cuadriculados	1	0,003	-0,003	0,001	0,005	0,007	0,003	9
	2	-0,010	-0,006	0,006	0,006	0,012	0,003	13
	3	0,008	-0,008	0,001	0,025	0,036	0,003	13
Sin tableros cuadriculados	1	0,002	-0,001	0,001	0,005	0,005	0,003	7
	2	-0,009	-0,008	0,007	0,002	0,003	0,003	9
	3	0,003	0,001	0,001	0,002	0,002	0,003	9

Tabla 3-12: Promedio y desviación estándar sobre los  $\Delta N$ ,  $\Delta E$ ,  $\Delta H$  de los registros 1,2 y 3 del Edificio Central que resultan de muestras diferentes: tomando todos los puntos de control y excluyendo a los tableros cuadriculados de puntos de control.

Se graficaron nuevamente para los tres registros, los valores de  $\Delta N$ ,  $\Delta E$  y  $\Delta H$  de cada punto de control vs. la coordenada Norte de cada punto excluyendo los generados por tableros cuadriculados.( **Figura 3-39**, **Figura 3-40** y **Figura 3-41**).

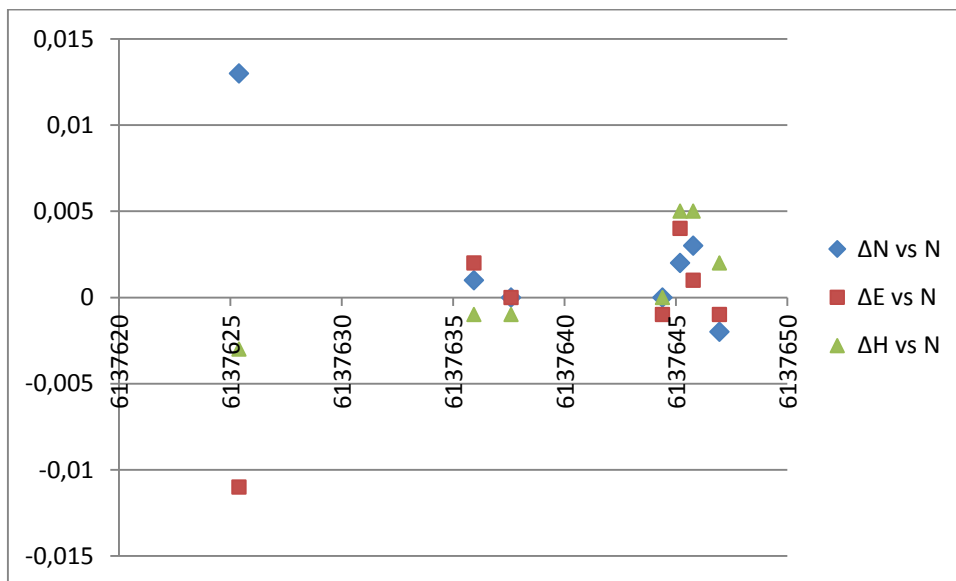


Figura 3-39: Registro N° 1. Valores de  $\Delta N$ ,  $\Delta E$  y  $\Delta H$  de cada punto de control excluyendo aquellos generados por los tableros cuadriculados.

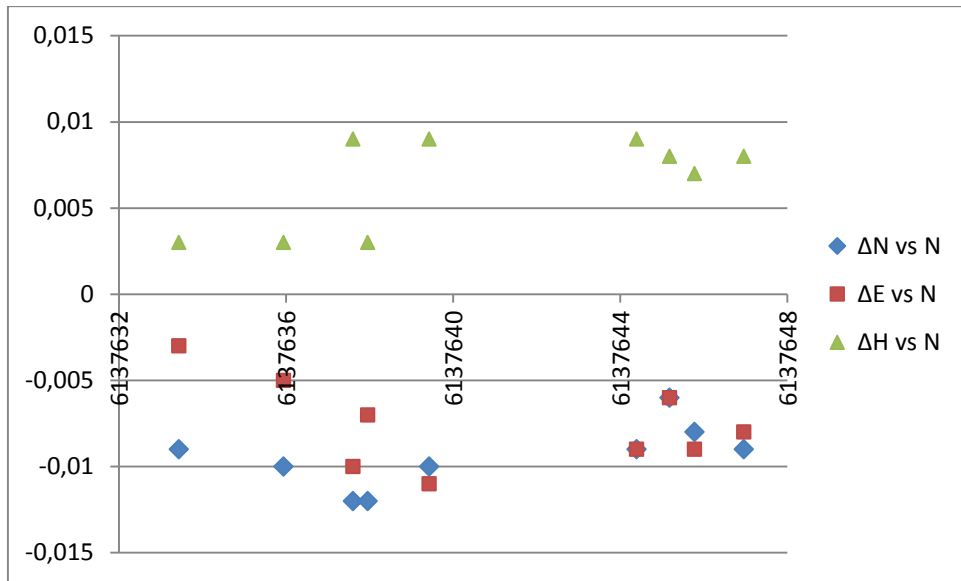


Figura 3-40: Registro N° 2. Valores de  $\Delta N$ ,  $\Delta E$  y  $\Delta H$  de cada punto de control excluyendo aquellos generados por los tableros cuadrículados.

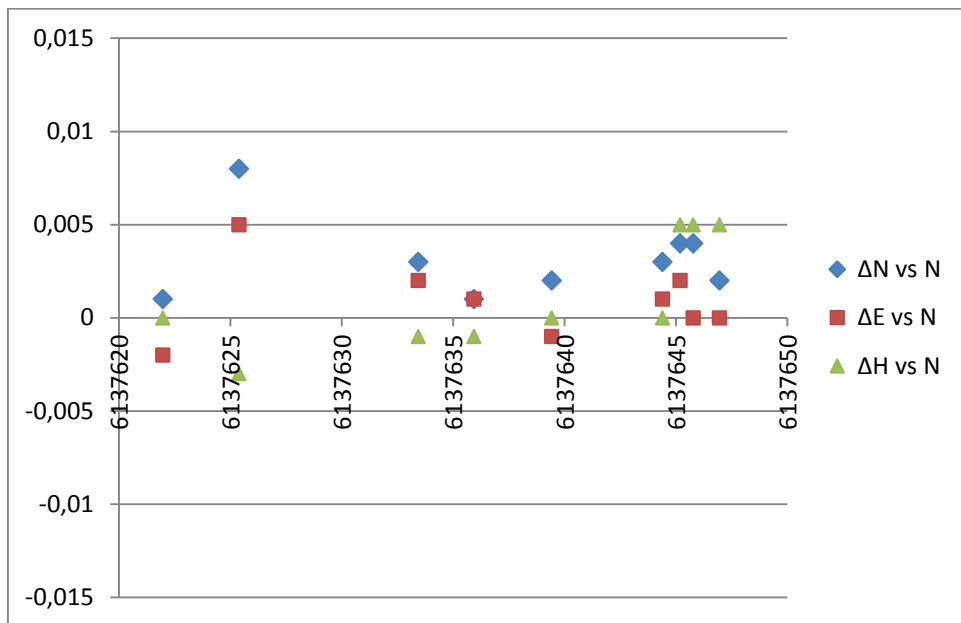


Figura 3-41: Registro N° 3. Valores de  $\Delta N$ ,  $\Delta E$  y  $\Delta H$  de cada punto de control excluyendo aquellos generados por los tableros cuadrículados.

Los parámetros estadísticos y las distribuciones de los desvíos del registro 1 no han experimentado variaciones sensibles.

El registro 2 obtiene una sensible mejora en la distribución de los errores (ver la desviación estándar) pero se visualiza una clara tendencia. La misma se manifiesta en los promedios, pero no debe ser interpretada necesariamente como una traslación, ya que es probable que incluya rotaciones. Los tres puntos agrupados se comportan, geoméricamente para el

conjunto, como uno sólo. En consecuencia, la estructura es libre para rotar en el espacio manteniendo la calidad geométrica interna.

Al eliminar de la estadística los tableros, los parámetros estadísticos y la distribución de los desvíos del registro 3 mejoran sensiblemente y lo convierten en el mejor de los tres. El mismo fue ajustado con tres puntos con coordenadas conocidas de mucha calidad, bien definidos en la nube LiDAR (puntos generados por esferas) y bien distribuidos. Por eso permite detectar el comportamiento anómalo de algunos objetos de referencia (tableros cuadrículados): T7 y T9.; efectos prácticamente ocultos en los otros registros.

Como en el registro 1, se utilizaron para el ajuste tableros cuadrículados (T1 y T7), es coherente que el registro 3 presente una mejor estadística. No obstante, es válido aclarar que el tablero T1 fue el único al que se lo aferró a una superficie metálica y que a su vez, tenía una incidencia perpendicular del haz láser; por lo tanto, se trata a priori de un buen punto LiDAR. Luego, la estadística del registro 1 es muy buena, pues sólo uno (T7) de los siete puntos de ajuste utilizados tiene una representación láser deficiente. Esta situación nuevamente se pone en evidencia en las diferencias obtenidas para la esfera 418. Mientras que en todas las esferas las diferencias resultan en el orden del milímetro, para la esfera 418 son de un centímetro en las componentes horizontales. Esto podría atribuirse a que la zona en la que se encuentra dicha esfera está condicionada por el punto T7 (tablero cuadrículado).

Por último, se compararon valores de distancias entre puntos de control obtenidos a partir del cálculo con coordenadas (conseguidas mediante mediciones con estación total) y valores de distancia resultantes de medir los mismos puntos en las nubes registradas. (**Tabla 3-13**).

Registro	Pares de objetos de referencia	Distancia calculada a partir de las coordenadas resultantes de mediciones con estación total (m) [1]	Distancia obtenida a partir de mediciones en la nube de puntos registrada (m) [2]	$\Delta D$ (m) [1]-[2]
1	409-412	6,975	6,976	-0,001
	413-414	4,954	4,951	0,003
	416-418	16,921	16,939	-0,018
2	409-412	6,975	6,976	-0,001
	410-411	3,705	3,703	0,002
	413-414	4,954	4,952	0,002
	415-417	6,439	6,439	0
3	409-412	6,975	6,974	0,001
	413-414	4,954	4,952	0,002
	416-418	16,921	16,922	-0,001



Tabla 3-13: Evaluación externa de las nubes registradas con sistema externo del Edificio Central de la Facultad de Ingeniería. Distancias obtenidas de forma indirecta mediante estación total vs. distancias obtenidas de forma indirecta mediante LiDAR.

La **Tabla 3-13** expresa la coherencia interna de cada registro a través de una evaluación relativa. Vuelve a poner en evidencia la problemática de la esfera 418 en el registro 1. Mientras que el valor del  $\Delta D$  en el registro 3 es de -1 mm, en el 1 es de -18 mm. En el registro 2 se confirma la calidad interna expresada en la **Tabla 3-12**, equivalente a la del registro 3.

## 4.HONORARIOS Y GASTOS

En lo siguiente se detallan las actividades con sus honorarios correspondientes y los gastos extraordinarios y ordinarios con sus respectivos valores, finalmente se presenta el presupuesto del trabajo realizado.

### Determinación de los honorarios

Si bien los profesionales de la Agrimensura cuentan con el Decreto N° 6964/65 que fija los Aranceles para la Regulación de Honorarios, parte de la tarea realizada no se encuentra regulada y no es posible asemejarla a algunas de las que sí lo están. Por ello, se recurrió a un análisis de los valores de mercado para el relevamiento y procesamiento de los datos LiDAR.

- 1) Poligonal Planialtimétrica. Según Tabla XII – Capítulo III – Título VI del Decreto N° 6964/65, por tratarse de una poligonal de longitud menor a 1 km y haber materializado 10 puntos fijos mediante la colocación de clavos, el honorario resulta: \$5.000.
- 2) Relevamiento LiDAR y procesamiento de los datos. Según el análisis de los valores de mercado y teniendo en cuenta que no se trató de un simple relevamiento y procesamiento, sino que se realizó un trabajo con perfil de investigación.; el honorario resultante es de US\$8.000. Tomando como valor del dólar \$14,820 (26 de Marzo del 2016), se traduce en \$118.560.

***Total de honorarios: \$123.560***

Determinación de los gastos

Gastos ordinarios

Según el Decreto N° 6964/65 los gastos ordinarios son el 10% de los honorarios respectivos.

*Total gastos ordinarios: \$12.356*

Gastos extraordinarios

1) Gastos de movilidad

Según el Decreto N° 6964/65 se podrán exigir gastos de movilidad cuando el sitio de operación se encuentre a más de 50 km del domicilio real del profesional. Al considerar el domicilio real del profesional en la ciudad de la Plata, no se computan gastos de movilidad.

2) Costo de equipos

Los equipos GNSS (Receptor Topcon Hiper + con antena incorporada / Receptor Topcon Legacy, Antena Legant 2) fueron prestados por el Departamento de Agrimensura. Para el cálculo de los gastos, se considera que fueron alquilados por medio día de trabajo. Luego, si el alquiler de ambos equipos durante un día de trabajo se estima en U\$S 200, el costo resultante es de U\$S 100 (\$ 1482).

El resto de los equipos utilizados se los considera propiedad del profesional, por lo tanto se procede al cálculo de amortización correspondiente.

La amortización de los equipos se calcula en función del valor a nuevo y de la vida útil que se estima de los mismos.

$$\text{Amortización para un año} = \frac{\text{Valor a nuevo (U\$S)}}{\text{Vida útil en años}}$$

$$\text{Amortización para un día} = \frac{\text{Amortización para un año } \left(\frac{\text{U\$S}}{\text{año}}\right)}{\text{Días laborales}}$$

Se toman como días laborales 200 de los 365 días del año.

Estación Total Trimble M3 5

$$\text{Amortización para un año} = \frac{10.000 \text{ U\$S}}{10 \text{ años}} = \frac{\text{U\$S}}{\text{año}} 1.000 = \frac{\$}{\text{año}} 14.820$$

“Agrimensura 3D con tecnología LiDAR”

$$\text{Amortización para un día} = \frac{1000}{200} = \frac{U\$S}{\text{día}} 5 = \frac{\$}{\text{día}} 74,10$$

Costo de amortización para dos días de trabajo: \$148,20

Miniprisma GeoAllen

$$\text{Amortización para un año} = \frac{220 \text{ U\$S}}{10 \text{ años}} = \frac{U\$S}{\text{año}} 22 = \frac{\$}{\text{año}} 326,04$$

$$\text{Amortización para un día} = \frac{22}{200} = \frac{U\$S}{\text{día}} 0,11 = \frac{\$}{\text{día}} 1,63$$

Costo de amortización para un día de trabajo (poligonal): \$1,63

Nivel automático PENTAX 28X y mira

$$\text{Amortización para un año} = \frac{1.0000 \text{ U\$S}}{10 \text{ años}} = \frac{U\$S}{\text{año}} 100 = \frac{\$}{\text{año}} 1.482$$

$$\text{Amortización para un día} = \frac{100}{200} = \frac{U\$S}{\text{día}} 0,5 = \frac{\$}{\text{día}} 7,41$$

Costo de amortización para medio de trabajo: \$3,71

Escáner láser 3D marca Trimble modelo TX5, set de objetos de referencia, mini-prisma

$$\text{Amortización para un año} = \frac{80.000 \text{ U\$S}}{10 \text{ años}} = \frac{U\$S}{\text{año}} 8.000 = \frac{\$}{\text{año}} 118.560$$

$$\text{Amortización para un día} = \frac{9.000}{200} = \frac{U\$S}{\text{día}} 40 = \frac{\$}{\text{día}} 592,80$$

Costo de amortización para un día trabajo: \$592,80

Software de procesamiento SCENE

$$\text{Amortización para un año} = \frac{10.000 \text{ U\$S}}{5 \text{ años}} = \frac{U\$S}{\text{año}} 2.000 = \frac{\$}{\text{año}} 29.640$$

$$\text{Amortización para un día} = \frac{2.000}{200} = \frac{U\$S}{\text{día}} 10 = \frac{\$}{\text{día}} 148,20$$

Costo de amortización para siete días de trabajo: \$1.037,40

Costo total de amortización de equipos: \$ 1.783,74

Costo total de equipos: \$ 3.265,74

### 3) Remuneración de ayudantes

Es necesario contar con un ayudante durante:

- Un día para las mediciones realizadas con estación total (poligonal)
- Medio día para las observaciones GNSS (vigilancia y cuidado del equipo)
- Medio día para la nivelación geométrica,
- Un día completo para el relevamiento LiDAR (vigilancia y cuidado del equipo).

Total: 3 días de trabajo

Estimando que la hora de un ayudante cuesta \$40, el pago por la labor de un día de trabajo de 8 horas es de \$320. Luego, el costo por 3 días es de \$ 960.

Por otra parte, es necesario contar con un ayudante jerarquizado durante un día completo para realizar la referenciación de los objetos artificiales trabajando en simultáneo con el profesional a cargo del relevamiento LiDAR.

Estimando que la hora de un ayudante jerarquizado cuesta \$80, el pago por la labor de un día de trabajo de 8 horas es de \$640.

A su vez, se debe contar con otro ayudante durante un día completo de trabajo para que asista al ayudante jerarquizado durante la referenciación. Por lo tanto se computan \$320 más.

*Gasto total por remuneración de ayudantes: **\$1.920***

### 4) Comida

Se tienen en cuenta los gastos para la comida sólo para los días completos de trabajo. Para el día completo de trabajo que corresponde a las mediciones con estación total para la conformación de la poligonal, se computan \$160 para dos personas (profesional y ayudante).

Para el día completo de trabajo que corresponde al relevamiento LiDAR se computan \$320 para cuatro personas (profesional, ayudante jerarquizado y 2 ayudantes).

*Total gasto de comida: **\$440***

### 5) Gastos extraordinarios que se determinan a partir del honorario

“Agrimensura 3D con tecnología LiDAR”

- Aportes provisionales (10% del honorario): \$12.356
  - Tasa de visado del Consejo Profesional de Agrimensura (6% del honorario):  
\$7.413,60
  - Contrato (Impuesto de sellos: 1,2% del honorario):\$1.482,72
- Total: **\$21.252,32**

*Total gastos extraordinarios: \$26.878,06*

*Total de gastos: \$39.234,06*

***PRESUPUESTO: \$162.794,06≈ \$162.800***

## 5. CONCLUSIONES

- La aplicación de la tecnología LiDAR requiere de un grupo de trabajo multidisciplinario. El Agrimensor ocupa un papel fundamental en la captura de los datos, el procesamiento inicial de los mismos y la interpretación de los resultados; es además, quien debe garantizar las calidades requeridas. Por ello, es clave que esta nueva tecnología sea investigada por profesionales de la agrimensura.
- La técnica LiDAR permite el modelado 3D de estructuras con un nivel de resolución y precisión hasta ahora inéditos. En el caso de plataformas estáticas, como la utilizada aquí, ambos parámetros alcanzan los valores óptimos.
- La calidad geométrica interna de los puntos de una nube generada por un LiDAR terrestre estático, como el Trimble TX5, fue estimada en 1 a 3 milímetros (1RMS). Dichas precisiones muestran la capacidad de representación de estos modelos 3D y su potencial para el análisis de deformaciones internas (como ángulos y distancias).
- Los modelos 3D obtenidos en este trabajo establecen una referencia geométrica confiable para futuras tareas en ambos edificios, representando en general, una línea de base multipropósito. Será sencillo integrar nuevas zonas relevadas, al igual que otro tipo de información georreferenciada.
- Las nubes LiDAR 3D correspondientes a los dos edificios e inicialmente desvinculadas entre sí, pueden ser integradas a partir de que ambas sean referenciadas en un mismo sistema externo, local o global. Luego, la calidad de dicha integración estará naturalmente condicionada por la precisión de los métodos geodésicos-topográficos utilizados.

En este caso, se obtuvo una coherencia de 3 mm en cada una de las componentes a partir de la creación de una red topográfica. Por lo cual, la repetitividad externa podría ser controlada en ese nivel de precisión en la medida en que la red topográfica pueda ser utilizada.

- El establecimiento de marcas de referencia facilita el registro y el control de las mediciones LiDAR. Además, permitiría la integración de futuras mediciones en el mismo marco de referencia.
- La referenciación en un sistema externo de la nube LiDAR se debe realizar con un mínimo de 3 puntos que posean: \*coordenadas espaciales conocidas en el correspondiente marco de referencia; \*una buena representación por parte del escaneo láser, que permita identificar claramente el punto referenciado; \* una distribución homogénea en la zona de trabajo.  
Fue demostrado que una buena distribución de pocos puntos de alta calidad es la mejor solución, que permite además detectar eventuales puntos de referencia discordantes. La inclusión de marcas de referencia adicionales es útil para el análisis de deformaciones en determinados sectores del relevamiento.
- Como elementos de referencia, las esferas presentan muchas ventajas frente a los tableros cuadriculados gracias a la fuerte geometría de las mismas.  
Por otra parte, los tableros cuadriculados utilizados con la finalidad de integrar distintos escaneos, sólo son aptos para relevamientos en los que entre estaciones consecutivas el haz tenga una incidencia perpendicular o próxima a esta dirección. En relevamientos en los que no sea posible lograr que entre estaciones consecutivas el haz tenga una incidencia perpendicular o próxima a esta dirección, los mismos podrán ser utilizados con el objetivo de materializar un punto de ajuste en la nube LiDAR para conseguir la referenciación en un sistema externo. Por lo tanto se les deberá dar una buena ubicación sólo para una estación.
- Si el producto a entregar es una nube de puntos georreferenciada en un marco de referencia geodésico, como POSGAR07, u otro sistema externo; es necesario contar con un equipo de técnicos/profesionales que se dedique exclusivamente a las mediciones de GNSS y/o de estación total, pero que comprenda la metodología de una campaña LiDAR para lograr un trabajo sincronizado.
- La técnica de registración determina la dificultad de la campaña LiDAR. Cuando se adopta la basada en objetos de referencia artificiales, necesariamente se debe contar con una planificación previa de la tarea de campo que comprenda el

reconocimiento de la zona. De forma contraria, la duración de la campaña se puede incrementar por lo menos, en el doble de tiempo.

- La mayor parte del tiempo y esfuerzo de un trabajo que involucra mediciones LiDAR, se encuentra en el procesamiento de los datos. El volumen de datos registrados y la capacidad de hardware condiciona seriamente el avance efectivo del trabajo de gabinete.
- Se determinó que la versión disponible del software propietario SCENE presenta diversas debilidades en el tratamiento de los puntos individuales de la nube LiDAR. Ello genera una alta dependencia de los objetos de referencia artificiales, tanto para integrar los distintos escaneos como para referenciar la nube en un sistema externo; dejando obsoleta la utilización de puntos naturales. La posibilidad de contar con objetos de referencia naturales facilita y flexibiliza, tanto el relevamiento en campo como el procesamiento. Por lo tanto, se deberá investigar versiones actualizadas del software propietario SCENE, otros software propietarios y libres que solucionen los inconvenientes hallados.
- En este trabajo se estableció un procedimiento concreto para la planificación, medición, procesamiento y control de resultados obtenidos con LIDAR estático. Se reconocen diversos aspectos que deben ser investigados y profundizados en el futuro, como el análisis de estrategias alternativas de medición en diferentes condiciones ambientales, la integración con otros sensores LiDAR fijos y móviles, la utilización en diferentes disciplinas científicas y artísticas.



## 6. BIBLIOGRAFÍA

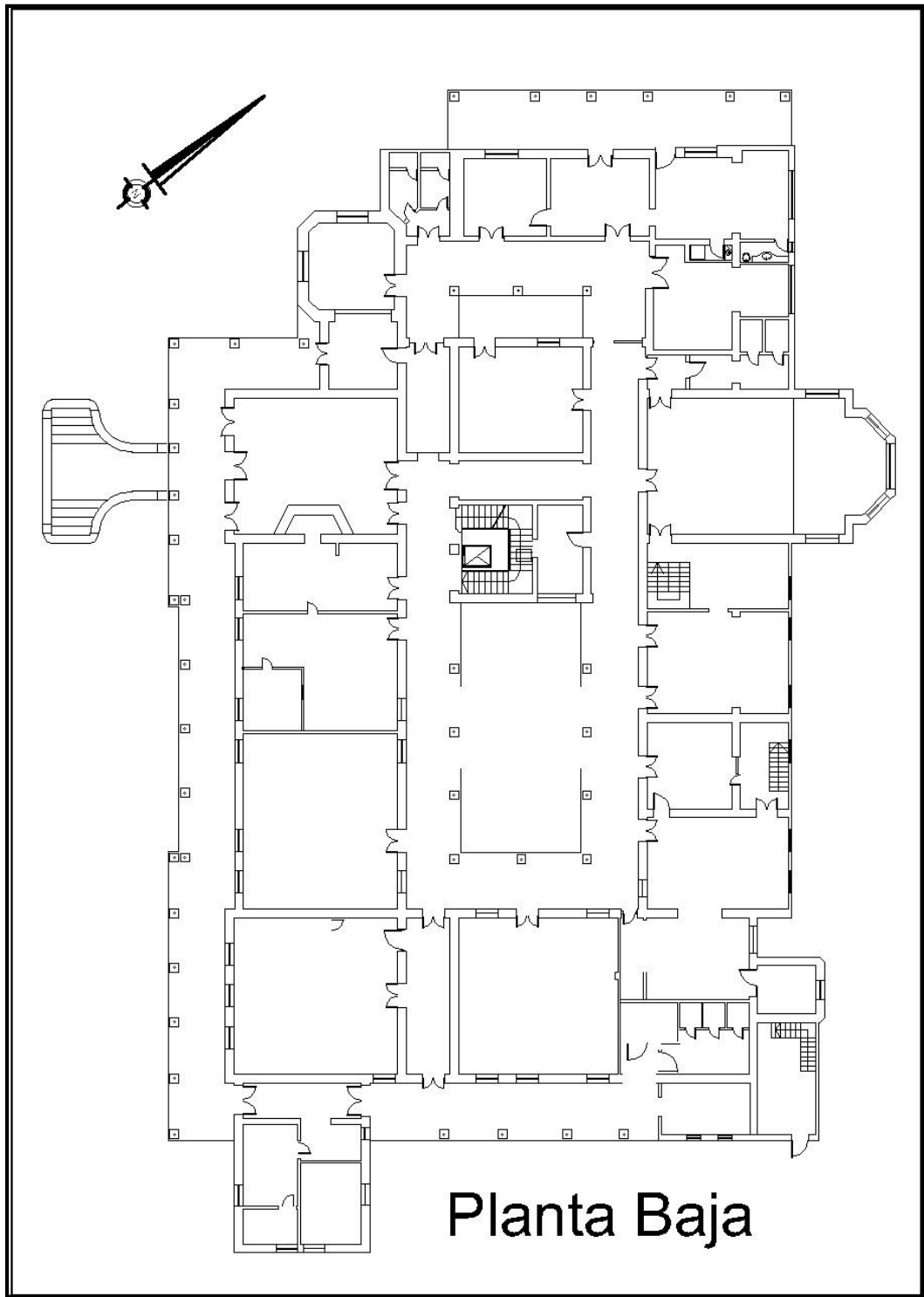
- GEORGE VOSSelman AND HANS-GERD MAAS. 2010. Airborne and Terrestrial LASER SCANNING. Whittles P, CRC Press. UK.
- JIE SHAN – CHARLES K. TOTH (ED.). 2009. Topographic Laser Ranging and Scanning. Principles and Processing. CRC Press.
- GEORGE L. HERITAGE and ANDREW R.G. LARGE. 2009. Laser Scanning for the Environmental Sciences. Blackwell Publishing Ltd. ISBN: 978-1-405-15717-9. 278pp.
- MATHIAS LEMMENS. 2011. Geo-information. Technologies, Applications and the Environment. Springer: Volumen 5
- PAUL D. GROVES. 2008. GNSS, Inertial, and multisensor Integrated. Navigation Systems. Artech House, Boston-London.
- ROBERTO MÜLLER. Compendio General de Topografía Teórico Práctica. Tomo III. Volumen I. Triangulación y Nivelación terrestre y subterránea. Cuarta Edición.
- Ingeniero en Geodesia y Cartografía JOSÉ JUAN ARRANZ JUSTEL (Tesis Doctoral) .2013. Diseño, optimización y análisis de sistemas basados en técnicas láser, para el modelado geométrico, registro y documentación, aplicados a entidades de interés patrimonial. Universidad Politécnica de Madrid.
- ALMA DELIA ORTIZ REYES (Postgrado en Ciencias Forestales). 2014. Estimación de variables dasométricas mediante tecnología LiDAR. Montecillo, Texcoco, Estado de México.
- SERGIO GALVÁN PINEDA. (Tesis: para obtener el título de Ingeniero Geomático). 2014. "El sistema LiDAR aplicado a la Geomática, generando modelos digitales de elevación (MDE)." Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería. 81pp.
- JAVIER ESTORNELL CREMADES (Tesis Doctoral). Junio 2011. Análisis de los factores que influyen en la precisión de un MDE y estimación de parámetros forestales en zonas arbustivas de montaña mediante datos LiDAR. Universidad Politécnica de Valencia. 152pp.
- ANTONIO SAN JOSÉ ALBACETE. (Trabajo Final Master en Tecnologías de la Información Geográfica). 2011. Procesamiento de datos LiDAR con ArcGIS Desktop 10. Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Geografía e Historia.

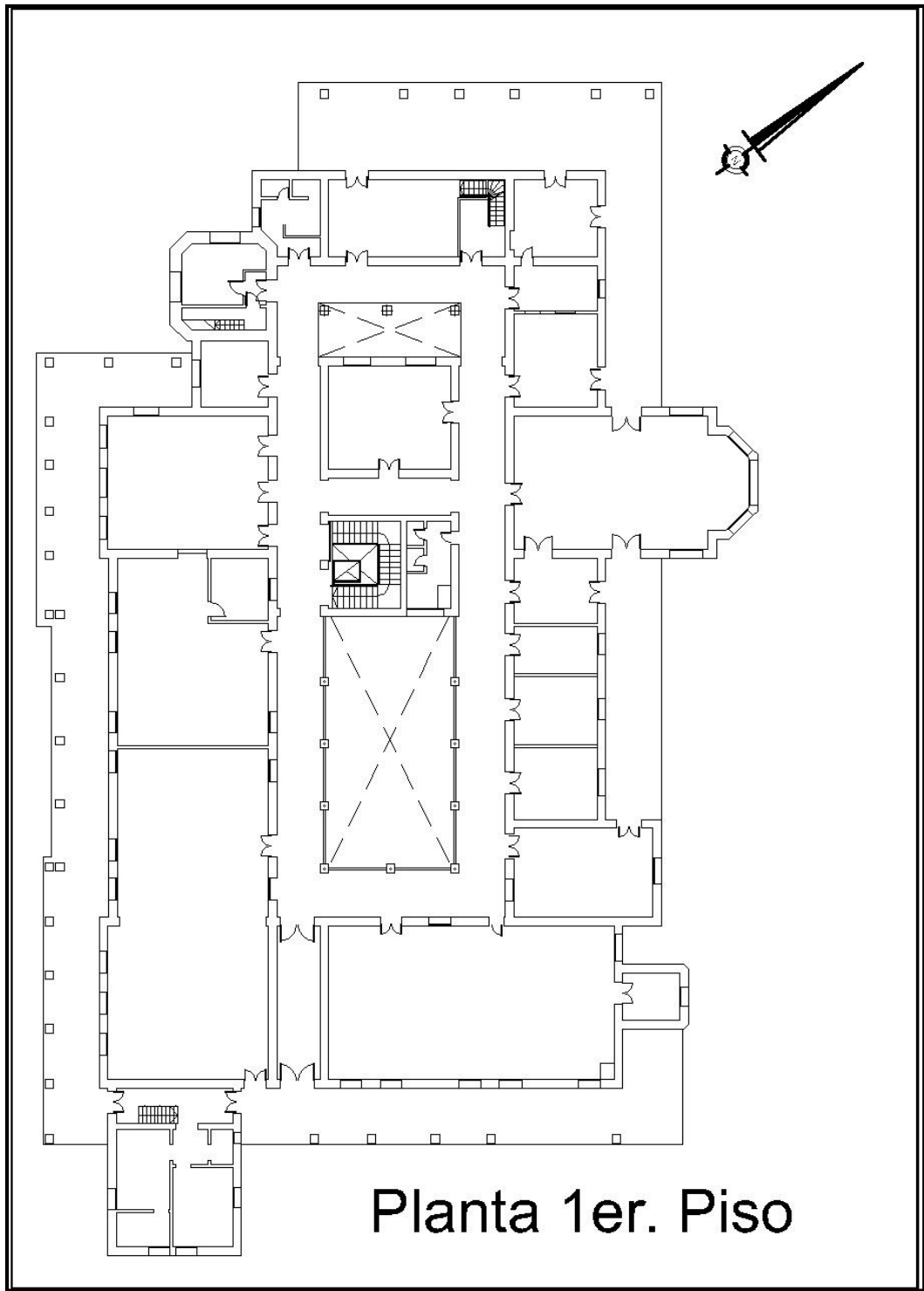
- SÁNCHEZ LOPERA, J., LERMA GARCÍA, J. L. (2012): “Actualización de cartografía catastral urbana mediante LiDAR y SIG”, GeoFocus (Artículos), nº 12, p. 53-70. ISSN: 1578-5157. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica.
- FARO. Octubre de 2012. Faro Laser Scanner Focus 3D. Manual del usuario.
- FARO. Junio de 2014. SCENE 5.3. Manual del usuario.
- TRIMBLE. Noviembre de 2014. Trimble RealWorks 9.0. Manual del usuario.
- Sitio Oficial POSGAR 07, Septiembre 2015. <http://www.ign.gob.ar/>.
- Novedades sobre LiDAR. Año 2015. <http://blog.lidarnews.com/>

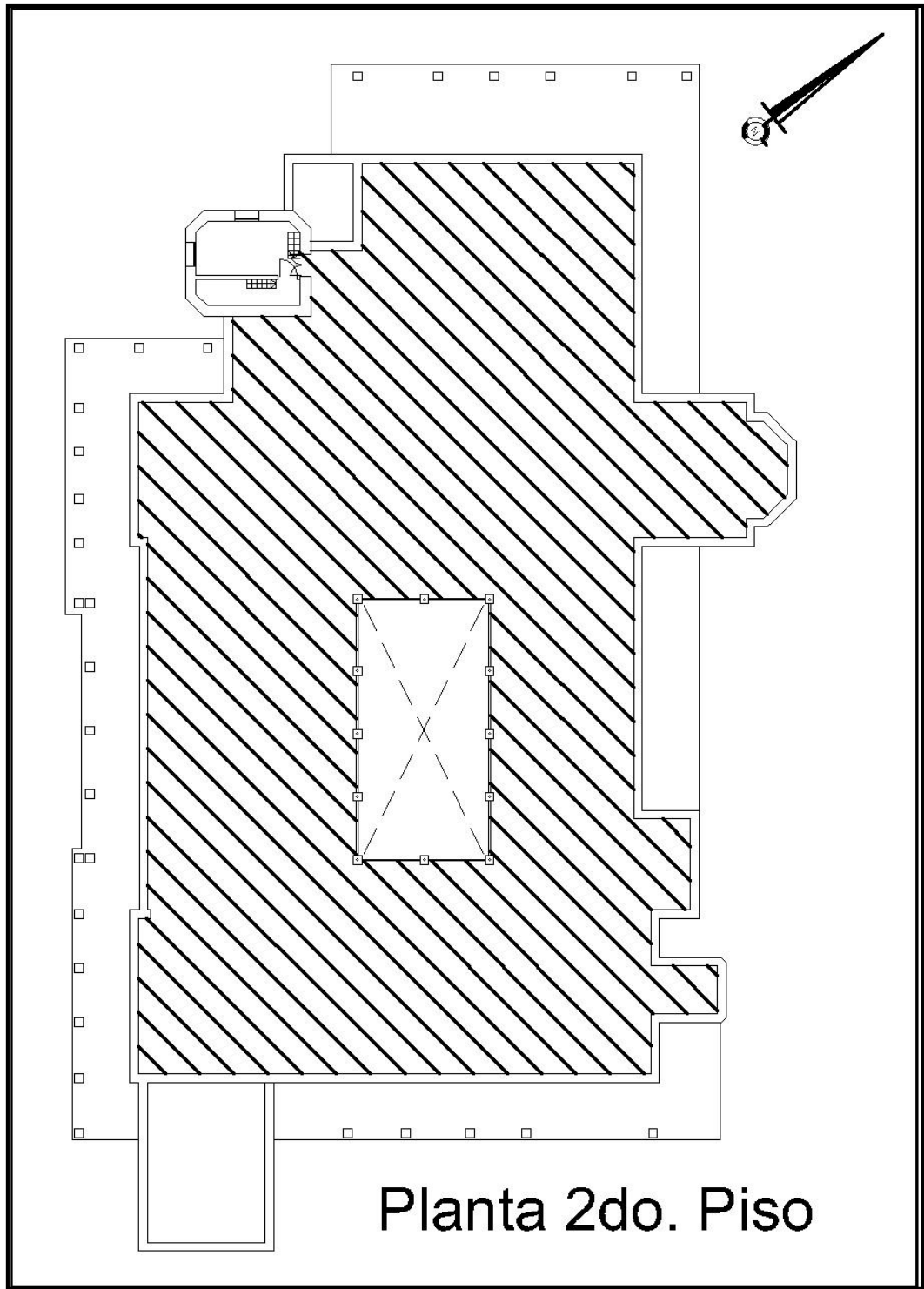
## 7. ANEXOS

### 7.1. Anexo I

- Planos de las plantas del Edificio Central de la Facultad de Ingeniería.







## **7.2. Anexo II**

- Monografías de puntos fijos de la poligonal planialtimétrica
- Planilla de nivelación. Transporte de cota de PF IV Facultad de Química – PF1
- Planilla de nivelación. Transporte de cota PF1-PF2-PF3-PF4-PF5-PF6-PF7-PF8-PF9-PF10.
- Planillas de observación GNSS y esquemas de obstrucciones.
- Formulario de Información de la Estación GNSS Permanente LPGS.

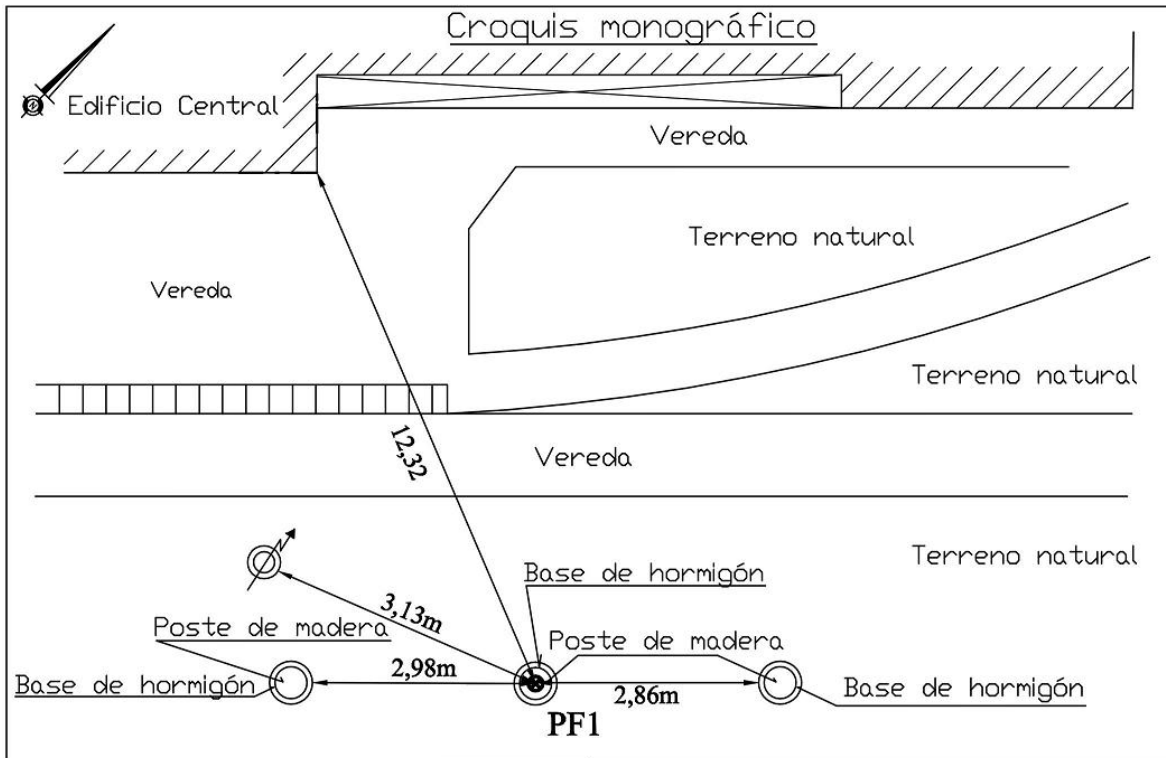


Foto de detalle



Foto general



Nombre del punto: <b>PF1</b>			Observaciones: Foto de detalle, vista planta.
Punto medido con:	Estación Total	X	
	Nivel	X	
	Equipo GNSS		



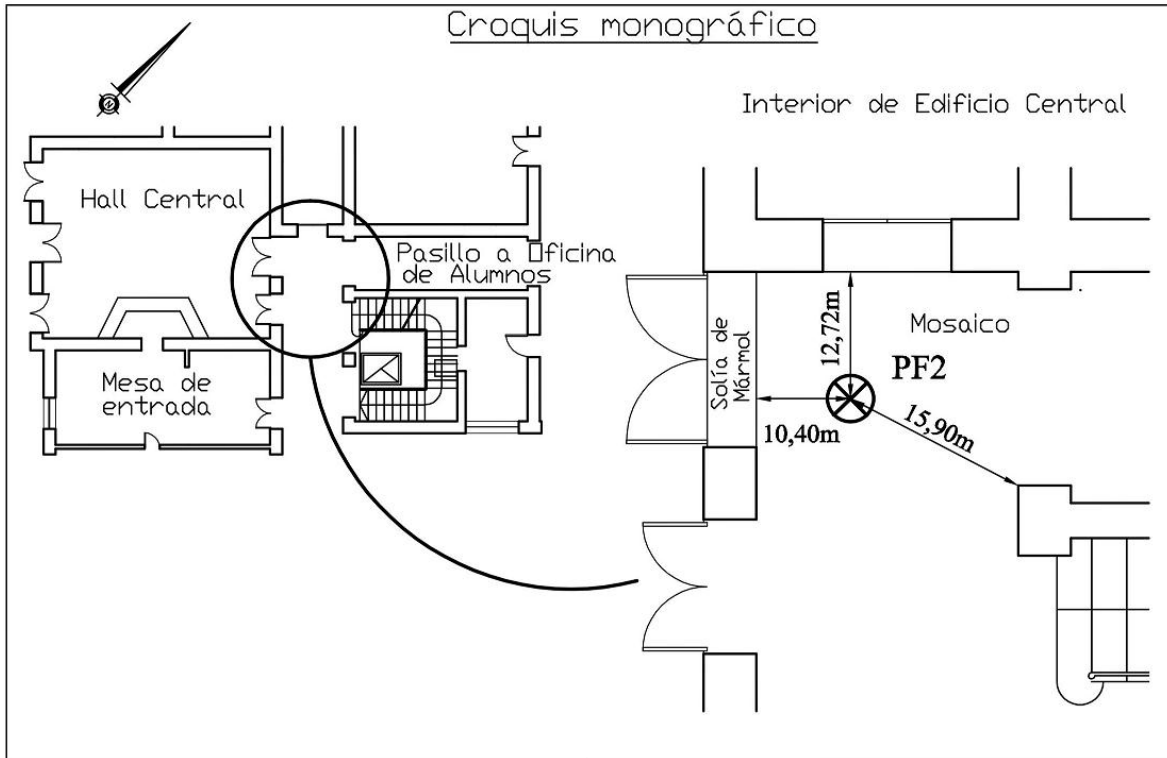


Foto de detalle



Foto general



Nombre del punto: **PF2**

Observaciones:

Punto medido con:

Estación Total	<input checked="" type="checkbox"/>
Nivel	<input checked="" type="checkbox"/>
Equipo GNSS	<input type="checkbox"/>

Foto de detalle, vista planta.

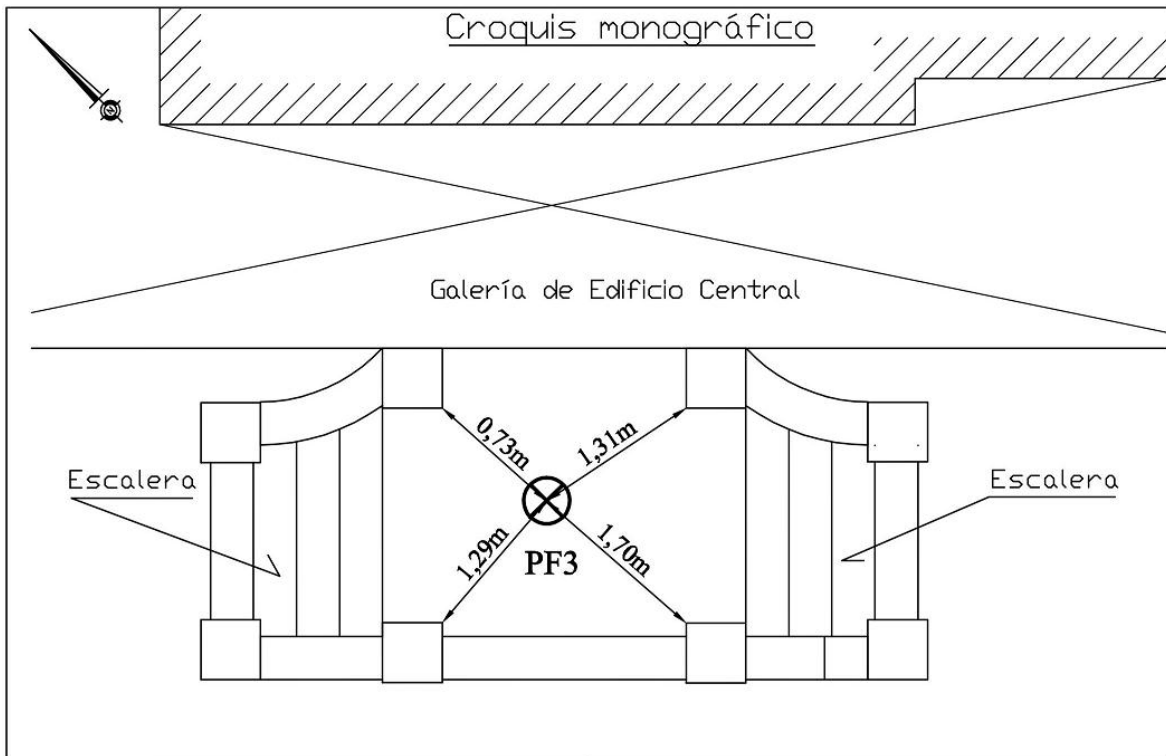


Foto de detalle



Foto general



Nombre del punto: <b>PF3</b>			Observaciones: Foto de detalle, vista planta.
Punto medido con:	Estación Total	X	
	Nivel	X	
	Equipo GNSS		

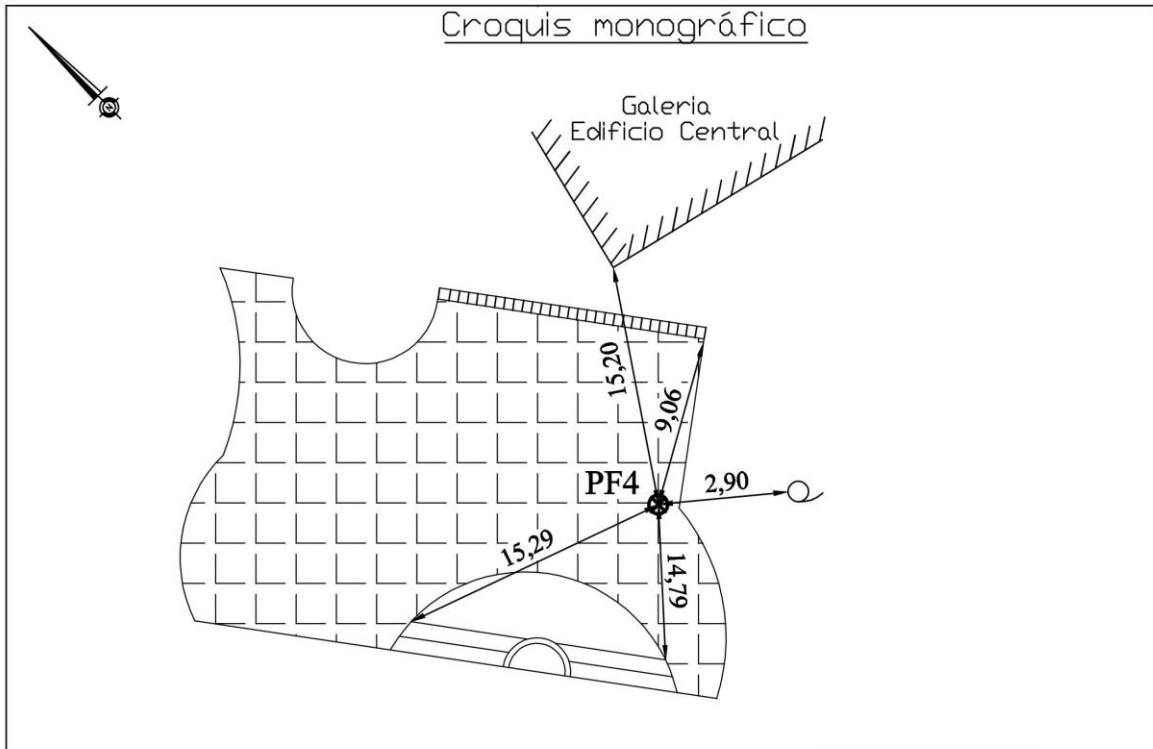


Foto de detalle



Foto general



Nombre del punto: <b>PF4</b>		Observaciones: Foto de detalle, vista planta.	
Punto medido con:	Estación Total		X
	Nivel		X
	Equipo GNSS		

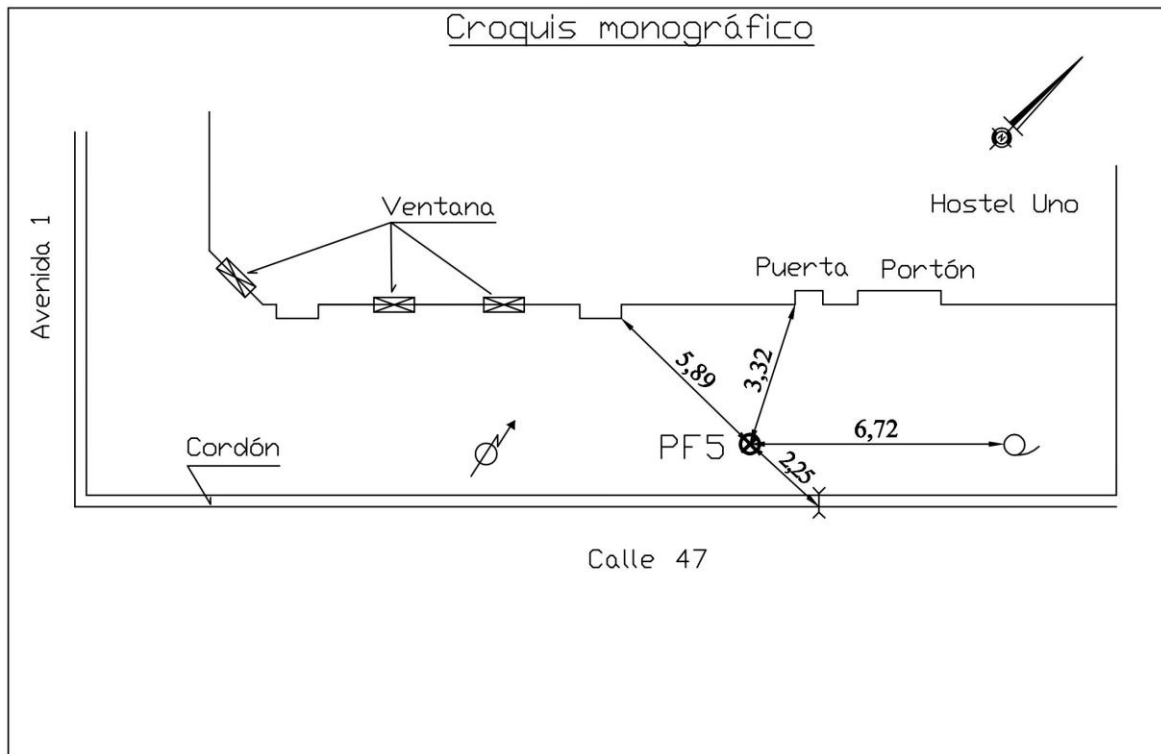


Foto de detalle



Foto general



Nombre del punto: <b>PF5</b>		Observaciones: Foto de detalle, vista planta.	
Punto medido con:	Estación Total		<input checked="" type="checkbox"/>
	Nivel		<input checked="" type="checkbox"/>
	Equipo GNSS		<input checked="" type="checkbox"/>

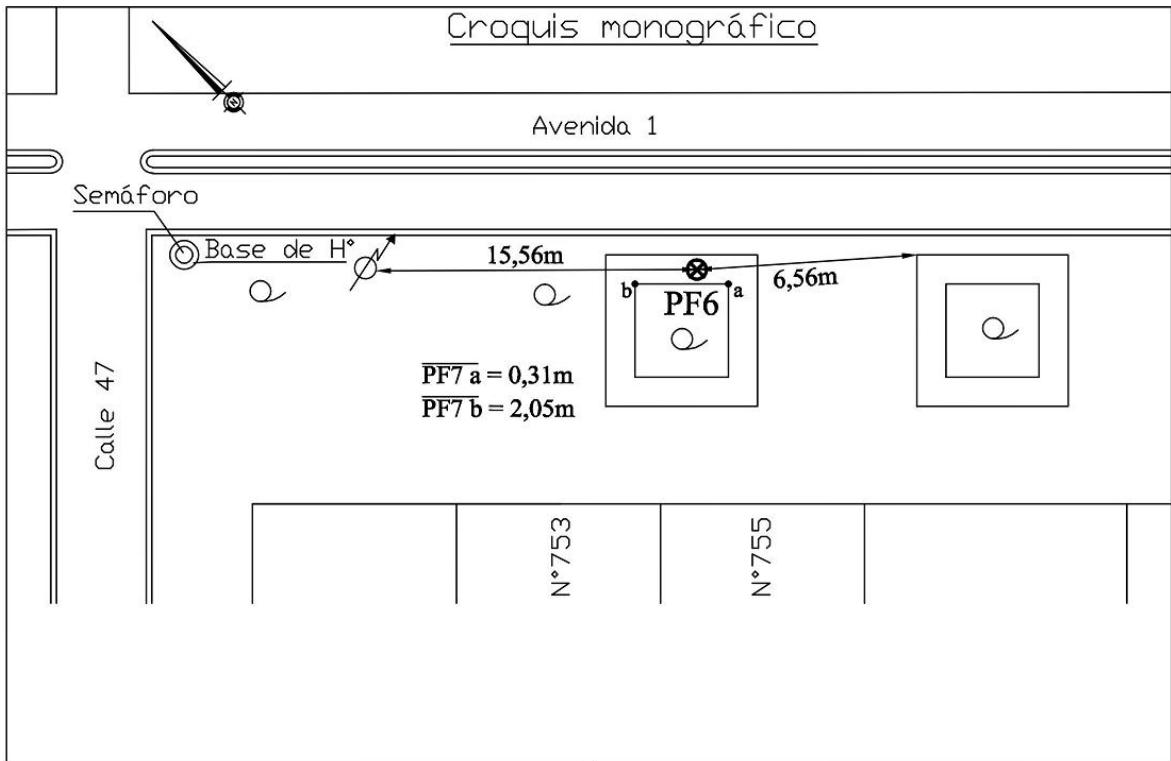


Foto de detalle



Foto general



Nombre del punto: <b>PF6</b>		Observaciones: Foto de detalle, vista planta.	
Punto medido con:	Estación Total		X
	Nivel		X
	Equipo GNSS		

Croquis monográfico								
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; width: 40%; height: 100px; margin-bottom: 5px;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 40%; height: 100px; margin-bottom: 5px;"></div> </div> <p align="center">Calle 48</p>								
<u>Foto de detalle</u>	<u>Foto general</u>							
Nombre del punto: <b>PF7</b>		Observaciones:						
Punto medido con:	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px;">Estación Total</td> <td style="text-align: center; padding: 2px;"><input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Nivel</td> <td style="text-align: center; padding: 2px;"><input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Equipo GNSS</td> <td style="text-align: center; padding: 2px;"><input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> </table>	Estación Total	<input checked="" type="checkbox"/>	Nivel	<input checked="" type="checkbox"/>	Equipo GNSS	<input checked="" type="checkbox"/>	Foto de detalle, vista planta.
Estación Total	<input checked="" type="checkbox"/>							
Nivel	<input checked="" type="checkbox"/>							
Equipo GNSS	<input checked="" type="checkbox"/>							

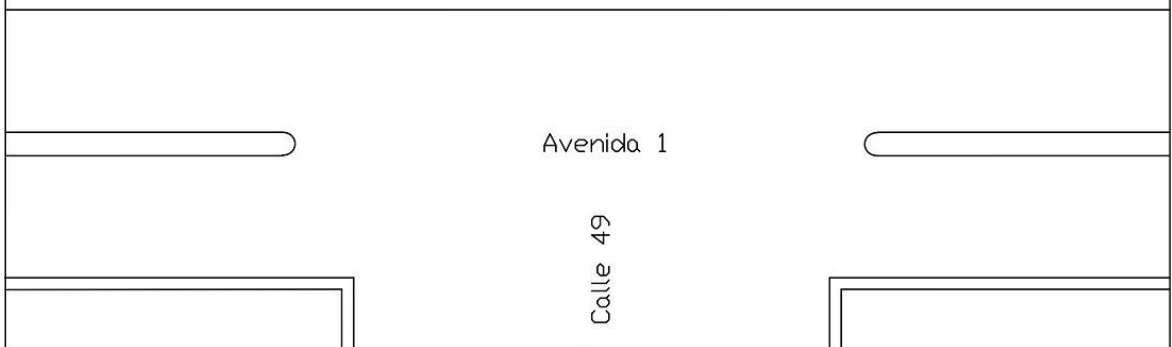
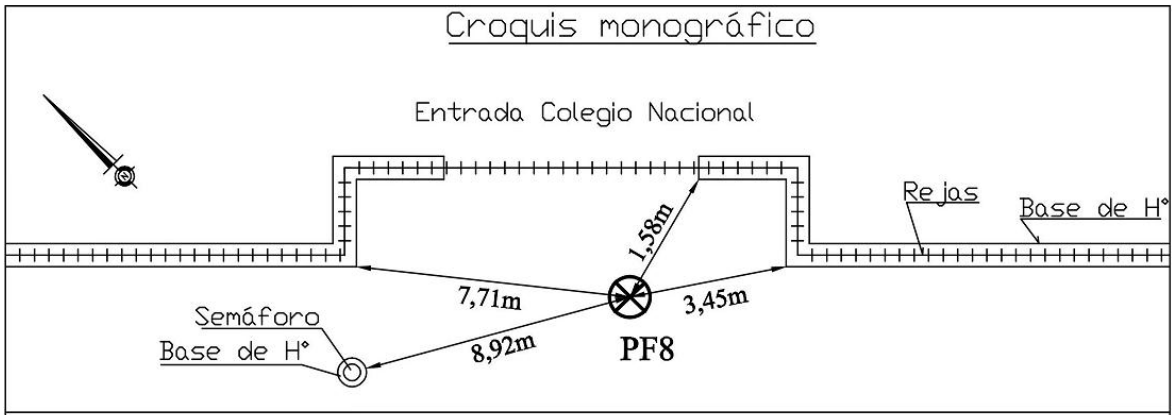


Foto de detalle



Foto general



Nombre del punto: **PF8**

Observaciones:

Punto medido con:	Estación Total	<input checked="" type="checkbox"/>
	Nivel	<input checked="" type="checkbox"/>
	Equipo GNSS	<input type="checkbox"/>

Foto de detalle, vista planta.

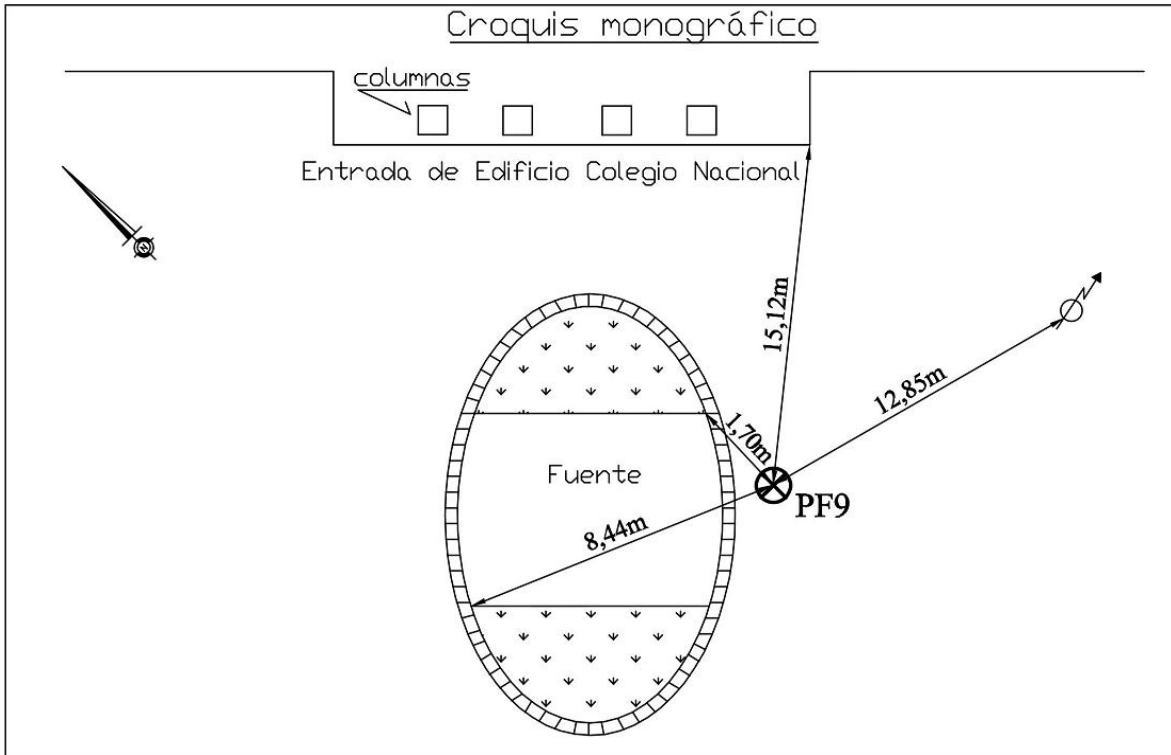


Foto de detalle

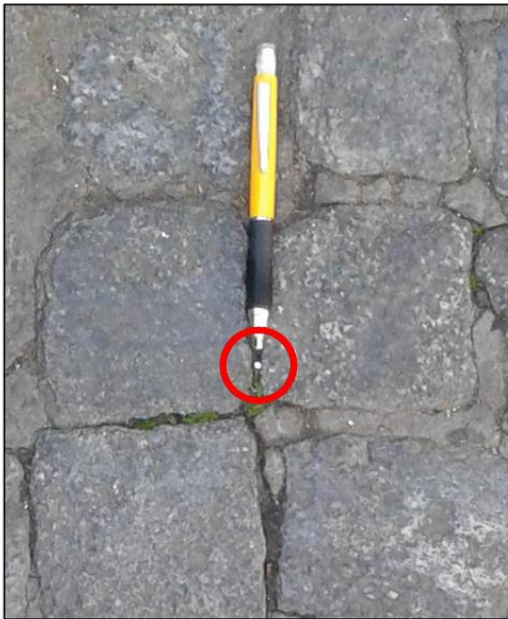


Foto general



Nombre del punto: **PF9**

Observaciones:

Punto medido con:

Estación Total	X
Nivel	X
Equipo GNSS	X

Foto de detalle, vista planta.



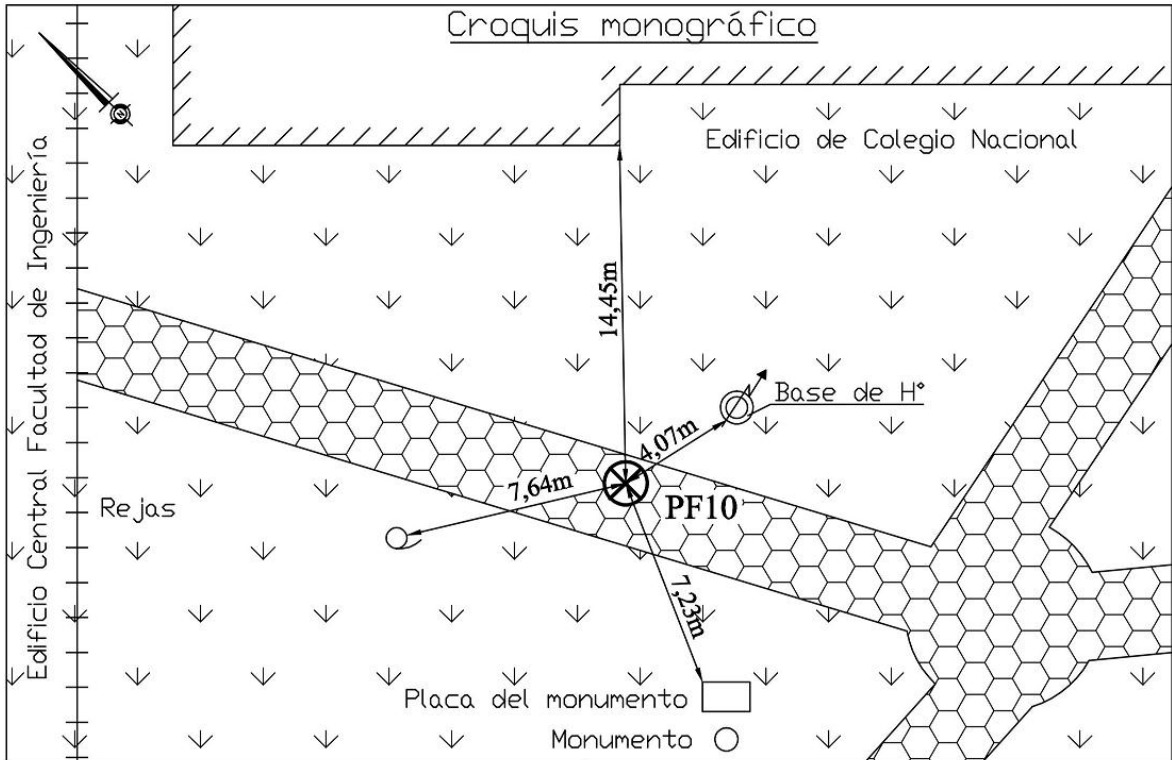


Foto de detalle



Foto general



Nombre del punto: **PF10**

Observaciones:

Punto medido con:

Estación Total

Foto de detalle, vista planta.

Nivel

Equipo GNSS

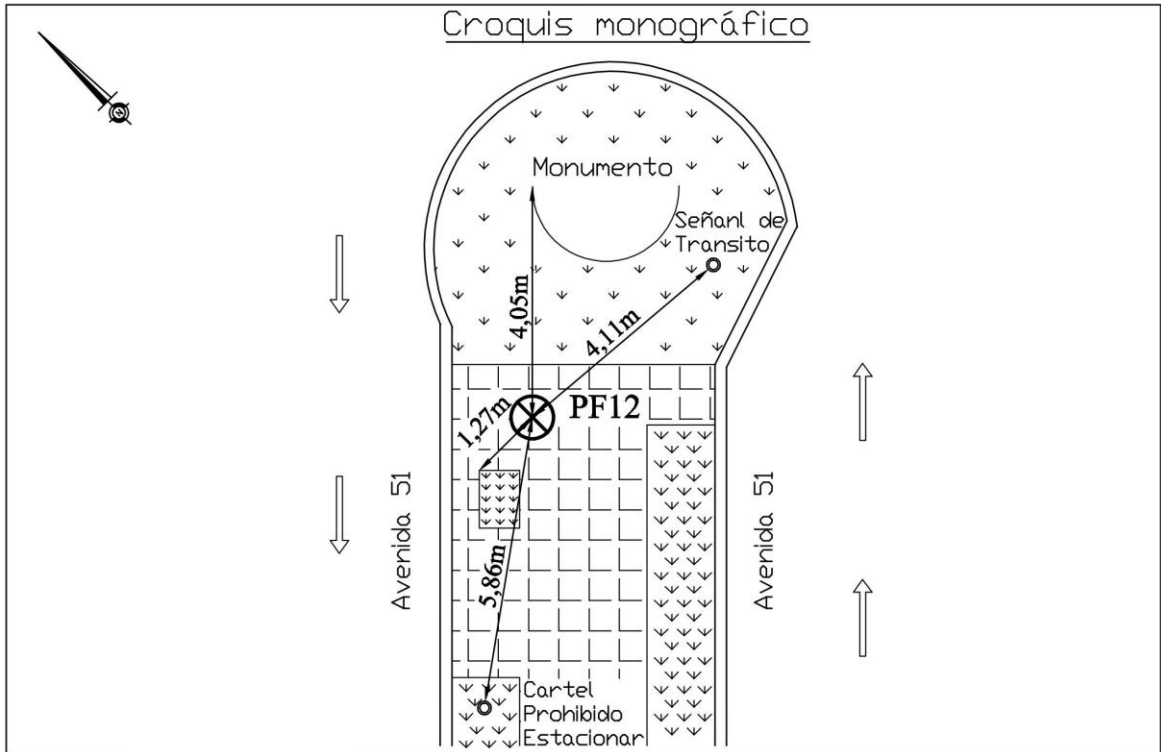


Foto de detalle



Foto general



Nombre del punto: <b>PF12</b>		Observaciones: Foto de detalle, vista planta.	
Punto medido con:	Estación Total		<input checked="" type="checkbox"/>
	Nivel		<input type="checkbox"/>
	Equipo GNSS		<input checked="" type="checkbox"/>

Transporte de cota - PF IV Fac. Química - PF1

Estaciones	Puntos Visados	Distancias medidas		Lecturas de nivel				Diferencias de nivel +/- Δh		Cotas Provisorias	Corrección	Cotas Corregidas	
		En pasos	En metros	Lect. atrás		Lect. adelante							
				hs + hi	hm	hs + hi	hm						
		hs	hs										
hi	hi												
hs - hi	hs - hi												
				+									
E1	P.F. IV Fac. Química	36	30,00	2,500	1,250			0,524	---	19,591	---	19,591	
			1,400										
		1,100											
		0,300											
	P.F. I	36	29,50			1,451	0,726			20,115	---	20,115	
						0,873							
						0,578							
						1,400							
E2	P.F. I	37	29,90	1,317	0,659			---	0,524	19,591	---	19,591	
				0,808									
				0,509									
				0,299									
	P.F. IV Fac. Química	37	30,30			2,367	1,183			19,591	---	19,591	
						1,335							
						1,032							
						0,303							
		Σ= 119,70		Σ= 1,909		Σ= 1,909							

Distancia = |hs - hi| × K + C; K=100 - C=0

e= error de cierre = cota deducida - cota verdadera = Σ lect. atrás - Σ lect. adelante

c= corrección a aplicar a la nivelación = -e

Transporte de cota - PF1 - PF2 - PF3 - PF4 - PF5 - PF6 - PF7 - PF8 - PF9 - PF10

Estaciones	Puntos Visados	Distancias medidas		Lecturas de nivel				Diferencias de nivel +/- Δh		Cotas Provisionarias	Corrección (mm)	Cotas Corregidas
				Lect. atrás		Lect. adelante						
		En pasos	En metros	hs + hi	hm	hs + hi	hm					
				hs		hs						
hi	hi											
		hs - hi			hs - hi							
				+			-					
E1	P.F 1	39	27,30	2,293	1,147		1,589	---	0,442	20,115	---	20,115
				1,283								
				1,010								
				0,273								
E1	P.F 2	37	25,10			3,177				19,673	---	19,673
						1,714						
						1,463						
						0,251						
E2	P.F 2	---	5,30	3,201	1,600		1,671	---	0,071	19,602	---	19,602
				1,627								
				1,574								
				0,053								
E2	P.F 3	---	8,90			3,341				18,924	---	18,924
						1,715						
						1,626						
						0,089						
E3	P.F 3	15	10,50	1,845	0,922		1,600	---	0,678	18,924	---	18,924
				0,975								
				0,870								
				0,105								
E3	P.F 4	14	10,00			3,200				18,165	---	18,165
						1,650						
						1,550						
						0,100						
E4	P.F 4	38	27,20	2,224	1,112		1,871	---	0,759	18,165	---	18,165
				1,248								
				0,976								
				0,272								
E4	P.F 5	37	26,90			3,741				18,684	-2	18,682
						2,005						
						1,736						
						0,269						
E5	P.F 5	44	30,50	3,359	1,680		1,161	0,519	---	18,684	-2	18,682
				1,832								
				1,527								
				0,305								
E5	P.F 6	44	25,70			2,321				18,684	-2	18,682
						1,289						
						1,032						
						0,257						

**Transporte de cota - PF1 - PF2 - PF3 - PF4 - PF5 - PF6 - PF7 - PF8 - PF9 - PF10**

Estaciones	Puntos Visados	Distancias medidas		Lecturas de nivel				Diferencias de nivel +/- Δh		Cotas Provisorias	Corrección (mm)	Cotas Corregidas
				Lect. atrás		Lect. adelante						
		En pasos	En metros	hs + hi	hm	hs + hi	hm					
				hs		hs						
hi	hi											
hs - hi	hs - hi											
		+	-									
E6	P.F 6	56	38,40	3,340 1,862 1,478 0,384	1,670	/	/	0,791	---	18,684	-2	18,682
	P.F 7	56	37,90	/	/	1,757 1,068 0,689 0,379	0,879			19,475	-2	19,473
E7	P.F 7	---	54,90	3,127 1,838 1,289 0,549	1,563	/	/	0,286	---	19,761	-2	19,759
	P.F 8	---	49,50	/	/	2,553 1,524 1,029 0,495	1,277			19,561	-2	19,559
E8	P.F 8	15	9,50	2,633 1,364 1,269 0,095	1,316	/	/	---	0,200	19,743	-3	19,740
	P.F 9	15	10,20	/	/	3,032 1,567 1,465 0,102	1,516			19,743	-3	19,740
E9	P.F 9	44	33,10	3,429 1,880 1,549 0,331	1,714	/	/	0,182	---	19,743	-3	19,740
	P.F 10	40	26,20	/	/	3,064 1,663 1,401 0,262	1,532			20,118	-3	20,115
E10	P.F 10	35	24,90	2,511 1,380 1,131 0,249	1,255	/	/	0,375	---	20,118	-3	20,115
	P.F 1	34	23,80	/	/	1,760 0,999 0,761 0,238	0,880					
		Σ= 505,80		Σ= 13,979		Σ= 13,976						

Distancia =  $hs - hi \times K + C$ ;  $K=100 - C=0$

e= error de cierre = cota deducida - cota verdadera =  $\Sigma$  lect. atrás -  $\Sigma$  lect. adelante =  $20,118 - 20,115 = (+) 0,003m$

c= corrección a aplicar a la nivelación = -e = (-) 0,003m

"Agrimensura 3D con tecnología LiDAR"

Planilla de medición GNSS

081015  
Fecha

281 1  
Día del Sesión  
año

Proyecto: Trabajo Final "Agrimensura 3D con Tecnología LiDAR"

PUNTO

Nombre del punto: PF5  
Sitio: Calle 47 entre 1 y 115

POSICIONAMIENTO

Hora inicio	Hora final
09:10	11:00
Latitud:	34° 54' 25,90"
Longitud:	57° 56' 44,74"
Tipo de altura	Inclinada <input type="checkbox"/> Vertical <input checked="" type="checkbox"/>
Inicio:	1,690 m
Final:	1,690 m
Int. de registro: 15 seg	
Angulo de corte: 10°	

EQUIPO

	Marca	Modelo
Receptor	Topcon	Hiper +
Antena		

Fotos del posicionamiento

Al Norte



Al Este



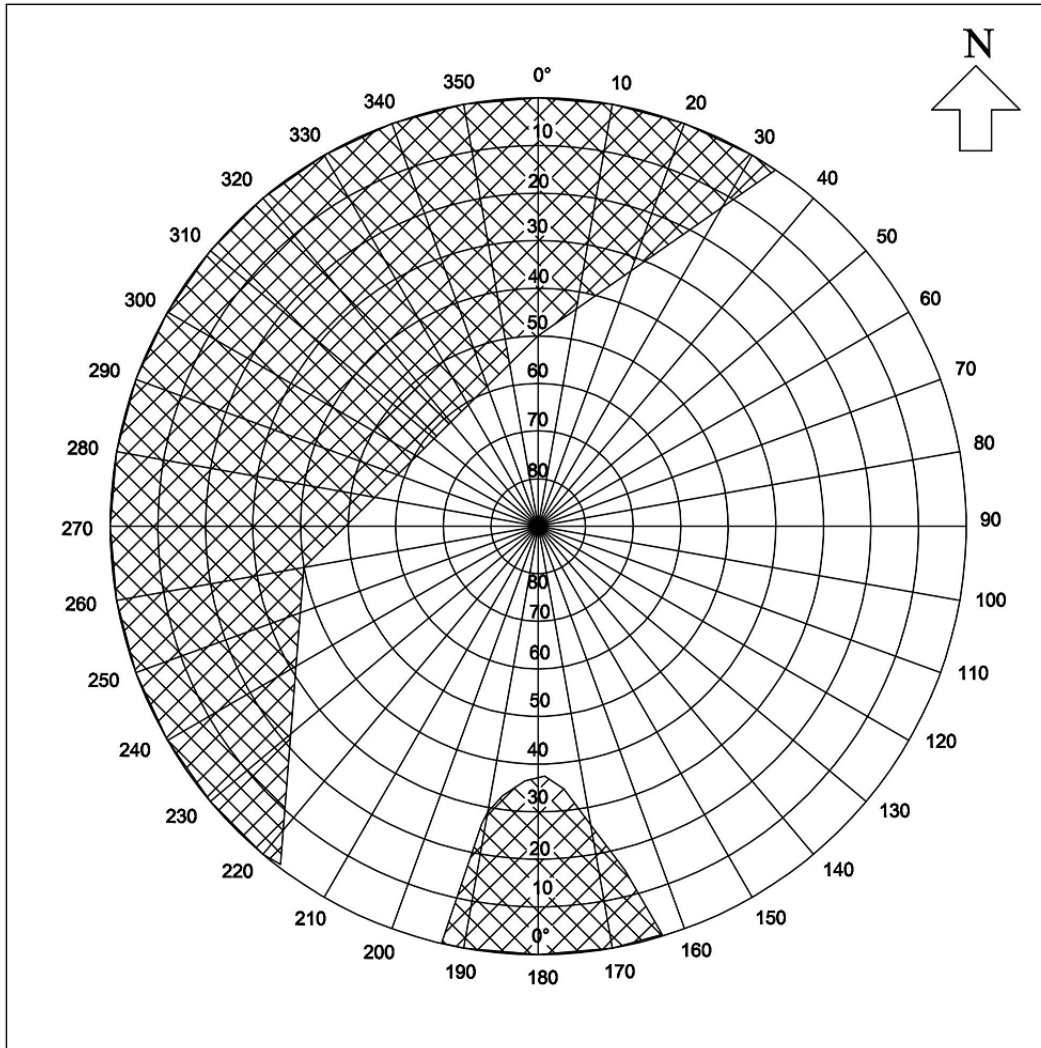
"Agrimensura 3D con tecnología LiDAR"

Proyecto: Trabajo Final "Agrimensura  
3D con Tecnología LiDAR"

Nombre del punto: PF5

Fecha: 08/10/2015

ESQUEMA DE OBSTRUCCIONES PARA OBSERVACION GNSS



Comentarios: Las obstrucciones son producidas por el edificio de Hostel 1 y árboles cercanos.

"Agrimensura 3D con tecnología LiDAR"

Planilla de medición GNSS

081015  
Fecha

281 2  
Día del Sesión  
año

Proyecto: Trabajo Final "Agrimensura 3D con Tecnología LiDAR"

PUNTO

Nombre del punto: PF9  
Sitio: entrada Colegio Nacional

POSICIONAMIENTO

Hora inicio	Hora final
11:30	13:30
Latitud:	34° 54' 30,46"
Longitud:	57° 56' 38,33"
Tipo de altura	Inclinada <input type="checkbox"/> Vertical <input checked="" type="checkbox"/>
Inicio:	1,700 m
Final:	1,700 m
Int. de registro:	15 seg
Angulo de corte:	10°

EQUIPO

	Marca	Modelo
Receptor	Topcon	Hiper +
Antena		

Fotos del posicionamiento

Al Norte



Al Este



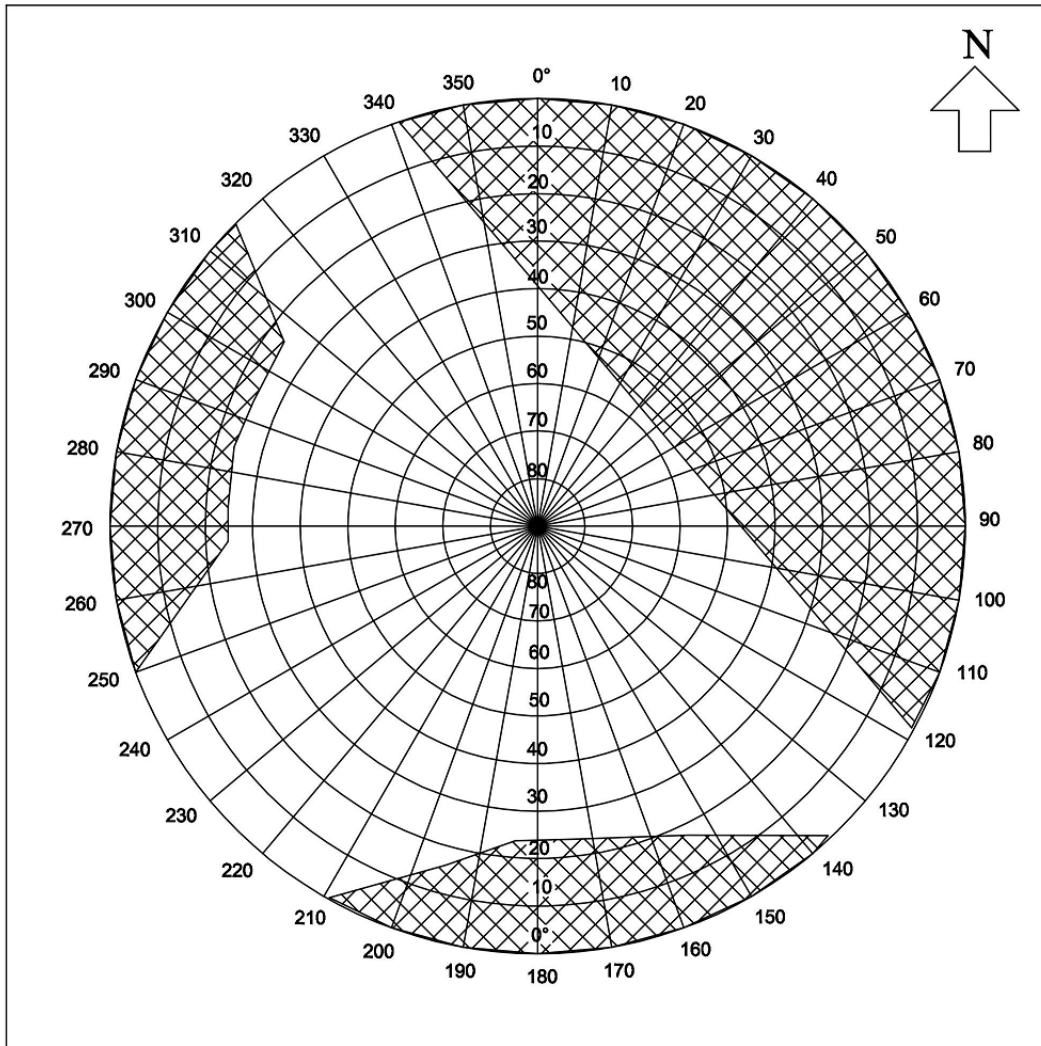


Proyecto: Trabajo Final "Agrimensura  
3D con Tecnología LiDAR"

Nombre del punto: PF9

Fecha: 08/10/2015

ESQUEMA DE OBSTRUCCIONES PARA OBSERVACION GNSS



Comentarios: Las obstrucciones son producidas por el edificio del Colegio Nacional y árboles cercanos.

"Agrimensura 3D con tecnología LiDAR"

Planilla de medición GNSS

081015

Fecha

281

Día del  
año

1/2

Sesión

Proyecto: Trabajo Final "Agrimensura  
3D con Tecnología LiDAR"

PUNTO

Nombre del punto: PF12
Sitio: Boulevard Calle 51l

EQUIPO

	Marca	Modelo
Receptor	Topcon	Legacy
Antena	Topcon	Legant 2

POSICIONAMIENTO

Hora inicio	Hora final
09:35	13:19
Latitud:	34° 54' 35,59"
Longitud:	57° 56' 35,12"
Tipo de altura	Inclinada <input type="checkbox"/> Vertical <input checked="" type="checkbox"/>
Inicio:	1,627 m
Final:	1,627 m
Int. de registro:	15 seg
Angulo de corte:	10°

Fotos del posicionamiento

Al Norte



Al Este



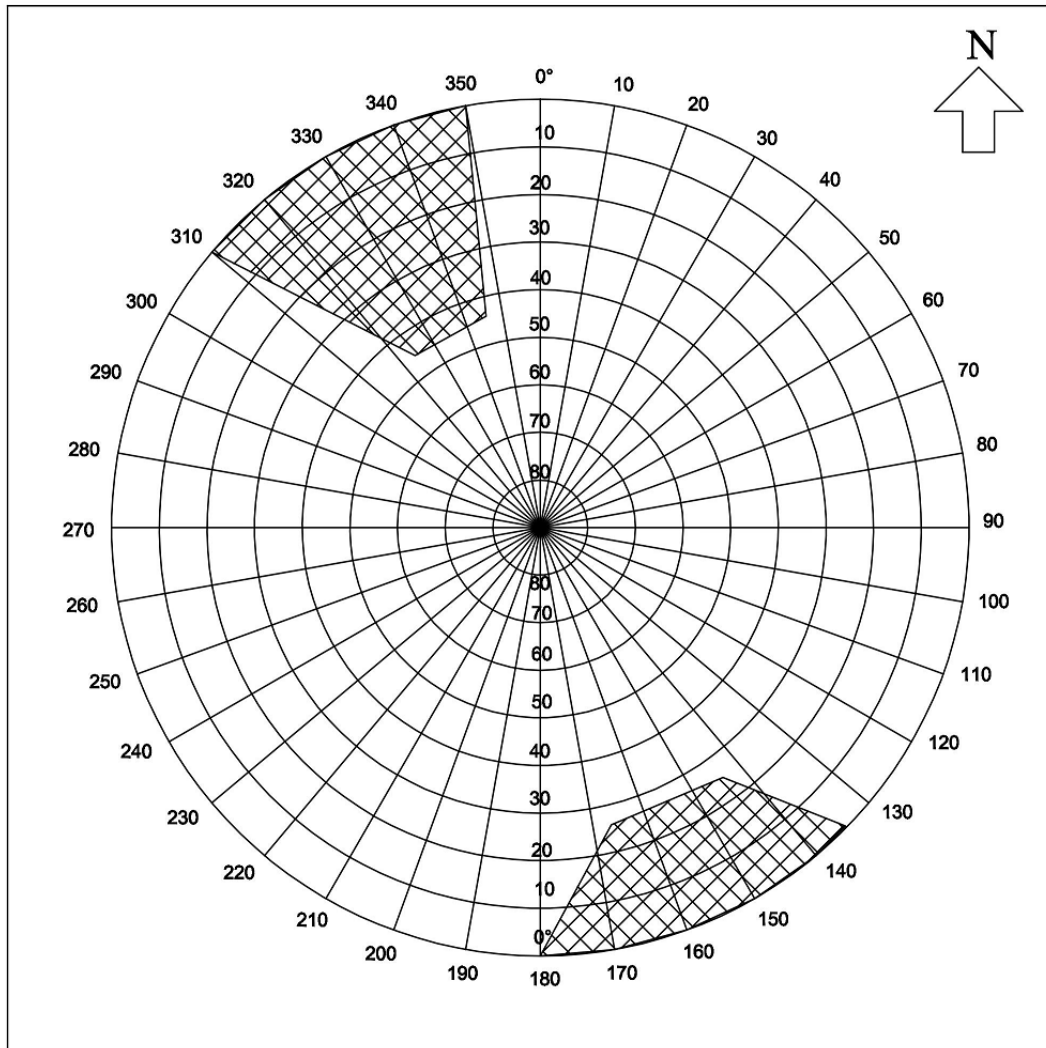
"Agrimensura 3D con tecnología LiDAR"

Proyecto: Trabajo Final "Agrimensura  
3D con Tecnología LiDAR"

Nombre del punto: PF12

Fecha: 08/10/2015

ESQUEMA DE OBSTRUCCIONES PARA OBSERVACION GNSS



Comentarios: Las obstrucciones son producidas por árboles cercanos.



## **Formulario de Información de la Estación GNSS Permanente LPGS**

### **1. FORMULARIO.**

**Preparado por:** Instituto Geográfico Nacional de Argentina.  
**Creado:** 5 de septiembre de 2007.  
**Actualización:** 18 de octubre de 2012.

### **2. INFORMACIÓN DE LA ESTACIÓN GNSS.**

**Nombre de la Estación:** Universidad de La Plata.  
**Identificación de la Estación:** LPGS.  
**Código Internacional:** 41510M001.  
**Información Adicional:** Esta estación pertenece a la Red IGS (Internacional GNSS Service) y a la Red SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas).  
**Institución a cargo del mantenimiento:** Universidad de La Plata.  
**Responsable del mantenimiento:** Raúl Perdomo / Luciano Mendoza  
**e-mail:** [perdomo@fcaglp.unlp.edu.ar](mailto:perdomo@fcaglp.unlp.edu.ar) / [lmendoza@fcaglp.unlp.edu.ar](mailto:lmendoza@fcaglp.unlp.edu.ar)  
**Propietario del instrumento:** GFZ Potsdam.

### **3. INFORMACIÓN SOBRE LA LOCALIZACIÓN.**

**Provincia:** Buenos Aires.  
**Ciudad:** La Plata.  
**Tipo de Monumentación:** Pilar de hormigón.



*RAMSAC - Instituto Geográfico Nacional*

**4. COORDENADAS.**

**Geodésicas:**

MARCO DE REFERENCIA POSGAR 07 (Época 2006.632)			
Latitud	Longitud	Altura Elipsoidal [m]	Cota [m]
34° 54' 24.28241" S	57° 55' 56.27834" W	29.875	13.799
MARCO DE REFERENCIA POSGAR 94 (Época 1993.800)			
Latitud	Longitud	Altura Elipsoidal [m]	Cota [m]
34° 54' 24.3043" S	57° 55' 56.2795" W	29.336	13.799

**Cartesianas:**

MARCO DE REFERENCIA POSGAR 07 (Época 2006.632)					
X [m]	Y [m]	Z [m]	Vx [m/año]	Vy [m/año]	Vz [m/año]
2780103.004	-4437418.936	-3629404.502	0.0040	-0.0075	0.0078

**Errores en metros:**  $\sigma_x = \pm 0.005$ ,  $\sigma_y = \pm 0.005$ ,  $\sigma_z = \pm 0.005$

**5. INFORMACIÓN DEL EQUIPAMIENTO GPS.**

**Receptor 1:**

Modelo: AOA TurboRogue SNR-8000.  
 Código IGS: ROGUE SNR-8000.  
 Sistema de satélites: GPS.  
 N° de Serie: 285.  
 Versión de Firmware: 3.2.  
 Fecha de Instalación: 20 de mayo de 1995.



**Receptor 2:**

Modelo: AOA TurboRogue SNR-8000 ACT.  
 Código IGS: AOA SNR-8000 ACT.  
 Sistema de satélites: GPS.  
 N° de Serie: 290.  
 Versión de Firmware: 3.3.32.3.  
 Fecha de Instalación: 9 de septiembre de 1999.

**Receptor 3:**

Modelo: AOA Benchmark ACT.  
 Código IGS: AOA BENCHMARK ACT.  
 Sistema de satélites: GPS.  
 N° de Serie: 1118.  
 Versión de Firmware: 3.3.32.2N.  
 Fecha de Instalación: 7 de septiembre de 2000.



**Receptor 4:**

Modelo: Topcon NetG3.  
 Código IGS: TPS NETG3.  
 Sistema de satélites: GPS + GLONASS.  
 N° de Serie: 01120.  
 Versión de Firmware: 3.4p2.  
 Fecha de Instalación: 15 de marzo de 2012.



**Receptor 5:**

Modelo: Javad Delta-G3T.  
 Código IGS: JAVAD TRE\_G3TH DELTA.  
 Sistema de satélites: GPS + GLONASS + GALILEO.  
 Nº de Serie: 218.  
 Versión de Firmware: 3.4.4b0.  
 Fecha de Instalación: 4 de octubre de 2012.



**Antena 1:**

Tipo: AOA TurboRogue Dome Margolin.  
 Código: AOAD/M\_T  
 Nº de Serie: 367.  
 Altura de Antena [m]: 0.046 (Referida al A.R.P. – Antenna Reference Point).  
 Fecha de Instalación: 29 de febrero de 2000.



**Antena 2:**

Tipo: Topcon Choke Ring G3.  
 Código: TPSCR.G3  
 Nº de Serie: 383-0153.  
 Altura de Antena [m]: 0.069 (Referida al A.R.P. – Antenna Reference Point).  
 Fecha de Instalación: 15 de marzo de 2012.

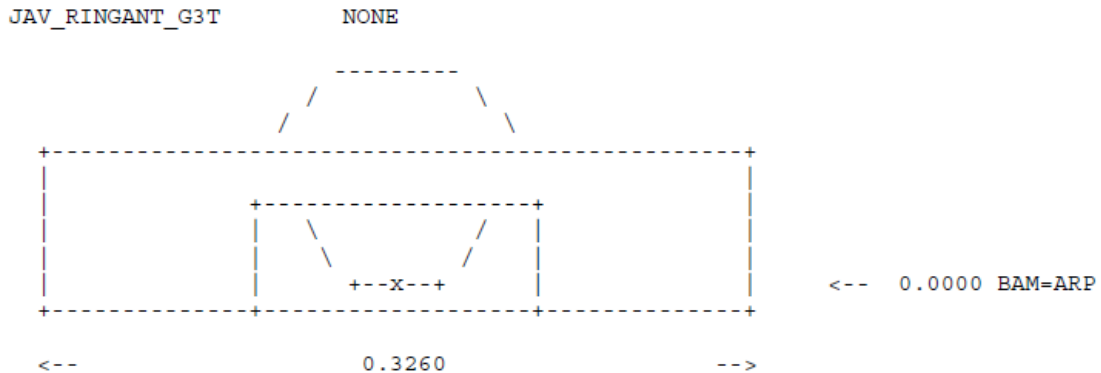


**Antena 3:**

Tipo: Javad RingAnt-G3T.  
 Código: JAV\_RINGANT\_G3T.  
 Nº de Serie: 344.  
 Altura de Antena [m]: 0.069 (Referida al A.R.P. – Antenna Reference Point).  
 Fecha de Instalación: 4 de octubre de 2012.



**6. ESQUEMA DE ANTENA.**



DIMENSIÓN [mm]	REFERENCIA
49.04	Distancia del punto de referencia de la antena (ARP), al centro de fase de frecuencia L1.
54.72	Distancia del punto de referencia de la antena (ARP), al centro de fase de frecuencia L2.

Las correcciones a los centros de fase son absolutas y han sido extraídas del archivo de calibración IGS05 de la semana 1617.

## 7. INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA.

**Observables:** L1, L2, C1, P1, P2, S1, S2.  
**Intervalo de Registro:** 1, 5, 15 segundos.  
**Ángulo de Máscara:** 0°.  
**Formato de Archivo:** Rinex, compactado en formato Hatanaka.  
**Servidor de Búsqueda:** <http://ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/Ramsac/DescargaRinex>

## 8. INFORMACIÓN ADICIONAL.

*Para información técnica contactar a:*

**Nombre:** Agrim. Diego Piñón – Dirección de Geodesia – Instituto Geográfico Nacional.  
**Dirección:** Av. Cabildo N° 381 – C1426AAD – Ciudad Autónoma de Bs.As. – Argentina.  
**Teléfono:** (011) 4576-5576 Int.187.  
**Fax:** (011) 4576-5529.  
**E-mail:** [dpinon@ign.gob.ar](mailto:dpinon@ign.gob.ar)

### **7.3. Anexo III**

- Modelo de planilla diseñado para realizar los croquis de los objetivos referenciados.
- Planillas correspondientes a los relevamientos LiDAR.
- Medidas lineales tomadas con distanciómetro de mano.



Croquis de puntos referenciados

Sitio / Objeto:	
Fecha:	
Operador:	

Instrumental utilizado para la referenciación	
Tipo	Marca y características
Equipo GNSS	
Estación Total	
Prisma	
Nivel	

--	--

Est.	Nomb. Proy. Ppal.	Nomb. Relev.	Cantidad de ptos.	Instr.	Est.	Nomb. Proy. Ppal.	Nomb. Relev.	Cantidad de ptos.	Instr.
				Eq. GNSS					Eq. GNSS
				E.T					E.T
				Nivel					Nivel

--	--

Est.	Nomb. Proy. Ppal.	Nomb. Relev.	Cantidad de ptos.	Instr.	Est.	Nomb. Proy. Ppal.	Nomb. Relev.	Cantidad de ptos.	Instr.
				Eq. GNSS					Eq. GNSS
				E.T					E.T
				Nivel					Nivel

**Planilla de observación - Relevamiento LIDAR**

Sitio / Objeto:	Edificio Central - FI - UNLP
Fecha:	19/09/2015
Operador:	FALIP, Sofia

Objetos de referencia utilizados para la ref. en sist. ext.			
Artificiales	Esferas	(e)	×
	Target	(t)	×
Naturales		(n)	

Est.	Nombre Proy. Ppal.	Nombre Escaneo	Resolución	Calidad	Angulo de Barrido		Duración	Objeto de ref. artificiales visibles	
					Horizontal	Vertical		cantidad	tipo
E1	TF_SF	TF_SF_ec_i000	1/4	3X	360°	-60° a 90°	7 min	6 1	(e) (t)
E2		TF_SF_ec_i001	1/4	3X	360°	-60° a 90°	7 min	6	(e)
E3		TF_SF_ec_i002	1/4	3X	360°	-60° a 90°	7 min	6 1	(e) (t)
E4		TF_SF_ec_e000	1/4	3X	360°	-60° a 90°	7 min	6 1	(e) (t)
E5		TF_SF_ec_e001	1/2	3X	130°	-60° a 90°	14 min	3 2	(e) (t)
E6		TF_SF_ec_e003	1/2	3X	150°	-40° a 90°	16 min	5 4	(e) (t)
E7		TF_SF_ec_e004	1/2	3X	170°	-40° a 90°	18 min	6 2	(e) (t)
E8		TF_SF_ec_e005	1/2	3X	170°	-40° a 90°	18 min	6 1	(e) (t)
E9		TF_SF_ec_e006	1/2	3X	120°	-40° a 90°	14 min	5 2	(e) (t)

**Planilla de observación - Relevamiento LIDAR**

Sitio / Objeto:	Colegio Nacional - UNLP
Fecha:	19/09/2015
Operador:	FALIP, Sofia

Objetos de referencia utilizados para la ref. en sist. ext.			
Artificiales	Esferas	(e)	×
	Target	(t)	×
Naturales		(n)	

Est.	Nombre Proy. Ppal.	Nombre Escaneo	Resolución	Calidad	Angulo de Barrido		Duración	Objeto de ref. artificiales visibles	
					Horizontal	Vertical		cantidad	tipo
E1	TF_SF	TF_SF_cn_000	1/2	3X	150°	-60° a 90°	18 min	3 2	(e) (t)
E2		TF_SF_cn_001	1/2	3X	75°	-60° a 90°	9 min	6 4	(e) (t)
E3		TF_SF_cn_002	1/2	3X	170°	-60° a 90°	20 min	6 3	(e) (t)
E4		TF_SF_cn_003	1/2	3X	170°	-60° a 90°	20 min	6 1	(e) (t)
E5		TF_SF_cn_004	1/2	3X	75°	-60° a 90°	9 min	6	(e)
E6		TF_SF_cn_005	1/2	3X	250°	-60° a 90°	25 min	6 1	(e) (t)
E7		TF_SF_cn_006	1/2	3X	90°	-40° a 90°	12 min	3	(e)

Medidas lineales tomadas con distanciómetro de mano  
Edificio Central - FI - UNLP

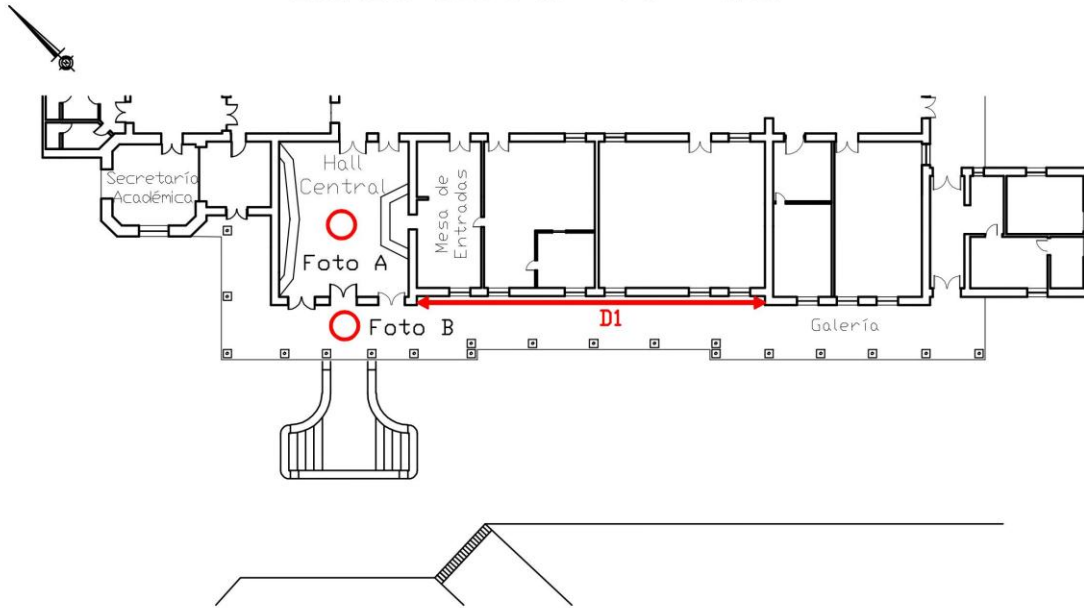


Foto A



Foto B



Medidas lineales tomadas con distanciómetro de mano  
Colegio Nacional - UNLP

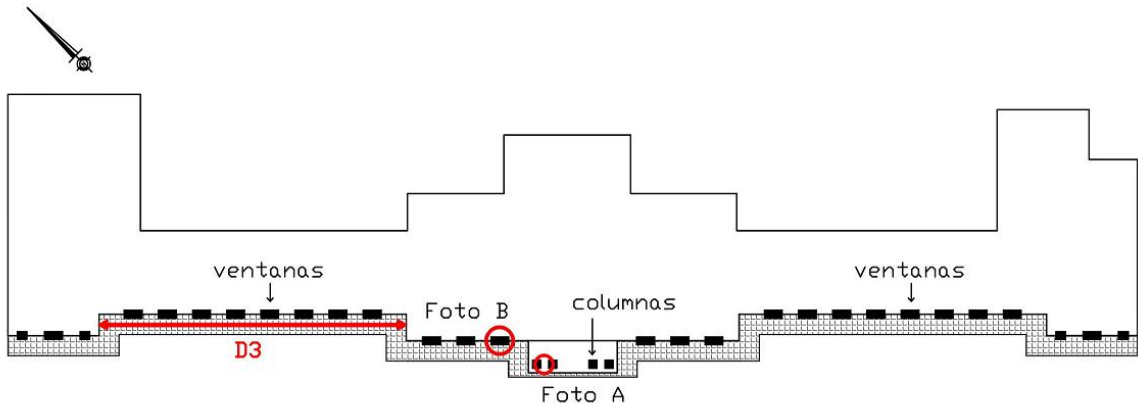


Foto A

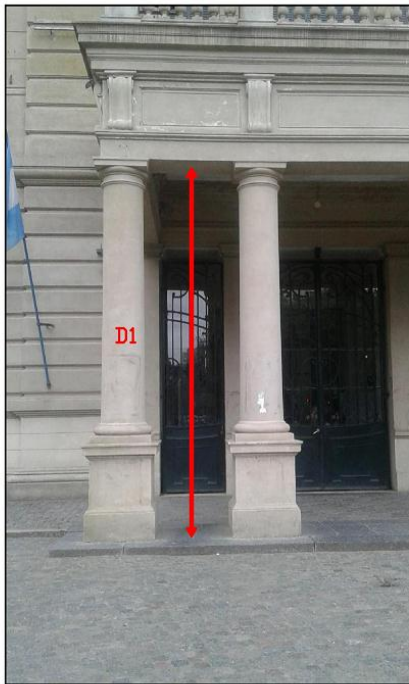
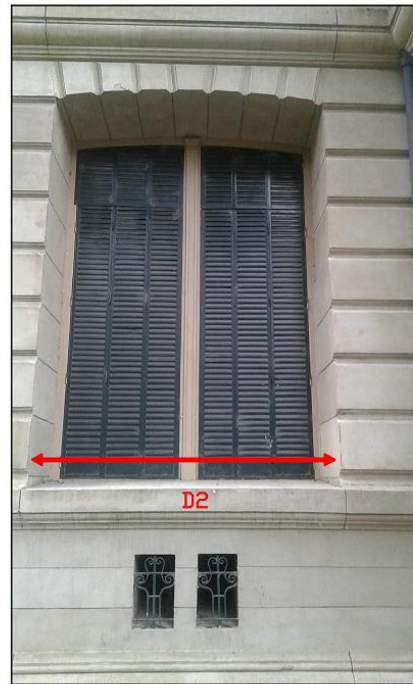


Foto B



## **7.4. Anexo IV**

### *Acrónimos*

2D: Dos dimensiones

3D: Tres dimensiones

ALS: Airbone Laser Scanning (Escáner láser aerotransportado)

AM: Amplitude Modulation (Amplitud modulada)

AP: Ancho de Pasada

ASPRS: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (Sociedad americana de fotogrametría y teledetección)

CCD: Charge Coupled Device (Dispositivo de carga acoplada)

CMP: Continuous MultiPulse (Pulsos múltiples continuos)

CW: Continuous Wave (Onda continua)

ECEF: Earth Centred and Earth Fixed (Sistema geocéntrico fijado a la tierra)

FBA: Facultad de Bellas Artes

FCAG: Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas

FEMA: Federal Emergency Management Agency (Agencia federal para la gestión de emergencia).

FGDC: Federal Geographic Data Committee (Comité federal de datos geográficos)

FI: Facultad de Ingeniería

FOV: Field Of View (Campo de visión)

GEOBA: Red Geodésica de la Provincia de Buenos Aires.

GK: Gauss-Krüger

GLONASS: Acrónimo en ruso ГЛОНАСС, ГЛОбальная НАвигационная Спутниковая Система tr.: Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (Sistema de navegación global por satélite)

GNSS: Global Navigation Satellite System (Sistema global de navegación por satélite)

GPS: Global Positioning System (Sistema de posicionamiento global)

ICP: Iterative Closest Point (Iteración por punto más cercano)

IFOV: Instantaneous Field of View (Campo de visión instantáneo)

IGM: Instituto Geográfico Militar

IGN: Instituto Geográfico Nacional

IMU: Inertial Measurements Units (Unidad de medición inercial)

INS: Inertial Navigation System (Sistema de navegación inercial)

IR: Infrarrojo

ISPRS: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (Sociedad internacional de fotogrametría y teledetección)

ITRF: International Terrestrial Reference Frame (Marcos de referencia terrestre internacional)

LAS: Lidar Archive Standard (Archivos estándar de LiDAR)

Láser: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (Amplificación de la luz por emisión estimulada de radiación)

LiDAR: Light Detection And Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging (Distancia a partir de la detección de la luz).

MDS: Modelo Digital de Superficies

MDT: Modelo Digital del Terreno

MLS: Mobile Laser scanning System (Sistema de barrido láser móvil)

MMS: Mobile Mapping System (Sistema de cartografía móvil)

MPiA: Multiple Pulses in Air (Múltiples pulsos en el aire)

MTA: Multiple Time Around (Tiempo múltiples alrededor de)

NASA: National Aeronautics and Space Administration (Administración nacional de aeronáutica y espacial)

NED: North East Down (Norte elipsoidal, Este elipsoidal y “hacia abajo”)

PARN: Punto Altimétrico de Referencia Normal

PASMA: Proyecto de Apoyo al Sector Minero Argentino

PC: Plano de Comparación o Personal Computer (Computadora personal)

PF: Punto Fijo

POSGAR: Posiciones Geodésicas Argentinas

PPS: Pulso por segundo

RADAR: Radio Detection And Range (Detección y medición [de distancias] por radio)

RAMSAC: Red Argentina de Monitoreo Satelital Continuo

RGB: Red, Green, Blue (Rojo, Verde y Azul)

RMS: Root Mean Square (Error medio cuadrático)

SD: Secure Digital (Seguro digital, formato de tarjeta de memoria)

SE: Sureste

SIRGAS: Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas

SO: Suroeste

SST: Sea Surface Topography (Topografía de la superficie del mar)

TBC: Trimble Bussiness Center (Centro de negocios de Trimble)

TIN: Triangulated Irregular Network (Red de triángulos irregulares)

TLS: Terrestrial Laser Scanning (Escáner láser terrestre)

TOF: Time of flight (Tiempo de vuelo)

UAV: Unmanned Aircraft Vehicle (Vehículo aéreo no tripulado)

UNLP: Universidad Nacional de La Plata

USACE: U.S. Army Corps of Engineers (Cuerpo de ingenieros del ejército de los Estados Unidos)

USGS: United States Geological Survey (Servicio geológico de los Estados Unidos)

WLAN: Wireless Local Area Network (Red de área local inalámbrica)



## **7.5. Anexo V**

- Reglamento para la ejecución del TRABAJO FINAL (G429) de la Carrera de Agrimensura, correspondientes al Plan de Estudios 2002.
- Notas
- Planilla Plan de Trabajo.
- Plan de Trabajo

**Reglamento para la ejecución del TRABAJO FINAL (G429) de la Carrera de AGRIMENSURA, correspondiente al Plan de Estudios 2002.**

**Universidad Nacional de La Plata**

**Facultad de Ingeniería**

**Área Departamental Agrimensura**

**Carrera: Ingeniería en Agrimensura**

**Aprobado por Expediente N° 310-013572/08 de fecha 28/ 10/2008.**

**Capítulo 1. Definiciones**

**Artículo 1º. Objetivo del Trabajo Final**

Integrar los conocimientos adquiridos por los alumnos en el transcurso de la Carrera. Para ello el trabajo tendrá el sentido de síntesis profesional, de investigación y/o desarrollo de una problemática, encuadrada dentro del contenido curricular de las asignaturas que conforman el Plan de Estudios de la Carrera, debiendo el alumno presentar un tema o elegir uno de un listado que proporcionará el Profesor de la materia, desarrollarlo y resolverlo. Este deberá referirse a problemas dentro del ejercicio profesional.

En caso de tratarse de un trabajo original se podrá dar al mismo, tratamiento teórico. Considerando como original un trabajo que no cuente con antecedentes archivados y/o publicados en ámbitos de acceso público.

**Artículo 2º. Duración Prevista**

La duración prevista para la ejecución del trabajo, para cada alumno, será la siguiente:

Duración mínima: Trescientas (300) horas cátedra.

Duración máxima: Dos (2) semestres, con posibilidad de renovación por un semestre más.

El Profesor evaluará la conveniencia de extender los plazos previstos en el plan de trabajos, no pudiendo superar dos semestres.

Las excepciones, a solicitud del(los) alumno(s) y avaladas por el Director, serán analizadas oportunamente por la cátedra de Trabajo Final.

Pasados cinco (5) semestres consecutivos sin que se solicite mesa de examen, el (los) alumno(s) deberán presentar un nuevo trabajo con un nuevo tema.

### **Artículo 3º. Condiciones para la inscripción y realización.**

Podrá(n) iniciar el Trabajo Final de la Carrera, él(los) alumno(s) que tenga(n) aprobadas, como mínimo, 30 materias aprobadas. El trabajo podrá ser grupal, conformado por no más de tres (3) alumnos, siendo responsabilidad del Profesor de la asignatura asegurar el cumplimiento de los objetivos de la misma por parte de los alumnos que lo integren.

### **Artículo 4º. Director del Trabajo**

El Director del Trabajo Final será propuesto por él(los) alumno(s), y será Profesor (o ex Profesor), de alguna de las asignaturas de la Carrera o de otras materias de Carreras afines de la Facultad, quien en caso de aceptar, dará su conformidad por escrito.

También podrá proponerse como Director del Trabajo Final, a un profesional universitario, quien deberá tener una destacada trayectoria profesional en el tema del trabajo. En este caso, el Director propuesto deberá presentar, conjuntamente con su nota de aceptación, sus antecedentes, indicando en forma detallada los ítems relacionados con el tema del trabajo.

Con acuerdo del Director, podrá ser propuesto un Codirector, quien deberá cumplir con los requisitos indicados en este artículo.

En el caso establecido en el párrafo preanterior, dado que se trata de una tarea académica, es altamente recomendable que sea designado como Codirector un docente de la Carrera.

### **Artículo 5º. Plan de Trabajo**

Junto con la propuesta del nombre del Director (y Codirector), y su(s) aceptación(es) de conformidad, el(los) alumno(s) deberá(n) presentar el PLAN DE TRABAJO, detallado y bien fundamentado, que contenga por lo menos:

5. 0. Título.

5. 1. Objetivos generales y particulares.

5. 2. Alcances.

5. 3. Fuente de datos iniciales.

5. 4. Ámbito de realización.

5. 5. Metodología.

5. 6. Cronograma de ejecución.

5. 7. Estimación de resultados finales y conclusiones a las que se pretende arribar.

5. 8. Especificar, si hubiere lugar a ello, qué etapas serían de ejecución técnica y/o de investigación.

5. 9. Bibliografía estimada de consulta.

5.10. Información especializada que se prevé obtener de otras fuentes (especialistas, instituciones, Internet, etc.).

5.11. Instrumental y medios disponibles por parte del(los) alumno(s).

5.12. Instrumental y medios que solicitará en préstamo, al Área Departamental Agrimensura.

5. 13. En todos los casos se deberá tratar el encuadramiento legal de la tarea a realizar, incluyendo si correspondiere, los aspectos contractuales, la aplicación del arancel profesional y la estimación de los gastos que deberían acordarse con el comitente.

El Plan de Trabajo deberá presentarse avalado por el Director (y Codirector).

## **Capítulo 2. Acciones**

### **Artículo 6°. Entrevistas previas**

Para considerar el posible tema de trabajo y orientarse en la elección del Director (y Codirector, si fuera necesaria su designación), él(los) alumno(s) deberá(n) mantener al menos una entrevista con el Profesor Titular de la materia Trabajo Final, quien dará la orientación pertinente.

### **Artículo 7°. Presentaciones**

7.1. Él(los) alumno(s) presentará(n) en el Área Departamental, su solicitud de iniciación del Trabajo Final, la que deberá contener:

7.1.1. Título del Trabajo.

7.1.2. Cantidad de alumnos que lo ejecutarán.

7.1.3. Datos personales de cada uno (Apellido y nombres, número de alumno).

7.2. Constancia(s) de haber aprobado 30 asignaturas del Plan de Estudios.

7.3. Plan de Trabajo, desarrollado según lo indicado en el Artículo 5°.

7.4. Nota firmada por el Director (y Codirector) propuesto(s), conteniendo:

7.4.1. Aceptación de la Dirección (y Codirección) del Trabajo Final y aval del Plan de Trabajo propuesto.

7.4.2 El Director (y Codirector) efectuará(n) la recomendación sobre las asignaturas que cada alumno deberá tener aprobadas o estar cursando simultáneamente con la ejecución del trabajo.

7.5. Copia del presente reglamento firmada por él(los) alumno(s) y el Director (y Codirector).

## **Artículo 8º. Tramitación General**

8.1. Los plazos indicados en este reglamento se contarán en días corridos.

8.2. Recibida la presentación a que hace referencia el Art. 7º, el Profesor de Trabajo Final elevará, dentro de los catorce (14) días, a la Comisión de Carrera las actuaciones con su análisis correspondiente y una propuesta de los integrantes de la Comisión Examinadora.

8.3. Cuando la Comisión de Carrera apruebe la propuesta sobre el tema del Trabajo Final, designará la Comisión Examinadora del mismo.

8.4. A partir de esta aprobación se cuentan los Plazos de la Duración prevista en el Artículo 2.

8.5. La Comisión Examinadora, estará compuesta por el Profesor a cargo de la cátedra de Trabajo Final y por dos (2) Profesores de asignaturas de la Carrera o de otras Carreras afines de la Facultad, que tengan afinidad con el tema del Trabajo a examinar.

8.6. En caso de que el Profesor a cargo de la cátedra de Trabajo Final sea el Director o Codirector del Trabajo, será reemplazado por un (1) Profesor de asignaturas de la Carrera o de otras Carreras de la Facultad, que tengan afinidad con el tema del Trabajo a examinar.

## **Artículo 9º. Ejecución**

9.1. Derechos y Obligaciones del(los) alumno(s).

9.1.1. El(los) alumno(s) deberá(n) concurrir a todas las reuniones con la cátedra cuando ésta lo solicite. Lo mismo para las reuniones que el Director y/o Codirector establezcan. Las ausencias deberán justificarse.

9.1.2. El(los) alumno(s) deberá(n) presentar los avances del trabajo al titular de la materia cada 30 días en un escrito de no más de 2 hojas, avalados por el Director.

9.1.3. Él(los) alumno(s) podrá(n) solicitar al Profesor de Trabajo Final la destitución del Director (y/o Codirector), cuando incurra(n) en reiterados incumplimientos de sus responsabilidades; situación que deberá(n) poner de manifiesto por escrito con los

debidos fundamentos. Esta solicitud será evaluada por la Cátedra de Trabajo Final, conjuntamente con el Director de Carrera.

9.1.4. En el caso que el Director (y/o Codirector) no continúe(n) en la Dirección del Trabajo Final, él(los) alumno(s) deberá(n) presentar él(los) reemplazante(s), quien(es) deberá(n) satisfacer las condiciones establecidas en este Reglamento. Si esto sucediera, el nuevo Director (y/o Codirector) podrá(n) convalidar el Plan de Trabajo propuesto anteriormente o introducirle las modificaciones que considere(n) pertinentes, de común acuerdo con él(los) alumno(s) y con la cátedra de Trabajo Final.

9.1.5. Él(los) alumno(s) podrá(n) solicitar por intermedio de la Cátedra la recusación de uno o más evaluadores, justificando la misma con los debidos fundamentos. Esta solicitud será evaluada por la Comisión de Carrera.

9.1.6. Él(los) alumno(s) deberá(n) informar de manera fehaciente con la suficiente antelación la realización de las tareas a efectuar fuera de la U.N.L.P.

9.2. Derechos y Obligaciones del Director (y Codirector) del Trabajo:

9.2.1. El Director (y Codirector) del Trabajo, a partir de notificarse de su designación en tal carácter, asume(n) la obligación de atender las consultas del(los) alumno(s), en las oportunidades indicadas en (9.1.1.) y durante los tiempos establecidos en el Artículo 2º.

9.2.2. El Director (y Codirector) podrá(n) renunciar a su tarea cuando él(los) alumno(s) que actúan bajo su dirección incurra(n) en reiterados incumplimientos de sus responsabilidades, informando de su decisión al Profesor de Trabajo Final, situación que deberá(n) poner de manifiesto por escrito con los debidos fundamentos.

9.2.3. El Director (y Codirector) podrá(n) renunciar a su tarea por razones no especificadas en 9.2.2., informando de su decisión por escrito al Profesor de Trabajo Final, fundamentando los motivos de la misma.

9.2.4. La(s) renuncia(s) será(n) evaluada(s) por la Cátedra de Trabajo Final, conjuntamente con el Director de Carrera.

9.2.5. En todos los casos, el Director del Trabajo (y Codirector, si lo hubiere) deberá(n) estar presentes durante la exposición del(los) alumno(s), con voz pero sin

voto. Solo se podrá contemplar su ausencia en casos de excepción debidamente justificados.

9.2.6 Cuando el Director no sea un Docente de la Carrera deberá mantener al menos una entrevista con la Cátedra de Trabajo Final al comienzo de sus funciones como Director.

### **Artículo 10º. Tramitación Final**

10.1. Cuando el Director (y Codirector) del Trabajo considere(n) que se han cumplido los objetivos propuestos y así lo avale(n) por escrito, él(los) alumno(s) presentará(n) en la Cátedra de Trabajo Final, tres (3) ejemplares completos encuadernados de su Trabajo, un (1) ejemplar encuadernado de los anexos y tres (3) copias en soporte informático.

10.2. Dentro de los siete (7) días de recibido lo indicado en 10.1. el Profesor de Trabajo Final deberá remitir por Secretaría del Área Departamental, un ejemplar del trabajo a cada uno de los integrantes de la Comisión Examinadora.

10.3. Si hubiera observaciones los integrantes de la Comisión Examinadora deberán remitirlas por escrito a la Cátedra de Trabajo Final dentro de los veinte (20) días siguientes.

10.4. Las observaciones indicadas por los integrantes de la Comisión Examinadora deberán discriminarse en observaciones de fondo y observaciones de forma, debiendo ser las primeras aquellas que por su naturaleza impidan el cumplimiento de los objetivos del trabajo.

10.5. Si dentro de los treinta (30) días de la presentación efectuada no recibieran observaciones, él(los) alumno(s) integrante(s) del Trabajo Final, solicitará(n) por escrito al Profesor de Trabajo Final la fecha para la exposición de dicho trabajo, quedando condicionada esta solicitud a la inscripción en la materia Trabajo Final. Para ello agregarán la documentación necesaria que permita la verificación de dicha inscripción, lo que indicará la aprobación de todas las asignaturas de su plan de estudios.



10.6. Si hubiera observaciones, una vez que el Director (y Codirector) del Trabajo considere(n) que se han satisfecho las mismas y así lo avale(n) por escrito, él(los) alumno(s) presentará(n) en la cátedra de Trabajo Final, los ejemplares indicados en 10.1 con la respuesta a las observaciones indicadas.

Dentro de los diez (10) días posteriores a la nueva notificación, los integrantes de la Comisión Examinadora deberán revisar si la respuesta a sus observaciones es suficiente (salvo casos de excepción, no deberán agregar nuevas observaciones que no surjan de las anteriores), y harán llegar por escrito a la Cátedra Trabajo Final (o al Director de Carrera en caso de que el Profesor de la misma sea el Director o Codirector del Trabajo), la aceptación o no aceptación de la respuesta a las observaciones efectuadas al Trabajo Final.

En el caso que las observaciones solicitadas por los integrantes de la Comisión Examinadora no sean compartidas por el Director (y Codirector) del Trabajo Final, estos deberán fundamentar su discrepancia por escrito, en una nota dirigida al Profesor de Trabajo Final.

El Profesor de Trabajo Final, conjuntamente con el Director de Carrera decidirá la cuestión.

10.7. Superada la instancia de las correcciones, las partes determinarán la fecha más conveniente para la constitución de la Mesa Examinadora.

10.8. Constituida la Mesa Examinadora, él(los) alumno(s) deberá(n) exponer la tarea realizada en clase pública, teniendo en cuenta que si bien se puede tratar de trabajos y exposiciones grupales, se evaluará a cada alumno de modo individual.

10.9. El original del Trabajo Final aprobado, con el anexo correspondiente quedará en el Área Departamental de Agrimensura, con la firma aclarada de los integrantes de la Comisión Examinadora. Una (1) copia del Trabajo Final, en iguales condiciones que el original, será enviada a la Biblioteca Central de la Facultad.

### **Artículo 11º. Excepción**

En caso de surgir circunstancias no contempladas en el presente reglamento, serán resueltas por la Comisión de Carrera.

“Agrimensura 3D con tecnología LiDAR”

En caso de surgir circunstancias ajenas a lo académico, previa, simultánea o posteriormente a la ejecución del Trabajo Final, la(s) misma(s) deberá(n) ser resuelta por él(los) Alumno(s), el Director, las Autoridades de la Carrera, y de ser necesario, terceros involucrados.

“Agrimensura 3D con tecnología LiDAR”

La Plata, 26 de Marzo de 2015

Sr.  
Profesor de la Cátedra de Trabajo Final  
Prof. Jaime Ricardo SOTO

S \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ D

De mi mayor consideración:

Tengo el agrado de dirigirme a Ud. a fin de solicitarle la inscripción para iniciar la realización del TRABAJO FINAL (G429).

El mismo llevará por título “Agrimensura 3D con tecnología LIDAR”.

Asimismo le hago saber que he aprobado 30 materias correspondientes al Plan de Estudio 2002.

Adjunto a la presente el certificado analítico con las materias aprobadas y sus correspondientes notas, y el Plan de Trabajos correspondiente.

Elevo también las correspondientes notas de aceptación al cargo de Director y Codirector del presente trabajo por parte del Dr. Daniel DEL COGLIANO y del Ing. Agrim. Rodrigo LORAY.

Sin otro particular saludo a Ud. muy atentamente.



Sofia FALIP  
N°60295/4

Recibí de parte del alumno su Planilla de Inscripción en el Trabajo Final, conjuntamente con las correspondientes notas de aceptación del cargo de Director por parte del Dr. Daniel DEL COGLIANO y de Codirector por parte del Ing. Agrim. Rodrigo LORAY, el plan de trabajo, un cronograma detallado del mismo y un Certificado Analítico de materias aprobadas a la fecha.

**Prof. J. Ricardo Soto**

La Plata, 17 de Marzo de 2015

V 030512

Sofia Falip 60295/4

La Plata, 26 de Marzo de 2015

Sr.  
Profesor de la Cátedra de Trabajo Final  
Prof. Jaime Ricardo SOTO

S \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ D


De mi mayor consideración:

Tengo el agrado de dirigirme a Ud. a fin de comunicarle mi aceptación a la propuesta de la alumna Sofia FALIP, (N°60295/4) de ser nombrado Director del TRABAJO FINAL que plantea.

Asimismo expreso mi conformidad con el tema elegido y con el Plan de Trabajo que presenta y con el Codirector Rodrigo LORAY.

De igual modo me notifico que el Director es el responsable de orientar a los alumnos en las cuestiones teóricas y técnicas para desarrollar el Trabajo Final, de evaluar si se han cumplido los objetivos propuestos, y de corregir la totalidad del contenido, a fin de evitar vicios de redacción y errores de ortografía.

Sin otro particular saludo a Ud. muy atentamente.



Dr. Daniel Del Cogliano

La Plata, 26 de Marzo de 2015-

Sr.  
Profesor de la Cátedra de Trabajo Final  
Prof. Jaime Ricardo SOTO

S \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ D

De mi mayor consideración:

Tengo el agrado de dirigirme a Ud. a fin de comunicarle mi aceptación a la propuesta de la alumna Sofía FALIP, (N°60295/4) de ser nombrado Codirector del TRABAJO FINAL que plantea.

Asimismo expreso mi conformidad con el tema elegido y con el Plan de Trabajo que presenta.

De igual modo me notifico que el Codirector es responsable de orientar a los alumnos en las cuestiones teóricas y técnicas para desarrollar el Trabajo Final, y de evaluar si se han cumplido los objetivos propuestos en el área de su competencia.

Sin otro particular saludo a Ud. muy atentamente.

Ing. Agrim. Rodrigo LORAY

“Agrimensura 3D con tecnología LiDAR”

La Plata, 11 de Diciembre de 2015

Sr.  
Profesor de la Cátedra de Trabajo Final  
Prof. Jaime Ricardo SOTO  
S \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ D

De mi mayor consideración:

Tenemos el agrado de dirigimos a Ud. con el objeto de comunicarle que la alumna FALIP, Sofia (N° 60295/4) ha concluido las tareas correspondientes al Trabajo Final “Agrimensura 3D con Tecnología LiDAR”.

Asimismo expresamos nuestra conformidad por la labor realizada, habiendo desarrollado el trabajo con responsabilidad y desempeño en cada una de las tareas.

Por lo expuesto, solicitamos a Ud. la conformación de la Comisión Examinadora para este Trabajo Final.

Sin otro particular, saludamos a Ud. muy atentamente.

  
Dr. Daniel Del Cogliano.

  
Ing. Agrim. Rodrigo Loray



“Agrimensura 3D con tecnología LiDAR”

La Plata, 15 de Marzo de 2016-

Sr.  
Profesor de la Cátedra de Trabajo Final  
Prof. Jaime Ricardo SOTO

S \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ D

De mi mayor consideración:

En el día de la fecha he retirado las observaciones efectuadas por la Comisión Examinadora del Trabajo Final.

Sin otro particular saludo a Ud. muy atentamente.



Sofia Falip  
Nº 60295/4

V 030512

**“Agrimensura 3D con tecnología LiDAR”**

**Trabajo Final**

**Sofia Falip (60295/4)**

**Observaciones de la Comisión Examinadora**

Los miembros formulan diversas consideraciones laudatorias acerca del contenido y realización del Trabajo Final.

**Prof. SISTI**

Solicita aclaración respecto de:

- Consideraciones legales, arancelarias, presupuestos, gastos, etc., aludidos en el art.5º ítem 5.13 del Reglamento de TF.
- El pto.1.4.3. (pág. 10) “Planos antecedentes” hace referencia principalmente a planos de obra sobre los edificios relevados; usualmente con dicho término se alude implícitamente a planos de agrimensura.
- En figura 3.1 (pág. 60) hay sobre el edificio Facultad de Química indicado un PF (IGN), y en su foto en fig. 3.5 (pag.64) la sigla indica Nivelación P.B.A., podría ser conveniente aclarar la no correspondencia nominal.
- En tabla 3.2 (pág. 70) los valores de coordenadas en Lat. y Long. se encuentran expresadas con 5 decimales de segundo de arco, que indicarían una precisión superior a las del relevamiento realizado.
- La creación de una proyección cartográfica propia GK faja 9 no se encuentra suficientemente justificada.

**Prof. ALDASORO**

No formula observaciones.

**Prof. SOTO**

Solicita correcciones de forma.



- Pág. 5: donde dice puntos /m2 debe decir puntos /m<sup>2</sup> ”.
  - Pág. 10: Punto 1.4.2. Indicar al pie el nombre y ejecutores del trabajo.
  - Pág. 12: en la ecuación de la distancia d, se utiliza el símbolo x como símbolo multiplicador. En otras ecuaciones se utiliza el punto, \* o nada como símbolo multiplicador. Optar por uno de ellos en todo el trabajo. Sugiero utilizar el punto, y descartar el \*.
- Más abajo se indica (15nm) debe decir 15 nm, La unidad no debe ir pegada a la cifra.
- Pág. 13: ...una de las primeras aplicaciones: las operaciones....Eliminar ":".
  - Pág. 15: En todos los acrónimos al pie poner el significado en inglés y su traducción en español.
  - Pág. 16: Como se observa, la precisión de este método depende en crítica. (Mejorar o corregir la frase).
  - Pag. 17: ser detectado como un pulso (agregar un)
  - Pag. 18: Onda continua CW-Modulada en amplitud AM. Debiera ser MA para adoptar siempre la sigla en inglés.
  - Pag. 21: Definir al pie parámetros dasométricos.
  - Pág. 23: Fig.2.4. No define “g”.
- Sino (no es si no)
- Pág. 24: eliminar “coma” en: densa, ni
  - Pág. 25: Al pie MPR: frecuencia de emisión. Idem MPiA, CMP, MTA
  - Pág. 26: MPR: Máxima frecuencia teórica (Verificar con acrónimo de Pag.25.
- Consulta:** se menciona la necesidad de resolver la ambigüedad. En 2.4.3.3 se indica que está tratando sensores basados en tiempo de vuelo. ACLARAR.
- Pag. 28: al final de la página sacar “punto” de trasera.de la elipse
  - Pág. 29: IMU (al pie de página).
- Observaciones: Se sugiere ADOPTAR iguales criterios en todo el trabajo.



Ing. J. Ricardo Soto  
Profesor Trabajo Final

“Agrimensura 3D con tecnología LiDAR”

La Plata, 22 de Marzo de 2016-

Sr.  
Profesor de la Cátedra de Trabajo Final  
Prof. Jaime Ricardo SOTO

S \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ D

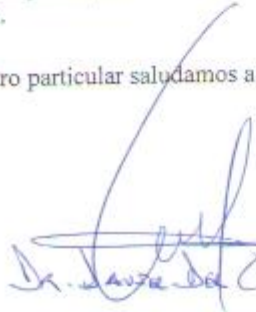
De mi mayor consideración:

Tenemos el agrado de dirigimos a Ud. con el objeto de comunicarle que la alumna Sofia Falip, (N° 60295/4) que realizó el Trabajo Final “Agrimensura 3D con tecnología LiDAR” ha concluido con las correcciones correspondientes a las observaciones producidas por los miembros de la Comisión Examinadora.

Asimismo expresamos nuestra conformidad por la labor realizada.

Por lo expuesto, solicitamos a Ud. la constitución de la Comisión Examinadora para este Trabajo Final.

Sin otro particular saludamos a Ud. muy atentamente.

  
Dr. Jaime Ricardo SOTO

  
Ing. Agrim. Rodrigo Lora

V 030512

**Planilla de datos para la inscripción en Trabajo Final**

<b>N°</b>	<b>Tipo de Datos</b>	<b>Descripción e Información</b>	<b>Obs.</b>
01	Título:	“Agrimensura 3D con tecnología LIDAR”	
02	Alumnos integrantes del grupo:	Un (1) alumno	
03	Datos Personales de cada Miembro: (N y A, N° de alumno)	FALIP, Sofia 60295/4	
04	Objetivos:	<ul style="list-style-type: none"><li>• Estudio y aplicación de la tecnología LIDAR.</li><li>• Poner en práctica esta nueva tecnología (LIDAR) a partir de un “sensor fijo” y software recientemente adquirido por la UNLP.</li><li>• Establecer conocimientos básicos trasmisibles para el desarrollo y aplicación de la tecnología LIDAR.</li><li>• Consolidar una base de datos confiable de edificaciones de la UNLP, que pueda ser utilizada en futuros análisis.</li><li>• Obtener un producto de alta calidad geométrica (1 a 3 cm) y resolución (cientos de puntos/m<sup>2</sup>).</li></ul>	
05	Alcances:	<ul style="list-style-type: none"><li>• Medición de parte del Edificio Central de la Facultad de Ingeniería y parte del Colegio</li></ul>	

“Agrimensura 3D con tecnología LiDAR”

		<p>Nacional de la UNLP con un sensor LIDAR TX5.</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Generación de un modelo 3D georreferenciado de los edificios relevados.</li><li>• Aplicación de técnicas topográficas clásicas y GNSS para la correcta vinculación altimétrica y georreferenciación de la información LIDAR.</li><li>• Evaluación de las precisiones obtenidas por medio de verificación con métodos extrínsecos.</li><li>• Generación de un producto con aplicación en la ingeniería, la arquitectura y otras disciplinas.</li></ul>	
06	Fuente de Datos Iniciales:	<ul style="list-style-type: none"><li>• Recopilación de planos e información de interés del Edificio Central de la Facultad de Ingeniería y del Colegio Nacional de la UNLP.</li><li>• Monografías de puntos altimétricos seleccionados en la zona de trabajo.</li><li>• Monografías de puntos de la Red POSGAR 07 seleccionados en la zona de trabajo.</li></ul>	
07	Ámbito de Realización:	<p><i>Trabajo de campo</i></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Edificio Central de la Facultad de Ingeniería de la UNLP.</li></ul>	

		<ul style="list-style-type: none"><li>• Colegio Nacional “Rafael Hernández” de la UNLP.</li></ul> <p><i>Trabajo de gabinete</i></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Oficina ubicada en el edificio del Departamento de Agrimensura (FI-UNLP) equipada con una PC de última generación adquirida en diciembre de 2014 y destinada exclusivamente al procesamiento de información LIDAR</li></ul>	
08	Metodología a Utilizar:	<ul style="list-style-type: none"><li>• Fundamentación teórica de la tecnología LIDAR.</li><li>• Estudio (manual y hardware) del sensor Laser TX5.</li><li>• Estudio de los software de procesamiento SCENE y Trimble Real Works.</li><li>• Planificación de tareas de campaña.</li><li>• Realización del levantamiento LIDAR, GNSS y topográfico clásico.</li><li>• Procesamiento de los datos relevados.</li><li>• Integración de las diferentes estaciones de trabajo LIDAR.</li><li>• Georreferenciación de las nubes LIDAR resultantes.</li></ul>	

		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Análisis de resultados.</li> <li>• Conclusiones.</li> </ul>	
09	Cronograma de Ejecución:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fundamentación teórica de la tecnología LIDAR.</li> <li>• Estudio (manual y hardware) del sensor Laser TX5.</li> <li>• Estudio de los software de procesamiento SCENE y Trimble Real Works.</li> <li>• Planificación previa en gabinete.</li> <li>• Reconocimiento del terreno.</li> <li>• Planificación de la campaña.</li> <li>• Realización del levantamiento.</li> <li>• Procesamiento de los datos.</li> <li>• Análisis y validación de los resultados.</li> <li>• Elaboración de informe.</li> <li>• Revisión y corrección.</li> </ul>	
10	Clasificación de Tareas: (Campaña/Gabinete/Adicionales)	<p><u>ETAPA 1</u></p> <p><i>Tareas previas:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Recopilación de antecedentes</li> </ul> <p><i>Tareas de gabinete:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Análisis y selección del material recopilado.</li> <li>• Estudio del sensor Laser TX5 (manual y hardware).</li> </ul>	

		<ul style="list-style-type: none"><li>• Estudio de los software de procesamiento SCENE y Trimble Real Works.</li><li>• Elección de puntos fijos y puntos POSGAR para la vinculación del trabajo.</li></ul> <p><i>Tareas de campo:</i></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Reconocimiento de la zona de trabajo.</li><li>• Verificación del estado de los puntos IGN y POSGAR.</li><li>• Reconocimiento de los edificios</li></ul> <p><u>ETAPA II</u></p> <p><i>Tareas de gabinete:</i></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Planificación de la campaña.</li></ul> <p><i>Tareas de campo:</i></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Medición con el escáner laser del exterior y parte del interior de los edificios en cuestión.</li><li>• Distribución de marcas de referencia, planas y esféricas.</li><li>• Generación de una poligonal planialtimétrica que vincule los relevamientos de ambos edificios mediante métodos topográficos clásicos.</li></ul>	
--	--	--	--

		<ul style="list-style-type: none"><li>• Georreferenciación de los levantamientos a partir de mediciones GNSS.</li></ul> <p><u>ETAPA III:</u></p> <p><i>Tareas de gabinete:</i></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Transferencia de escaneos registrados a la PC.</li><li>• Procesamiento de puntos de escaneo con software SCENE: filtrado de los escaneos para eliminar puntos alterados, borrado manual de puntos no deseados, identificación y creación de objetos de referencia para el registro de escaneos.</li><li>• Registro y georreferenciación de los escaneos.</li><li>• Producto final: modelo 3D.</li><li>• Análisis de los resultados.</li><li>• Conclusiones.</li></ul>	
11	Estimación de Resultados a Obtener:	<ul style="list-style-type: none"><li>• Definición metodológica para integrar la nueva tecnología LIDAR con métodos clásicos con puntos georreferenciados de alta calidad.</li><li>• Representación 3D de edificios y hechos existentes de interés.</li></ul>	



		<ul style="list-style-type: none"><li>• Utilización de software diversos para el manejo de información 3D.</li><li>• Obtención de un modelo 3D de alta resolución y calidad centimétrica.</li></ul>	
12	Conclusiones a Obtener:	<ul style="list-style-type: none"><li>• Las técnicas LIDAR representan una herramienta capaz de producir información 3D de alta calidad y resolución inédita.</li><li>• La vinculación entre diferentes relevamientos LIDAR, realizada en forma geodésica, es de precisión centimétrica y puede ser georreferenciada.</li><li>• La información 3D debidamente georreferenciada es integrable a bases de datos o sistemas de información geográfica en forma simple.</li><li>• El desarrollo de aplicaciones y análisis de la información LIDAR, requiere la formación de recursos humanos y la conformación de grupos interdisciplinarios de trabajo.</li><li>• El modelo 3D obtenido será utilizable para futuros estudios, análisis y eventuales modificaciones constructivas de los edificios relevados.</li></ul>	

		<ul style="list-style-type: none"><li>• Los resultados de este trabajo pueden ser replicados en diferentes disciplinas.</li></ul>	
13	Clasificación de Etapas: (ejecución técnica, investigación, recopilación de datos)	<p><u>Ejecución técnica:</u></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Estudio y selección del material recopilado.</li><li>• Planificación de la campaña.</li><li>• Realización del levantamiento.</li><li>• Procesamiento de los datos.</li><li>• Generación del producto final.</li><li>• Análisis y validación de los resultados.</li><li>• Informe.</li><li>• Revisión y corrección.</li></ul> <p><u>Investigación:</u></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Utilización de escáner laser.</li><li>• Aplicación de software para el procesamiento de información 3D.</li><li>• Análisis de la información LIDAR.</li><li>• Integración de la nueva tecnología LIDAR con métodos clásicos.</li></ul> <p><u>Recopilación de datos</u></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Recopilación de antecedentes.</li></ul>	

		<ul style="list-style-type: none"><li>• Obtención de datos in-situ, estado y existencia de los mojones.</li></ul>	
14	Bibliografía de Consulta:	<ul style="list-style-type: none"><li>• George Vosselman and Hans-Gerd Maas. 2010. Airborne and Terrestrial LASER SCANNING. Whittles P, CRC Press. UK.</li><li>• Guochang Xu (Ed.). 2011. Sciences of Geodesy-II. Innovations and Future Developments. Springer.</li><li>• Hoffman B. 2001. GPS, Theory and Practice. Springer WienNewYork</li><li>• Jie Shan – Charles K. Toth (Ed.). 2009. Topographic Laser Ranging and Scanning. Principles and Processing. CRC Press.</li><li>• John N. Hatzopoulos. 2008. Topographic Mapping. Covering the Wider Field of Geospatial Information Science and Technology. Universal Publishers.</li><li>• Kleusberg, A. Teunissen, P. (Eds.). 1996. GPS for Geodesy. Springer</li></ul>	

		<ul style="list-style-type: none"><li>• Leick, A. 1990. GPS Satellite Surveying. Jhon Wiley &amp; Sons.</li><li>• Mathias Lemmens. 2011. Geo-information. Technologies, Applications and the Environment. Springer.</li><li>• Paul D. Groves. 2008. GNSS, Inertial, and multisensor Integrated. Navigation Systems. Artech House, Boston-London.</li><li>• Torge, W. 2001. Geodesy. 3rd Edition. de Gruyter.</li></ul>	
15	Información Especializada: (especialistas, Internet, Mail)	<ul style="list-style-type: none"><li>• Información necesaria para el procesamiento de las mediciones GNSS de la estación permanente LPGS.</li><li>• Fluido contacto con el creador de las herramientas Lastools de procesamiento LIDAR, Martin Isenburg, como parte de grupos de internet dirigidos.</li><li>• Página web en la cual se publican las últimas noticias sobre LIDAR: <a href="http://blog.lidarnews.com/">http://blog.lidarnews.com/</a>.</li></ul>	
16	Instrumental y medios: (disponible por parte de alumnos y/o instituciones)	<ul style="list-style-type: none"><li>• Escáner Laser Faro Focus Trimble TX5</li><li>• Kit de esferas y tags planas.</li></ul>	

“Agrimensura 3D con tecnología LiDAR”

		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Equipos GNSS: 1 Trimble R5 y 2 Trimble 4700.</li> <li>• Estación Total Trimble M3 5”</li> <li>• Mini Prisma</li> <li>• Nivel Pentax x28</li> <li>• Miras</li> <li>• PC Windows 7 Ultimate 64-bit SP1 Intel Core i7 – 4790 CPU @ 3.60 GHz, 16,0 GB RAM, NVIDIA Ge Force GT 740</li> <li>• software de procesamiento SCENE y Trimble Real Works</li> </ul>	
17	Instrumental y medios: (A solicitar al Dto. Agrimensura)	Ninguno.	
18	Encuadramiento Legal: (Si lo hubiere)	Ninguno.	
19	Aspectos Contractuales: (si los hubiere)	Ninguno.	
20	Aplicación del Arancel Profesional: (si corresponde)	Ninguno.	
21	Determinación de Gastos: (si corresponde)	Ninguno.	
22	Aval del Director:	Prof. Dr. Daniel Del Cogliano.	
23	Aval del Codirector: (si lo hubiere)	Ing. Agrim. Rodrigo Loray.	
24	Observaciones del Director y/o Codirector	La candidata es becaria del CIN (Beca Estímulo a las Vocaciones Científicas. Convocatoria 2014. CIN). La misma se desarrolla en el tema LIDAR y bajo mi dirección.	

“Agrimensura 3D con tecnología LiDAR”

		Considero que la alumna está en condiciones de desarrollar el trabajo propuesto y que el mismo es de gran interés para el Dpto. de Agrimensura.	
25	Tareas en las que se Especializa c/Alumno	1 alumno.	

**Plan de Trabajo**

**“Agrimensura 3D con tecnología LIDAR”**

**Alumno: FALIP, Sofia**

**Nº de alumno: 60295/4**

**Director: Prof. Dr. Daniel Del Cogliano**

**Codirector: Ing. Agrim. Rodrigo Loray**

**Año de ejecución: 2015**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**DEPARTAMENTO DE AGRIMENSURA**

**CATEDRA TRABAJO FINAL**

**PROFESOR: Ing. J.Ricardo SOTO**

## **Introducción**

La tecnología LIDAR (Light Detection and Ranging) vinculada a los sistemas GNSS posibilita la obtención de información georreferenciada 3D de gran precisión y alta resolución. El usuario accede a grandes bancos de datos con una métrica de extraordinaria calidad, en la que las superficies son representadas a través de una densa nube de puntos Laser, a cada uno de los cuales es posible asignar coordenadas espaciales.

Las aplicaciones son diversas, y muchas de ellas están naturalmente relacionadas con la Agrimensura. Por ejemplo, los catastros 3D que se discuten desde hace varios años en el mundo, encuentran en esta tecnología una herramienta básica.

De igual modo, los modelos 3D de edificios (BIM: Building Intelligent Models), vegetación y maquinaria, constituyen actualmente la base para trabajos modernos en arquitectura, urbanismo, ingeniería y recursos naturales.

En el presente trabajo se explorarán los aspectos topográficos y geodésicos que el agrimensor debe considerar en la etapa de medición y de procesamiento, para conseguir un modelo 3D de alta precisión y resolución a partir de observaciones LIDAR.

La experiencia involucra, en particular, el relevamiento de dos edificios no adyacentes de una misma manzana y pertenecientes a la UNLP: el edificio central de la Facultad de Ingeniería y el Colegio Nacional.

La actividad propuesta incluye la medición con LIDAR terrestre Trimble TX5. Este sensor fue adquirido por la UNLP (FCAG y FBA) en Diciembre de 2014, y es el primero de su tipo que pertenece a una universidad nacional. Involucra además, mediciones con GNSS geodésico y técnicas clásicas topográficas.

## **Objetivos**

La finalidad del trabajo es amplia, pues incluye el conocimiento y experimentación con el nuevo instrumental LIDAR, la utilización y análisis de la información a través de software específico y la obtención de un modelo 3D, debidamente georreferenciado, de los edificios que serán relevados. No obstante, el interés es fundamentalmente metodológico.



Descripción sintética de los objetivos:

- Estudio y aplicación de la tecnología LIDAR.
- Poner en práctica esta nueva tecnología (LIDAR) a partir de un “sensor fijo” y software recientemente adquirido por la UNLP.
- Establecer conocimientos básicos trasmisibles para el desarrollo y aplicación de la tecnología LIDAR.
- Consolidar una base de datos confiable de edificaciones de la UNLP, que pueda ser utilizada en futuros análisis.
- Obtener un producto de alta calidad geométrica (1 a 3 cm) y resolución (cientos de puntos/m<sup>2</sup>).

### **Alcance**

- Medición de parte del Edificio Central de la Facultad de Ingeniería y parte del Colegio Nacional de la UNLP con un sensor LIDAR TX5.
- Generación de un modelo 3D georreferenciado de los edificios relevados.
- Aplicación de técnicas topográficas clásicas y GNSS para la correcta vinculación altimétrica y georreferenciación de la información LIDAR.
- Evaluación de las precisiones obtenidas por medio de verificación con métodos extrínsecos.
- Generación de un producto con aplicación en la ingeniería, la arquitectura y otras disciplinas.

### **Fuente de datos iniciales**

Planos e información de interés (estado de conservación, accesibilidad, eventuales proyectos de ampliación y datos históricos) sobre ambos edificios. La misma será solicitada a las autoridades de la UNLP.

Por otro lado, se accederá a las monografías de puntos altimétricos y de la Red POSGAR07 en la zona de trabajo.

### **Ámbito de realización**

El trabajo de campo se desarrollará en el Edificio Central de la Facultad de Ingeniería y Colegio Nacional “Rafael Hernández” de la UNLP. Los mismos se encuentran sobre la Avenida 1 entre las calles 47 y 50 de la ciudad de La Plata. A continuación se muestra una imagen satelital obtenida del Google Earth.

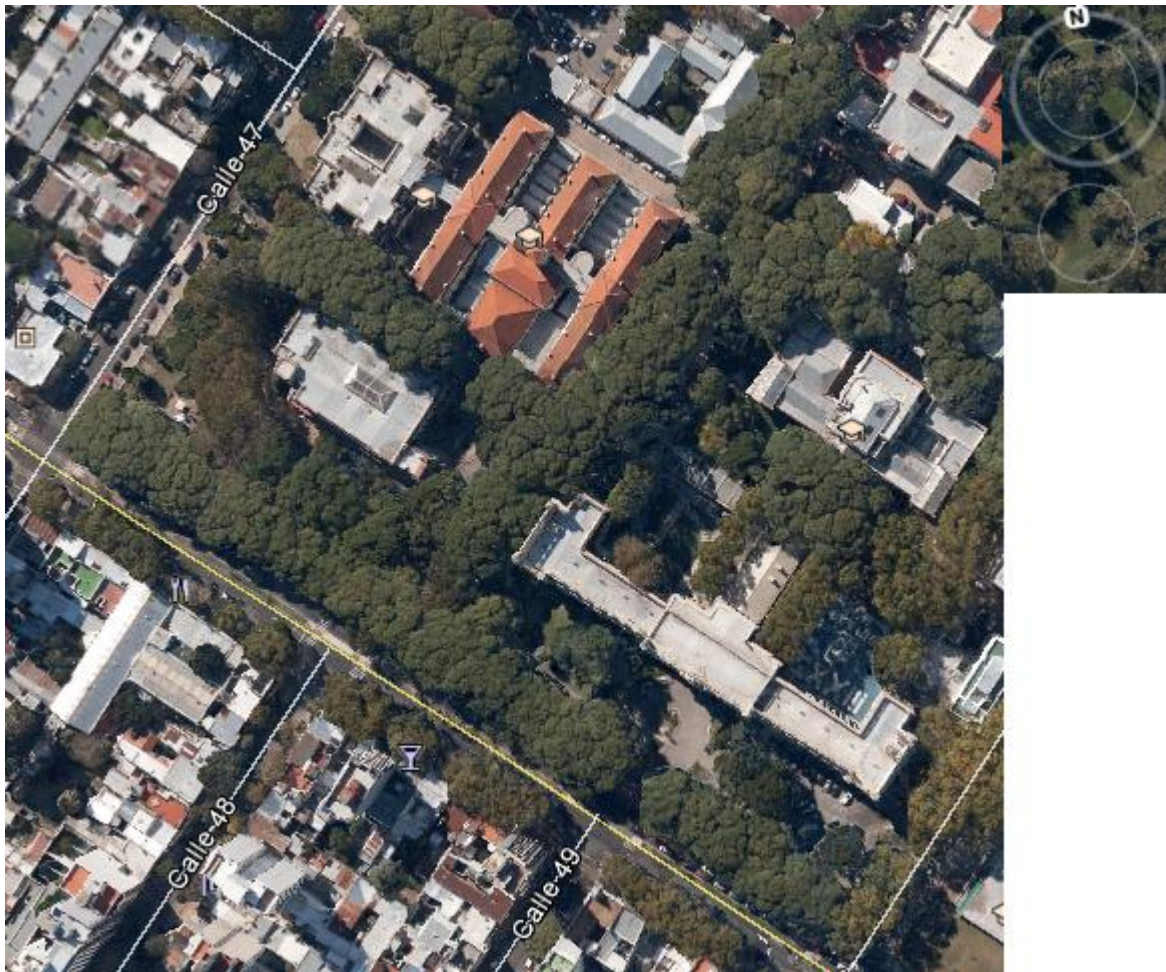


Imagen N°1: Ámbito de realización del trabajo de campo.

El trabajo de gabinete se llevará a cabo en una oficina del edificio del Departamento de Agrimensura (FI-UNLP), que cuenta con las comodidades necesarias y una PC de última generación adquirida en Diciembre de 2014 y destinada exclusivamente al procesamiento de información LIDAR.



Imagen N°2: Ámbito de realización del trabajo de gabinete.

## **Metodología**

En primer término se desarrollará la fundamentación teórica de la tecnología LIDAR, basada en la bibliografía detallada en este mismo documento y eventuales actualizaciones presentes en páginas web. A su vez, se estudiará y analizará el sensor Laser TX5 (manual y hardware) y los software de procesamiento SCENE y Trimble Real Works.

Se efectuará una planificación previa en gabinete que incluirá la elección de puntos altimétricos y POSGAR para la correspondiente referenciación del trabajo.

A continuación se realizará el reconocimiento de las marcas seleccionadas y de los edificios y sus alrededores.

Posteriormente, se realizará la planificación de campaña, y se efectuarán las mediciones con el escáner laser de las fachadas del Edificio Central de la Facultad de Ingeniería y del Colegio Nacional “Rafael Hernández” de la UNLP. En esta instancia, es crucial definir una adecuada distribución de estaciones de medición LIDAR y de objetos de referencia, que permitan vincular los diferentes relevamientos y asignar, con posterioridad, coordenadas geodésicas a los mismos.

Se generará una poligonal planialtimétrica que vincule los relevamientos de ambos edificios mediante métodos topográficos clásicos. La georreferenciación estará basada en

determinaciones GNSS geodésicas y la vinculación altimétrica de ambas edificaciones se efectuará con nivelación geométrica.

Una vez finalizadas las tareas de campo, se comenzará con el procesamiento de los datos obtenidos. Los mismos serán transferidos desde el escáner a la PC y se iniciará el procesamiento con software SCENE el cual incluirá: filtrado de la nube LIDAR para eliminar puntos anómalos, borrado manual de información no deseada, identificación y creación de objetos de referencia, registro y georreferenciación de los puntos resultantes. Con los escaneos registrados y georreferenciados; se obtendrá un modelo 3D de ambos edificios.

El producto será evaluado internamente a través de parámetros estadísticos del software de procesamiento. Se incorporarán además, un conjunto de puntos de control externos que permitirán evaluar la exactitud (accuracy) de los modelos 3D obtenidos.

### **Cronograma de ejecución**

Se presenta una tabla en la que se detallan las actividades a realizar, el tiempo que se espera que demanden y la fecha probable de ejecución de las mismas.

<b>Actividades</b>	<b>Mes</b>	<b>Mes</b>	<b>Mes</b>	<b>Mes</b>	<b>Mes</b>	<b>Mes</b>
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Fundamentación teórica de la tecnología LIDAR</b>	X	X				
<b>Estudio (manual y hardware) del sensor Laser TX5</b>	X	X	X			
<b>Estudio de los software de procesamiento SCENE y Trimble Real Works</b>	X	X	X			
<b>Planificación previa en gabinete</b>			X			
<b>Reconocimiento del terreno</b>			X			
<b>Planificación de la campaña</b>			X			
<b>Realización del levantamiento</b>			X	X		
<b>Procesamiento de los datos</b>			X	X	X	
<b>Análisis y validación de los resultados</b>			X	X	X	
<b>Elaboración de informe</b>	X	X	X	X	X	X
<b>Revisión y corrección</b>					X	X

### **Estimación de Resultados a Obtener**

A continuación se enuncian sintéticamente los resultados que se pretenden obtener:

- Definición metodológica para integrar la nueva tecnología LIDAR con métodos clásicos con puntos georreferenciados de alta calidad.
- Representación 3D de edificios y hechos existentes de interés.
- Utilización de software diverso para el manejo de información 3D.
- Obtención de un modelo 3D de alta resolución y calidad centimétrica.

### **Conclusiones a Obtener**

- Las técnicas LIDAR representan una herramienta capaz de producir información 3D de alta calidad y resolución inédita.
- La vinculación entre diferentes relevamientos LIDAR, realizada en forma geodésica, es de precisión centimétrica y puede ser georreferenciada.
- La información 3D debidamente georreferenciada es integrable a bases de datos o sistemas de información geográfica en forma simple.
- El desarrollo de aplicaciones y análisis de la información LIDAR, requiere la formación de recursos humanos y la conformación de grupos interdisciplinarios de trabajo.
- El modelo 3D obtenido será utilizable para futuros estudios, análisis y eventuales modificaciones constructivas de los edificios relevados.
- Los resultados de este trabajo pueden ser replicados en diferentes disciplinas.

### **Clasificación de etapas**

#### *Etapas de ejecución técnica*

Estudio y selección del material recopilado; planificación de la campaña; realización del levantamiento; procesamiento de los datos; generación del producto final; análisis y validación de los resultados; informe; revisión y corrección.

*Etapas de investigación*

Utilización de escáner laser; aplicación de software para el procesamiento de información 3D; análisis de la información LIDAR; integración de la nueva tecnología LIDAR con métodos clásicos.

**Bibliografía estimada de consulta**

Se cuenta con la siguiente bibliografía:

- George Vosselman and Hans-Gerd Maas. 2010. Airborne and Terrestrial LASER SCANNING. Whittles P, CRC Press. UK.
- Guochang Xu (Ed.). 2011. Sciences of Geodesy-II. Innovations and Future Developments. Springer.
- Hoffman B. 2001. GPS, Theory and Practice. Springer WienNewYork
- Jie Shan – Charles K. Toth (Ed.). 2009. Topographic Laser Ranging and Scanning. Principles and Processing. CRC Press.
- John N. Hatzopoulos. 2008. Topographic Mapping. Covering the Wider Field of Geospatial Information Science and Technology. Universal Publishers.
- Kleusberg, A. Teunissen, P. (Eds.). 1996. GPS for Geodesy. Springer
- Leick, A. 1990. GPS Satellite Surveying. Jhon Wiley & Sons.
- Mathias Lemmens. 2011. Geo-information. Technologies, Applications and the Environment. Springer.
- Paul D. Groves. 2008. GNSS, Inertial, and multisensor Integrated. Navigation Systems. Artech House, Boston-London.
- Torge, W. 2001. Geodesy. 3rd Edition. de Gruyter.

**Información especializada que se prevé obtener de otras fuentes**

Se obtendrá de la estación permanente LPGS los datos necesarios para procesar las mediciones GNSS.

A su vez, se posee fluido contacto con el creador de las herramientas Lastools de procesamiento LIDAR, Martin Isenburg, como parte de grupo de internet dirigidos.

Se consultará la página web, <http://blog.lidarnews.com/>, en la cual se publican diariamente todas las novedades en lo que respecta a LIDAR.

Se analizarán publicaciones científicas sobre la especialidad.

### **Equipamiento y herramientas necesarias**

Para la realización del trabajo propuesto se cuenta con:

- oficina ubicada en el edificio del Dpto. de Agrimensura (FI-UNLP);
- PC de última generación adquirida en Diciembre de 2014 y destinada exclusivamente al procesamiento de información LIDAR (PC Windows 7 Ultimate 64-bit SP1 Intel Core i7 – 4790 CPU @ 3.60 GHz, 16,0 GB RAM, NVIDIA Ge Force GT 740);
- un sensor LIDAR Trimble TX5 adquirido en Diciembre de 2014. FCAG-FBA de la UNLP;
- kit de esferas y tags planas;
- software de procesamiento SCENE y Trimble Real Works adquiridos en Diciembre de 2014. FCAG-FBA de la UNLP;
- equipos GNSS: 3 receptores GPS (1 Trimble R5 y 2 Trimble 4700). FCAG-UNLP;
- estación total Trimble M3 5”
- mini prisma;
- nivel punta x28;
- miras.

No se prevé solicitar instrumental al Departamento de Agrimensura.

## **Observaciones del Director**

La realización de las tareas incluidas en este plan de trabajo, representan desde mi punto de vista, un aporte original con evidente proyección de futuro, y se corresponde con la temática de la Beca de Estímulo a las Vocaciones Científicas del CIN, que la estudiante tiene en desarrollo bajo mi dirección.

Por otra parte, la alumna es parte de un grupo de trabajo en formación, sobre la temática LIDAR, en el que participan investigadores de la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, la Facultad de Bellas Artes y la Facultad de Ingeniería.

Considero además, que la candidata cuenta con las condiciones personales y la infraestructura necesaria para llevar adelante la actividad propuesta.

Finalmente, los resultados representarán la primera experiencia concreta, en una universidad argentina, de un relevamiento LIDAR en todas sus etapas: diseño, medición, procesamiento y análisis.