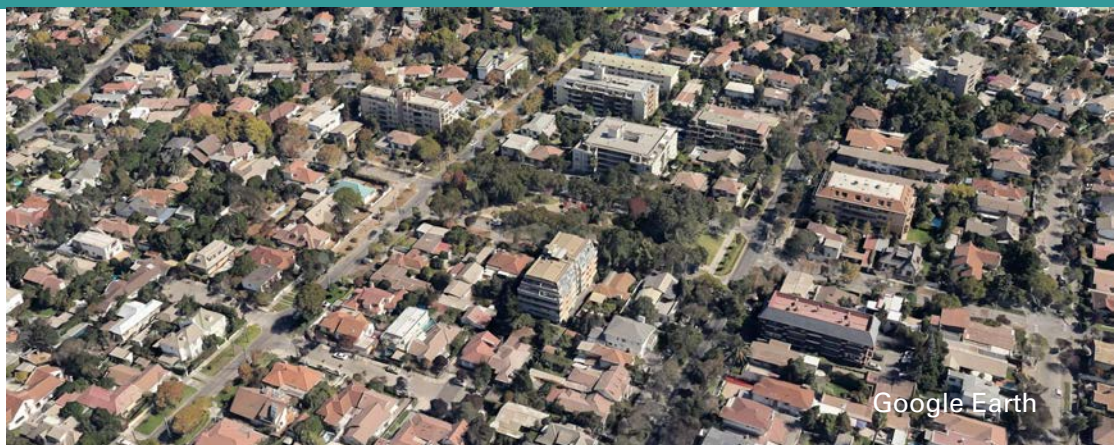




Cartógrafo.CL/02-2021



José A. Carrasco
Ingeniero de Ejecución en
Geomensura

Felipe Carvajal
Ingeniero de Ejecución en
Geomensura

Óscar Moreno
Ingeniero Geomensor
MSc. en Teledetección

Ariel Silva
Ingeniero de Ejecución en
Geomensura.
Magíster en Geomática



jose.carrasco@geocom.cl

Combinación de técnicas geoespaciales

RESUMEN

El constante desarrollo tecnológico en el área de la instrumentación e infraestructura geodésica proporciona una extensa gama de soluciones, orientada a resolver los diferentes desafíos que la industria propone. Desde estaciones totales, receptores GNSS, niveles digitales, escáner láser, sistemas aéreos no tripulados o infraestructura como redes GNSS (Global Navigation Satellite System / Sistema de Navegación Global por Satélite) activas y en tiempo real, han alcanzado un alto nivel de automatización en las etapas de observación, cálculo y accesibilidad a los datos, permitiendo un aumento considerable en la eficiencia de los procesos topográficos y geodésicos. En este sentido, la representación topográfica puede ser abordada mediante técnicas de observación geoespacial aisladas, o por una combinación de estas, con el fin de conseguir una buena representación. En este contexto, el nivel de desarrollo tecnológico de cada solución permite llegar a un consenso sobre la existencia de la solución más indicada para cada necesidad. Sin embargo, hoy en día esta premisa es flexible, ya que, la integración de instrumentos y técnicas es una realidad completamente accesible y sencilla para los usuarios ampliando el horizonte de posibilidades respecto a la generación de productos finales.

En este artículo se presenta la integración de técnicas de GNSS, escáner láser y fotogrametría para la representación topográfica, también se analiza metodológicamente cada técnica para evidenciar sus ventajas y desventajas. Como resultado se obtienen representaciones topográficas georreferenciadas, representativas y con alto nivel de detalle, producto de la integración de las técnicas utilizadas.

INTRODUCCIÓN

La observación de datos geospaciales mediante diferentes técnicas o instrumentos abre un interesante debate respecto a cuál sería la mejor opción para abordar un determinado proyecto. Generalmente, para la elección son evaluados aspectos relativos a factibilidad técnica, precisión, representatividad, eficiencia en la captura de datos y costos asociados, donde el equilibrio de estos aspectos es el fundamento para la elección de alguna técnica, instrumento o posibles integraciones.

En particular, este trabajo evalúa la representación topográfica como producto final a partir de la integración de GNSS, escáner láser y fotogrametría. En el caso de GNSS, técnica ampliamente usada por la comunidad geoespacial, posee un carácter global, el cual permite el proceso de georreferenciación mediante diferentes métodos de observación, alcanzando determinados niveles de precisión, posicionando un levantamiento en un referencial dado. En lo referente al segmento usuario, GNSS evoluciona constantemente, tanto en teoría, instrumentación e infraestructura, logrando llevar complejos algoritmos o métodos a soluciones accesibles para los usuarios; así hoy en día se encuentran receptores que incorporan avanzados microprocesadores que integran sensores de diferente naturaleza, sumado a potentes softwares de campo que automatizan la captura de información geoespacial tornando la captura discreta en una forma eficiente de adquisición de datos.

Para el caso de infraestructura, redes activas, en tiempo real como la Red GNSS de GEOCOM (<https://www.geocom.cl>), estas permiten contar con más información a la hora del postproceso, y también contar con una base para posicionamiento en tiempo real. En ambos casos el empleo de esta red permite la conexión al marco de referencia geodésico disponible y para la cual la red está asociada.

En particular, la Red GNSS GEOCOM registra continuamente observaciones crudas en las estaciones que la componen, las cuales, pueden ser empleadas en postproceso mediante el software Trimble Business Center (TBC), el cual permite un acceso automático a estas. A su vez, el envío de correcciones diferenciales en tiempo real desde la Red GNSS de GEOCOM mediante sistema de radio UHF o internet (NTRIP) son administradas mediante el software de campo Trimble Access, permitiendo a los usuarios independencia respecto a una estación base. En esta experiencia se usó Trimble R12i recibiendo correcciones diferenciales que incorporan todas las constelaciones y señales disponibles, de esta manera, el uso de Trimble R12i permite la revisión de tecnologías como ProPoint y TIP.

Para el caso de escáner láser y fotogrametría, el concepto de captura masiva de datos geospaciales es el más adecuado para diferenciar estas técnicas respecto a GNSS; en la práctica, una gran cantidad de datos es recolectada en cortos intervalos de tiempo. Al evaluar la representación que estas técnicas consiguen en un proceso de captura, el resultado conduce a un alto nivel de representatividad y precisión principalmente asociado a la tecnología integrada y metodología empleada.

En el caso de escáner láser, este es un instrumento ampliamente usado en actividades, tales como minería, obras civiles, arqueología, túneles y monitoreo de estructuras. Entre sus principales características está la productividad y representatividad que ofrece en sus resultados. Por otro lado, su carácter terrestre lo sitúa generalmente en referencias locales, que es una oportunidad de integración con GNSS para la georreferenciación de sus productos. En particular, en este trabajo el instrumento empleado incorpora características de una estación total como Trimble SX12, permitiendo aplicaciones topográficas como la georreferenciación global o local de sus productos mediante procesos tradicionales.

Finalmente, el uso de técnicas fotogramétricas abarca un sinnúmero de aplicaciones en diferentes áreas de la industria, en las cuales la productividad que ofrece en los procesos de captura y en la calidad de los productos generados, la sitúan en una posición privilegiada en el segmento de captura de datos geospaciales. A diferencia de escáner láser, el uso de fotogrametría desde un punto de vista geodésico considera directamente la integración de GNSS para la georreferencia-

ción de sus productos, ya sea mediante la determinación de puntos de control (referenciación indirecta) o también mediante métodos PPK o RTK (referenciación directa).

A continuación, serán presentadas las consideraciones teóricas y metodológicas empleadas en la integración propuesta de estas tres técnicas, con el objetivo de evaluar la representación topográfica obtenida en el producto final.

METODOLOGÍA

El proceso metodológico se basa en 3 etapas, observación, procesamiento y generación de productos finales. Cada una de estas fue diseñada en función de conseguir la integración de las técnicas empleadas. Como punto central, la integración de técnicas fue abordada mediante georreferenciación de las observaciones obtenidas por cada técnica.

A continuación, son presentadas las asociadas al proceso de observación:

- Levantamiento GNSS de elementos discretos: mediante el uso de la Red GNSS GEOCOM en tiempo real, a través de NTRIP, fueron levantados elementos discretos presentes en el área de estudio, para esto fueron automatizados los flujos de trabajo según lo presentado en el ítem [GNSS Trimble R12i](#) empleando Trimble Access y el receptor GNSS R12i.
- Levantamiento masivo de datos geospaciales mediante la estación total de escaneo Trimble SX12: a través del uso de la función topografía integrada explicada en el ítem [Topografía integrada: integración de sistemas locales y globales](#), fueron realizadas dos instalaciones mediante trisección o estación libre, georreferenciando las nubes de puntos capturadas con la estación SX12.
- Levantamiento fotogramétrico con Phantom 4 RTK: en esta etapa se utilizó el sistema mediante el método de referenciación directa PPK (cinemático en postproceso), para lo cual se utilizó como base GNSS la estación SNTI, perteneciente a la Red GNSS de GEOCOM.

El procesamiento de datos se orientó a la obtención de los dos productos fotogramétricos principales, para esto se utilizó TBC Módulo de fotogrametría, donde, en primer lugar, se procesó la trayectoria de vuelo para obtener las coordenadas precisas de cada fotografía, para luego realizar el procesamiento fotogramétrico obteniendo la nube de puntos y ortofoto.

Finalmente, la integración de técnicas y la visualización del producto final son obtenidas en TBC, el cual permite la unificación de diferentes fuentes de datos, así fueron importados los levantamientos realizados con GNSS, las nubes de puntos obtenidas con SX12 y los resultados fotogramétricos.

En la [Figura 1](#), se presenta la metodología propuesta, considerando cada una de las etapas antes mencionadas y la unión final en TBC.

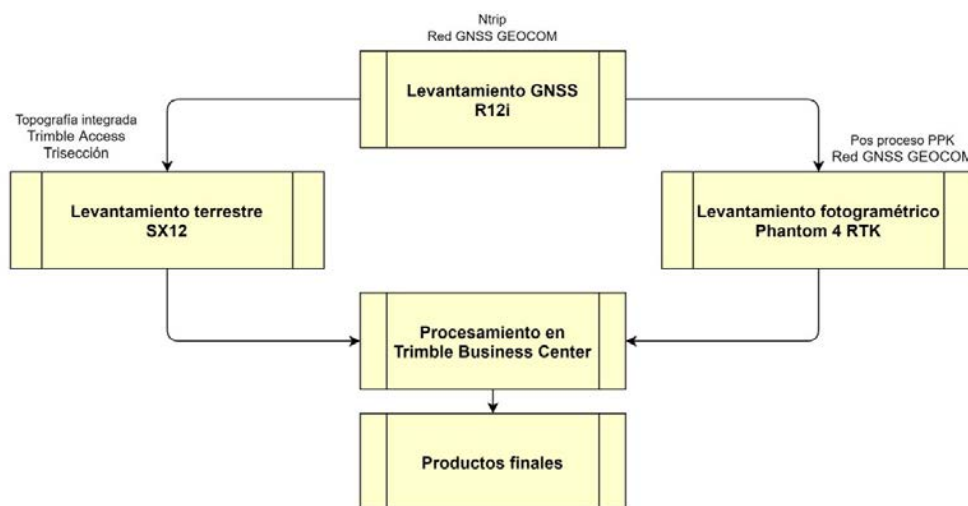


Figura 1: Metodología de trabajo.

METODOLOGÍA

El ambiente urbano debe ser uno de los escenarios más difíciles en la captura de datos geoespaciales. Obstrucciones de línea visual para instrumentos ópticos, árboles que dificultan la aerotriangulación, elementos móviles como vehículos, entre otros aspectos, hacen que el ámbito urbano sea desafiante en términos topográficos. Así, la plaza Dinamarca (Figura 2), comuna de Providencia, Santiago de Chile, que fue el área de estudio escogida, reúne todas las características antes mencionadas.

A partir de este escenario, mediante la integración de técnicas, se busca determinar el nivel de detalle de estas y también en su conjunto. En este sentido, características tradicionalmente complejas como la determinación de solera, obstrucciones, líneas de quiebre son abordadas.

DESARROLLO

Marco de referencia y sistemas de coordenadas: Red GNSS GEOCOM

La Red GNSS GEOCOM es una iniciativa de posicionamiento satelital de alta precisión. Esta red produce observaciones brutas GNSS cada una hora en formato T02 y, en paralelo, envía correcciones diferenciales en formato CMRx para posicionamiento RTK.

En específico para este experimento se usa la estación SNTI que corresponde a una estación de referencia GNSS Trimble Alloy que observa GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou además de ser multifrecuencia.

Estas características son vitales para apoyar el posicionamiento RTK. En la Figura 3, se muestra el Skyplot de la estación SNTI perteneciente a la Red GNSS GEOCOM (Silva, 2020).

Figura 2. Plaza Dinamarca.



Figura 3. SNTI - Trimble Alloy (Red GNSS GEOCOM).



La Red GNSS GEOCOM está calculada periódicamente con base en la referencia de SIRGAS-CON mediante múltiples épocas. La última determinación de coordenadas fue basada en la época 2021.00. Por otra parte, se usa UTM 19 S como sistema de coordenadas horizontales junto con EGM08 para reducir las alturas elipsoidales a alturas físicas (Silva, 2020).

GNSS Trimble R12i

La primera técnica utilizada en este levantamiento fue GNSS en modalidad RTK. Para esto se usó el servicio de la Red GNSS GEOCOM, la cual transmite correcciones diferenciales vía internet teniendo a disposición una corrección completa que considera las diferentes constelaciones y señales disponibles. El receptor usado fue un Trimble R12i que contempla dos adelantos tecnológicos preponderantes a la hora de realizar un levantamiento:

Trimble ProPoint. La tecnología ProPoint desarrollada por Trimble presente en los receptores GNSS R12 y R12i, disponible para posicionamiento en tiempo real RTK y RTX. ProPoint incrementa en un 30% su *performance* en escenarios tradicionalmente complejos, como son las áreas emplazadas en lugares con vegetación de gran altura, entornos urbanos o lugares que en general no son ideales para realizar una observación GNSS, esto trae como resultado que los requisitos mínimos para conseguir niveles de precisión aceptables no sean alcanzados (Trimble, 2021a; Silva, 2020; Doucet *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2019; Leandro *et al.*, 2020; Krzyżek, 2013; Trimble survey division, 2012; Department of Transport and Main Roads, 2021; Mian *et al.*, 2020; Brandl *et al.*, 2021; Chen *et al.*, 2021; Trimble, 2020a,b; Moreno, 2020; DJI, 2021; Triamble, 2021b).

En este contexto, ProPoint trabaja bajo el concepto de “gestión de señal flexible”, el cual permite mediante un algoritmo acceder de forma rápida a todas la señales disponibles y constelaciones, generando una alta disponibilidad de satélites, sumado a un filtrado avanzado de señales y modelamiento de errores provenientes de interferencia y de multitrayectoria. Como resultado, ProPoint entrega soluciones robustas que proporcionan un mejor rendimiento en escenarios complejos (Trimble, 2020b).

Trimble TIP presente en los receptores móviles GNSS R12i, la tecnología Trimble TIP (*Tilt Compensation Technology*) incorpora una Unidad de Medición Inercial (IMU), la cual permite una captura de datos GNSS de forma más eficiente debido a la compensación de inclinación basada en la información proporcionada por los sensores de aceleración (acelerómetros) y los sensores de rotación (giroscopios). De esta forma, la medición o replanteo de puntos con jalón inclinado es posible, manteniendo los niveles de precisión del método. La incorporación de Trimble TIP soluciona la problemática de fuentes electromagnéticas locales y su influencia, debido a que el IMU no está afecto a estos fenómenos.

La integración de GNSS y una IMU para posicionamiento geodésico proporciona un alto rendimiento y precisión en sus resultados, sumado a esto la tecnología ProPoint que permite observaciones en condiciones complejas, también presente en R12i, posibilitan incluso mediciones inclinadas en estos complejos escenarios. Trimble TIP está disponible mediante cualquier forma de transmisión de correcciones: Internet, y radio. Como también en levantamientos RTX vía satélite o internet (Trimble, 2021a; Silva, 2020; Doucet *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2019; Leandro *et al.*, 2020; Krzyżek, 2013; Trimble survey division, 2012; Department of Transport and Main Roads, 2021; Mian *et al.*, 2020; Brandl *et al.*, 2021; Chen *et al.*, 2021; Trimble, 2020a,b; Moreno, 2020; DJI, 2021; Triamble, 2021b).

En la [Figura 4](#) se muestra la interfaz del software de campo Trimble Access du-

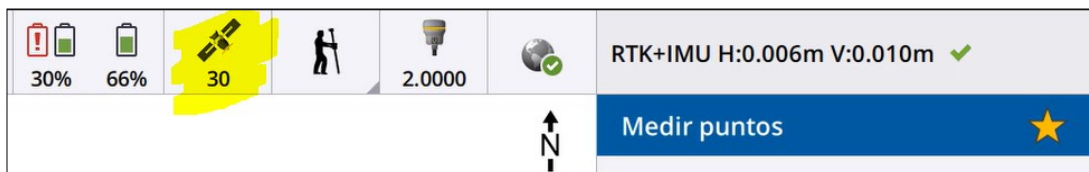


Figura 4. Uso de tecnología ProPoint y TIP durante el levantamiento GNSS de la plaza Dinamarca.

durante el levantamiento GNSS realizado, aquí destacan la cantidad de satélites disponibles (en amarillo) debido a ProPoint y también el uso de la tecnología Trimble TIP (RTK+IMU).

RESULTADOS CON R12i

Durante el levantamiento GNSS fueron capturadas 150 entidades geométricas en un tiempo inferior a 40 minutos; considerando el complejo entorno en cual fue realizado el levantamiento, el Gráfico 1 presenta en una primera instancia la importancia de la multiconstelación, así un número no inferior a 20 satélites (línea azul) estuvo disponible durante el intervalo de tiempo en el cual se realizó el levantamiento. Este último indicador se ve reflejado en los valores de PDOP (dilución de la precisión en posición), los cuales siempre estuvieron inferior a 2.2, lo que indica una buena distribución satelital (Department of Transport and Main Roads, 2021; Mian *et al.*, 2020; Brandl *et al.*, 2021; Trimble, 2020a,b).

Para el mismo período de tiempo, el Gráfico 2 presenta la precisión horizontal y vertical de los puntos capturados al 95%, en ambos casos los valores no superan los 0.025 m, donde la precisión horizontal es más estable (círculos verdes) y de menor valor en comparación a la precisión vertical (círculos rojos).

Como fue comentado anteriormente, un aspecto importante que permite la tecnología de R12i, es la medición inclinada. Esta característica está alineada con aspectos relativos a productividad y a la búsqueda de la integración completa entre ProPoint y TIP. En este contexto, durante levantamientos GNSS con R12i el foco está en la “punta del jalón” aprovechando completamente ProPoint y TIP. Cabe destacar que desde un punto de vista técnico, la tecnología TIP se enmarca en el ámbito de las buenas prácticas topográficas que consideran la materialización de la vertical durante una observación GNSS.

Durante el levantamiento GNSS realizado en la plaza Dinamarca fueron realizadas observaciones GNSS inclinadas.

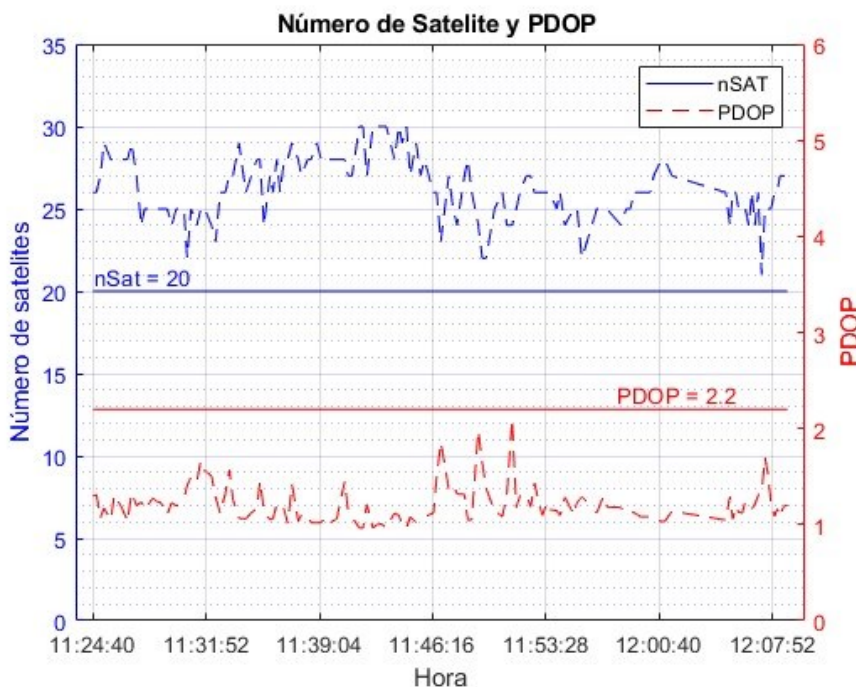


Gráfico 1. Número de satélites y PDOP durante el levantamiento GNSS de la plaza Dinamarca.

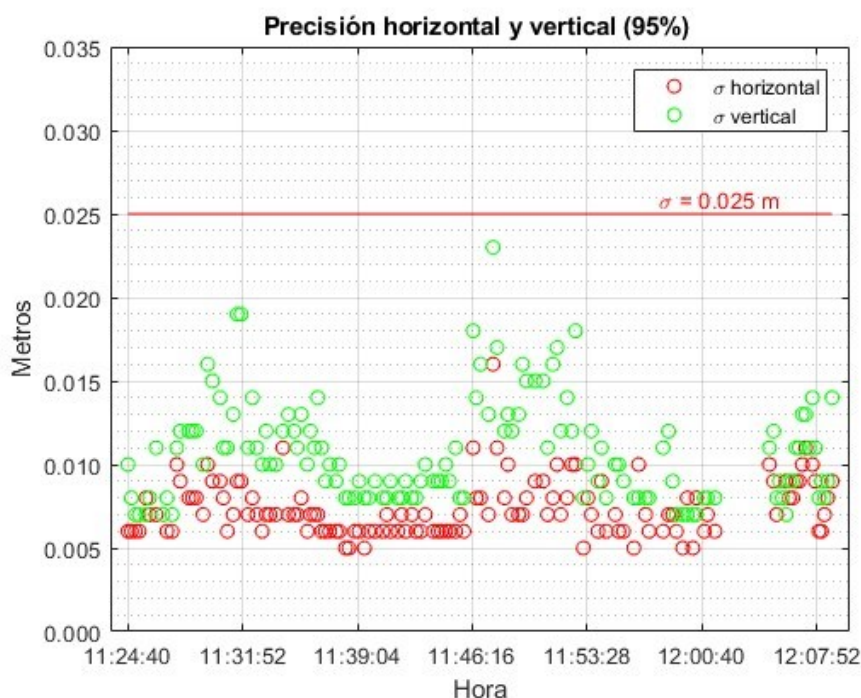


Gráfico 2. Precisión horizontal y vertical durante el levantamiento GNSS.

En el [Gráfico 3](#) se presentan distancias máximas de 0.75 m desde la vertical del punto al eje del instrumento, cabe destacar que ninguna de las observaciones inclinadas fue forzada, más bien estas corresponden a dificultades propias que propone un levantamiento GNSS y que ahora pueden ser abordadas con R12i.

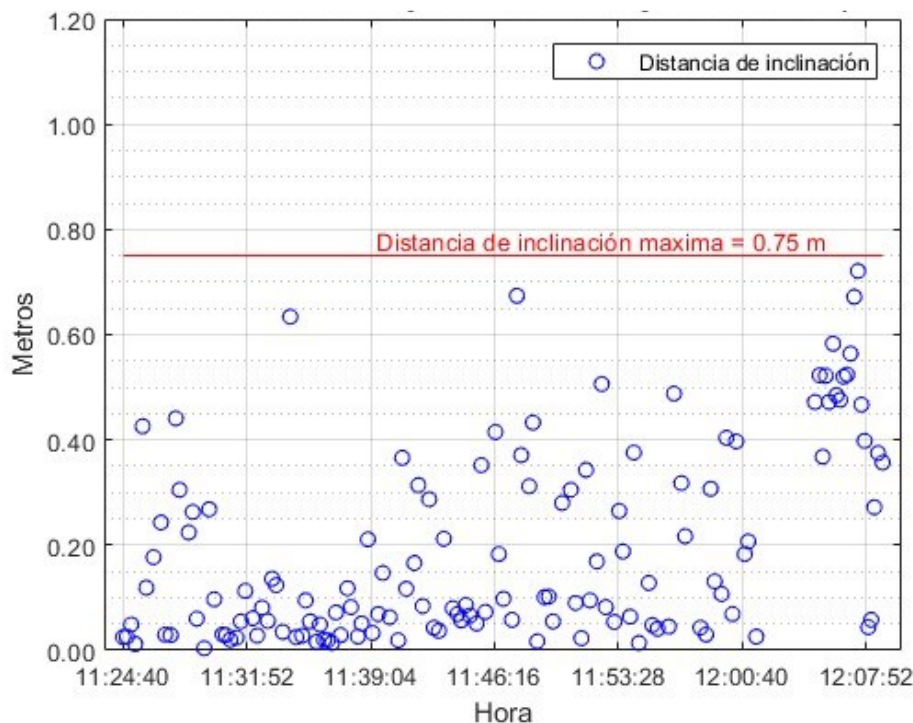


Gráfico 3. Distancia entre la vertical del punto y el eje del instrumento durante el levantamiento GNSS de la plaza Dinamarca.

Automatización en la captura de datos GNSS mediante Trimble Access

La automatización puede ser definida como una disminución sistemática de la interacción entre un humano y una maquinaria. Esta condición supone una disminución de errores asociados a la decisión de un usuario y también genera un aumento en la calidad de los resultados producto del proceso automatizado. En instrumentos geodésicos, la automatización está orientada a tornar más eficientes los procesos de medición u observación en campo, así el desarrollo de software para aplicaciones topográficas se ha posicionado como un elemento diferenciador en la industria (Moreno, 2020).

En el contexto del trabajo desarrollado, el uso de Trimble Access y su módulo biblioteca de características, aborda la automatización en el levantamiento de puntos discretos mediante GNSS, asignando códigos de descripción a entidades geométricas como puntos, líneas, arcos o polígonos que a su vez permiten el dibujo automatizado en tiempo real por parte del usuario. Esta característica aborda una de las principales dificultades en cuanto a la interpretación de la realidad al momento de realizar el levantamiento y cómo esto es interpretado en los productos finales. En la [Figura 5](#), se presenta el módulo de biblioteca de características en la etapa de creación de descriptores y la asociación de entidades geométricas (Moreno, 2020).

Figura 5. Biblioteca de características en Trimble

La imagen muestra la interfaz de usuario de Trimble Access para la creación de una biblioteca de características. El título de la ventana es 'Introducir código de características'. Hay dos campos de texto: 'Código de característica' (con un signo de interrogación) y 'Descripción' (también con un signo de interrogación). Debajo de 'Código de característica' hay un menú desplegable 'Tipo de caract.' con las opciones: 'Punto' (seleccionado), 'Punto', 'Línea', 'Polígono' y 'Código de control'. A la derecha de 'Descripción' hay un campo 'Capa' con un menú desplegable. En la parte inferior de la ventana hay una barra con los botones 'Esc' y 'Aceptar'.

Al momento de realizar un levantamiento la biblioteca de características es asociada la funcionalidad de levantamiento automatizado por código (Figura 6), la cual permite un acceso rápido a esta mediante una interfaz gráfica y está disponible para instrumentos con el software de campo Trimble Access (Moreno, 2020).

Figura 6. Medición por códigos - biblioteca de características en Trimble Access.

Como resultado la automatización del levantamiento genera una representación en tiempo real de los elementos levantados permitiendo el control *in situ* de las características capturadas (Figura 7) (Moreno, 2020).

Figura 7. Medición por códigos, Levantamiento GNSS en Trimble Access.



Topografía integrada: integración de sistemas locales y globales

Una primera aproximación a la integración es abordada mediante R12i y SX12, el módulo de topografía integrada de Trimble Access permite que los datos capturados por SX12 sean transformados en tiempo real al sistema geodésico empleado por GNSS (SIRGAS). Para realizar este proceso es necesario el uso del kit de topografía integrada que contiene un soporte físico que incluye jalón, prisma y receptor GNSS (Figura 8) (Moreno, 2020).

En términos de flujo de trabajo, la opción de topografía integrada es aplicada mediante el método de estación libre o trisección, para esto los puntos de control a los cuales les serán efectuadas las mediciones por estación total, son determinados mediante posicionamiento GNSS en tiempo real; de esta forma, la determinación de la posición de la estación total queda referida al sistema geodésico GNSS en el cual se encuentra posicionado. Para la experiencia desarrollada, se empleó NTRIP a partir de la RED GNSS GEOCOM, el cual proporcionó tanto el posicionamiento geodésico GNSS como la vinculación al marco de referencia (Silva, 2020).

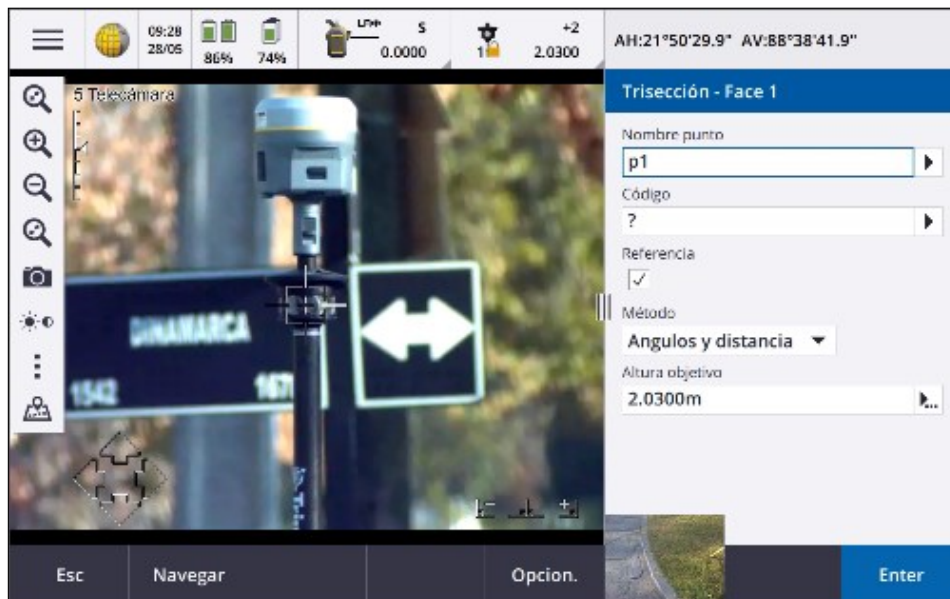


Figura 8. Kit de topografía integrada que contiene un soporte físico que incluye jalón, prisma y receptor GNSS.

RESULTADOS CON TRIMBLE SX12

Trimble SX12 es definida como una estación total de escaneo, esto quiere decir que reúne capacidades inherentes a una estación total y a un escáner láser. Las ventajas de SX12 radican en que, a través de flujos de trabajo conocidos desde las técnicas de topografía, es posible realizar escaneos que ya cuentan con referencia. Esto puede parecer trivial, pero en la realidad es de gran ayuda para mantener la referencia que usualmente viene de GNSS (Trimble, 2020b).

Durante el experimento en la plaza Dinamarca se realizan seis posiciones en donde se escanea solo el área de interés. Esto es particularmente interesante, ya que no es necesario realizar un escaneo 360 teniendo foco en las características que desea levantar. De estas seis posiciones, dos corresponden a estaciones establecidas mediante topografía integrada las cuales dotan del origen referencial. Las posiciones restantes responden a estaciones de escaneo que tienen por objetivo densificar el levantamiento consiguiendo la referencia en el registro de las estaciones.

En la Figura 9, es presentada la configuración de "rectángulo de escaneo" durante el levantamiento en la plaza Dinamarca.

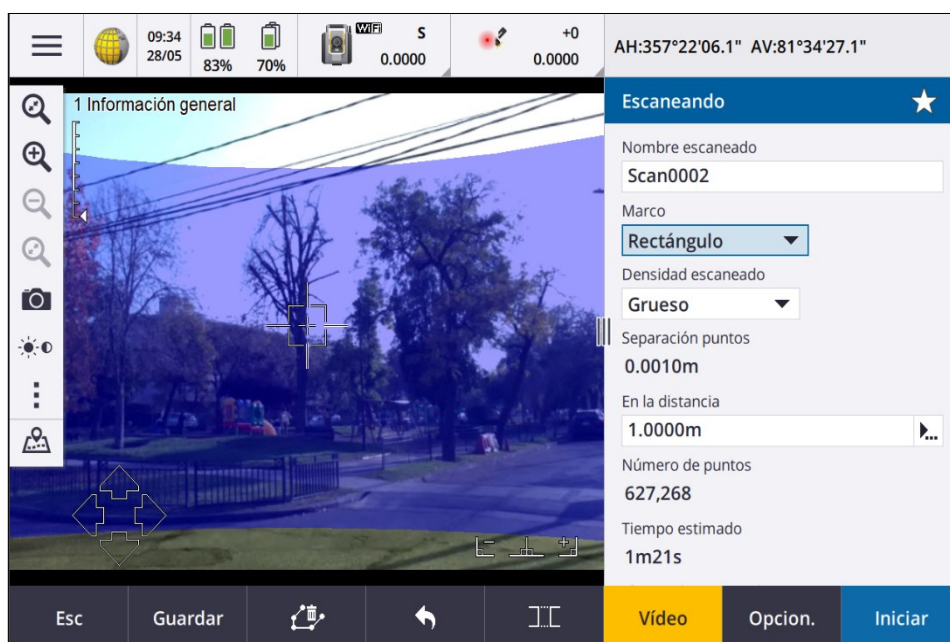


Figura 9. Estación de escaneo en SX12. Configuración de rectángulo de escaneo.

Es importante indicar que las estaciones E1 y E4 han determinado su posición y orientación basándose en observaciones GNSS RTK. Al existir observaciones redundantes, se realiza un ajuste de red 3D en donde contribuyen una serie de observaciones realizadas tanto por GNSS como por la estación total. En la [Figura 10](#), se presentan las elipses de error obtenidas a partir del ajuste por mínimos cuadrados de las estaciones E1 y E2 más las orientaciones P1, P2, P3 y P4:

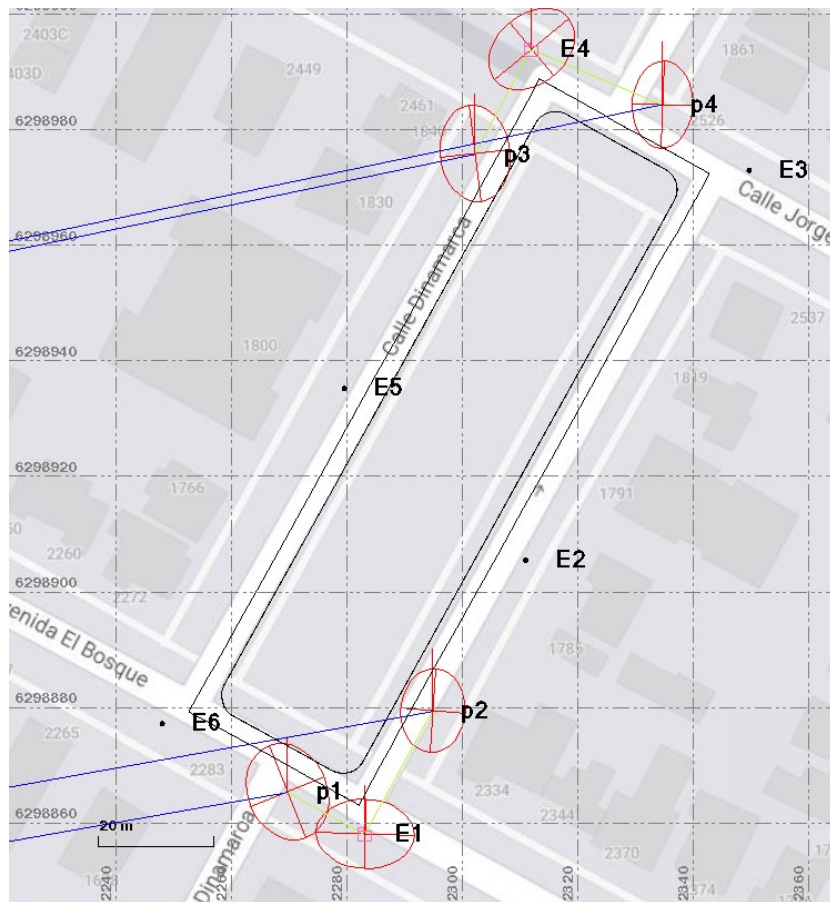


Figura 10. Elipses de error. Para las estaciones E1 - E2 y los puntos de orientación P1, P2, P3, P4.

En la [Tabla 1](#) son presentados los factores de referencia obtenidos desde ajuste para las estaciones E1 - E2 para las diferentes observaciones involucradas en el ajuste 3D (Department of Transport and Main Roads, 2021).

Componente	Factor de referencia
Vector RTK	0.86
Ángulos horizontales	1.06
Ángulos verticales	0.60
Distancias de pendiente	1.03

Tabla 1. Factores de referencia obtenidos del ajuste de las estaciones de escaneo.

En la [Tabla 2](#), son presentados las precisiones asociadas a las estaciones de escaneo E1 - E2.

Coordenada	σ Norte	σ Este	σ Elevación
E1	0.011	0.008	0.009
E4	0.009	0.008	0.009

Tabla 2. Precisiones 3D de las estaciones de escaneo E1 y E4.

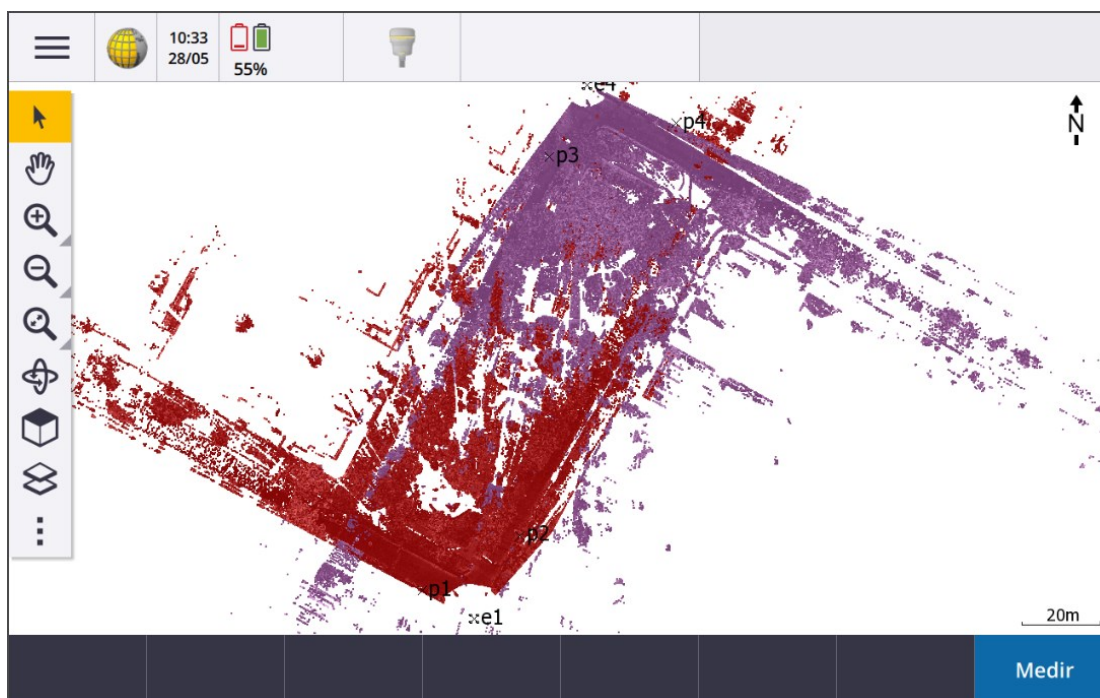


Figura 11. Escaneo realizado con SX12 en la plaza Dinamarca.

En la [Figura 11](#), se presentan los escaneos realizados en la plaza Dinamarca visualizados en Trimble Access.

Un aspecto importante es el proceso de registro, inicialmente se debe definir el concepto de estaciones topográficas y de escaneo, las primeras fijas en posición sirven como base para que las estaciones de escaneo sean ajustadas en posición y orientación, este último proceso corresponde al registro. Esto es particularmente interesante dado que las estaciones fijas son realizadas a través de métodos meramente topográficos (punto conocido y orientación, dos puntos conocidos, estación libre) mientras que las estaciones de escaneo se ajustan en términos de alineamiento de la propia nube.

Con los resultados del procesamiento de las nubes de punto en TBC capturadas en la plaza Dinamarca, se logró determinar la posición y la orientación de la estación total de escaneo en todas sus posiciones considerando la vinculación a la Red GNSS GEOCOM por medio de topografía integrada. En esta etapa, también fueron analizados aspectos como traslapes mínimos y geometrías que otorguen un correcto registro a las estaciones involucradas.

DJI Phantom 4 RTK

Este multirrotor es un equipo muy liviano y sencillo de operar, con un flujo de trabajo muy intuitivo para el usuario. Este dron está equipado con una cámara integrada de 20 MP con un tamaño de sensor de 1". Su confección aerodinámica permite una resistencia al viento de 36 km/h, entregando además una operación muy versátil al estar preparado para volar hasta los 6000 m sobre el nivel medio del mar. Al ser un sistema equipado con referenciación directa, permite la determinación propia de la pose de la cámara, por lo cual no es necesaria la instalación de puntos de control terrestre (GCP) que influyan en el ajuste absoluto del bloque aerotriangulado (Moreno, 2020).

En primer lugar, se realiza la planificación de vuelo que es donde se define el trazado del área a levantar junto con la determinación de la altura de vuelo, esta origina el tamaño del píxel proyectado sobre el terreno, así como también el traslape longitudinal y transversal de las fotografías que serán utilizadas como base para la obtención de la nube de puntos y ortofoto de toda la plaza Dinamarca y sus alrededores.

Durante este proceso de planificación, el software utilizado corresponde a DJI GS RTK, el cual es propio del sistema. Algunos antecedentes del vuelo realizado son presentados en la [Tabla 3](#):

Superficie	1.2 há
Altura de vuelo	80 m
GSD	2.0 cm
Estrategia de planificación	3D Photogrammetry
Traslape transversal	80 %
Traslape longitudinal	85 %
Número de fotografías	174
Tiempo de vuelo	5 min

Tabla 3. Parámetros de la planificación de vuelo.

Para obtener una alta definición tridimensional de la zona de interés, se planifica como estrategia de vuelo el uso de “3D Photogrammetry”, que consiste en ejecutar el bloque planificado dos veces mediante líneas cruzadas (DJI, 2021). Esta planificación es ideal en aquellos lugares donde existen grandes elementos verticales, lo que permitirá obtener una nube de puntos con una mejor definición ([Figura 12](#)).



Figura 12. Ejecución del vuelo fotogramétrico.

Una vez concluido el vuelo, por parte del dron, se obtiene cada una de las fotografías más el archivo móvil GNSS, los que se utilizarán para el procesamiento PPK. Por otro lado, será usado como archivo base GNSS el obtenido en SNTI, perteneciente a la Red GNSS de GEOCOM. Con los datos ya capturados y ordenados, se realiza el procesamiento fotogramétrico en TBC Módulo de fotogrametría ([Figura 13](#)).

Figura 13. Módulo de fotogrametría TBC.





En primer lugar, se define el sistema de coordenadas, para luego importar cada una de las fotografías y el archivo móvil GNSS.

Para realizar el procesamiento de la trayectoria de vuelo, se importa el archivo base GNSS de SNTI, y se utiliza el comando "Descarga de Internet", el que identifica automáticamente el archivo necesario para importarlo al proyecto según el día y hora de vuelo (Figura 14).

Una vez realizado el procesamiento de la trayectoria de vuelo, se obtuvieron las coordenadas precisas para cada una de las fotografías. Para la obtención de los productos fotogramétricos se realiza el proceso de aerotriangulación, el cual se conoce como la determinación de la pose de la cámara de las distintas fotografías que se han adquirido para un bloque específico. La aerotriangulación está basada en algoritmos avanzados de reconocimiento de imágenes que le permiten determinar de forma automática una multitud de puntos de paso (el mismo punto en diferentes fotografías) que permiten realizar un ajuste por mínimos cuadrados de las posiciones y orientaciones de las distintas fotografías (Trimble, 2021b).

Una vez concluido este procedimiento, TBC entrega un completo informe que permitirá conocer la calidad de nuestro procesamiento, y si este cumple con los estándares de precisión requeridos (Figura 15).

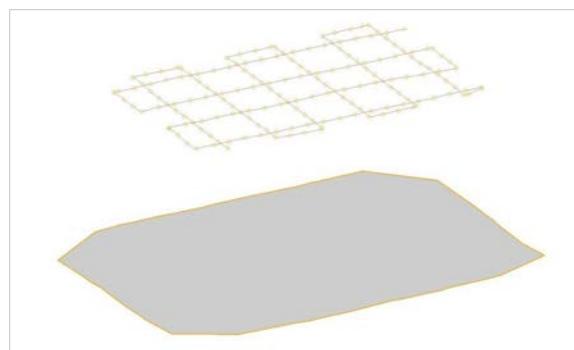


Figura 14. Procesamiento de trayectoria de vuelo Phantom 4 RTK.



Figura 15. Informe de procesamiento TBC.

La última etapa consiste en la generación de los dos productos fotogramétricos principales: nube de puntos y ortofoto.

Una nube de puntos es un conjunto de posiciones en un sistema de coordenadas tridimensional ideado para representar la superficie de un objeto. Al generar la nube de puntos altamente densificada, se obtuvieron en promedio 619 puntos/m² (Figura 16).



Figura 16. Nube de puntos de plaza Dinamarca.

Por otro lado, una ortofoto es una fotografía con proyección ortogonal que es producto de la alineación de las múltiples fotografías capturadas. En este caso, la ortofoto generada tiene una resolución de 2 cm (Figura 17).

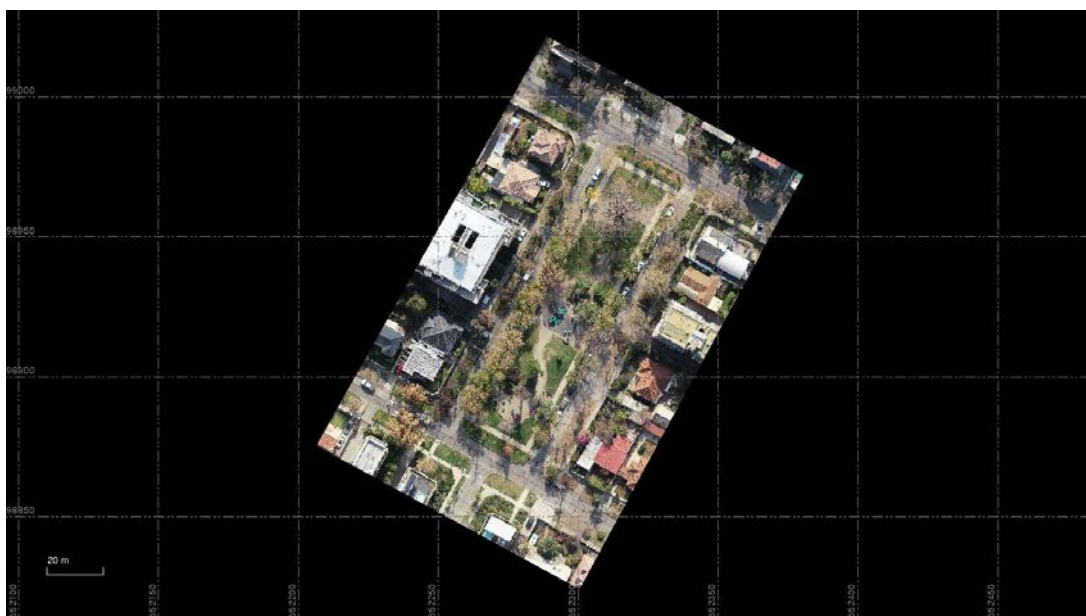


Figura 17. Ortofoto de plaza Dinamarca.

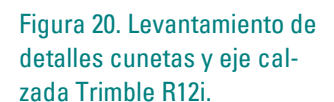
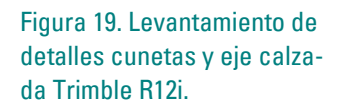
Ambos productos cuentan con referencia conocida obtenida a través del proceso de referenciación directa.

En fotogrametría, el error está directamente asociado a la altura de vuelo, es decir, a menor altura se espera una precisión mayor que si se realizan vuelos más altos. A raíz de lo anterior, en la componente horizontal el error esperado es de 1 a 2 píxeles (hasta 4 cm según GSD definido), mientras que para la componente vertical es de 2 a 3 píxeles (hasta 6 cm).

Combinación de técnicas y entregables finales en TBC

La integración de los datos capturados por cada una de estas tecnologías fue realizada por medio del software TBC Advance, utilizando para este fin los módulos nube de puntos, corredores y drafting específicamente.

- Job Trimble R12i, el cual contiene levantamiento discreto GNSS incluida la biblioteca de características que permite el dibujo automatizado.
- Job Trimble SX10, el cual contiene la georreferenciación del levantamiento por medio de topografía integrada, más captura de panorámicas y escaneos de la zona.
- Ortofoto Geotiff Phantom 4 RTK.
- Nube de puntos del vuelo fotogramétrico en formato *.las



Una de las tareas a realizar, es el registro de Estaciones de escaneo de la nube de puntos levantada con Trimble SX12 sobre la base de estaciones referenciadas por medio de Topografía integrada con GNSS Trimble R12i, apoyado por la Red GNSS GEOCOM con correcciones diferenciales por internet. Este procedimiento es realizado en el módulo nube de puntos y en pares, donde la nube roja corresponde a la referenciada y la verde a la nube por orientar.

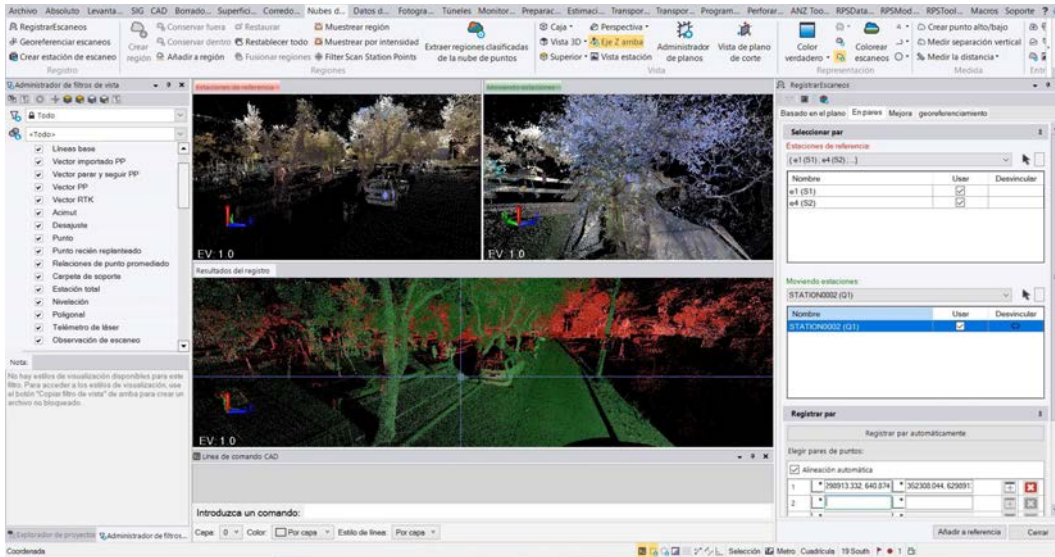


Figura 21. Registro de la nube de puntos Trimble SX12.

Una herramienta fundamental es la clasificación de la nube de puntos. TBC permite clasificar nube de puntos en espacios al aire libre, bajo techo y subterráneos. Al aire libre, permite la clasificación de edificios, terreno, vegetación alta, postes, señales y líneas eléctricas.

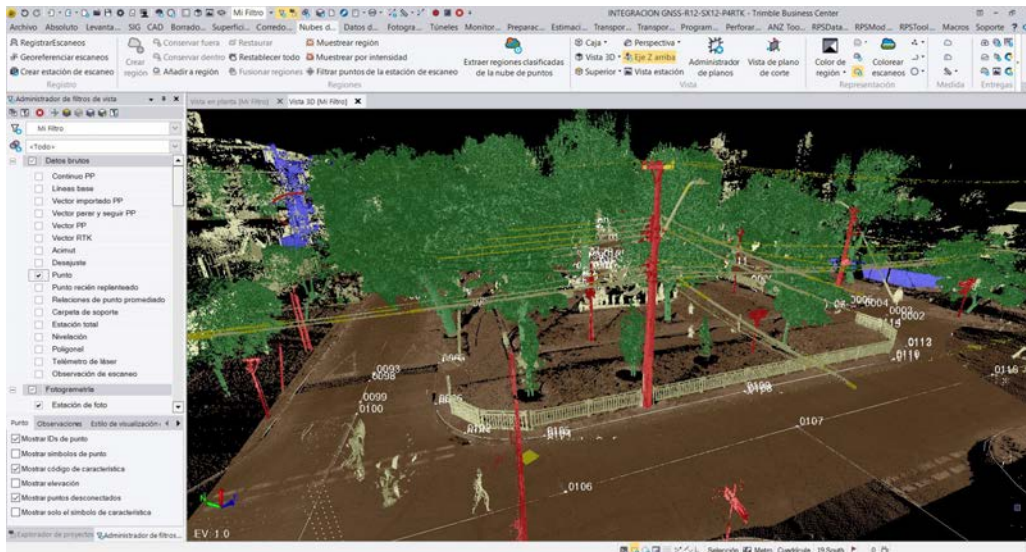


Figura 22. Clasificación de la nube de puntos Trimble SX12.

Ya clasificada la nube de puntos, es posible utilizar herramientas de dibujo automatizado, por ejemplo, extraer características de punto, ya sea, poste, árbol (copa, tronco y altura) o cartel, y extraer característica de línea, como acera y cuneta y cables elevados.

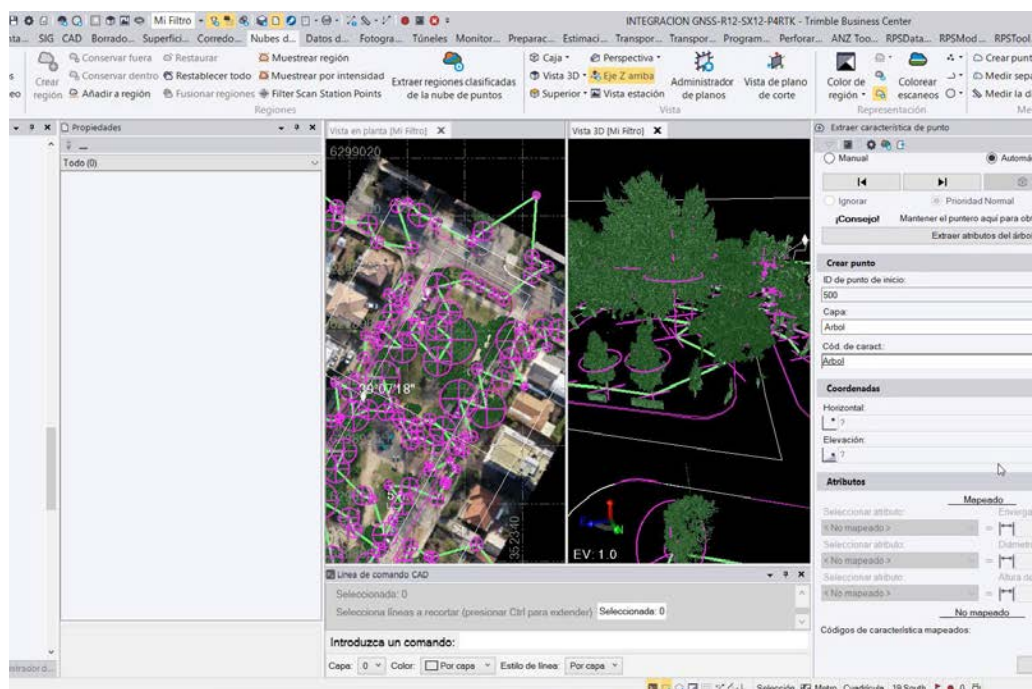


Figura 23. Extraer característica de punto.

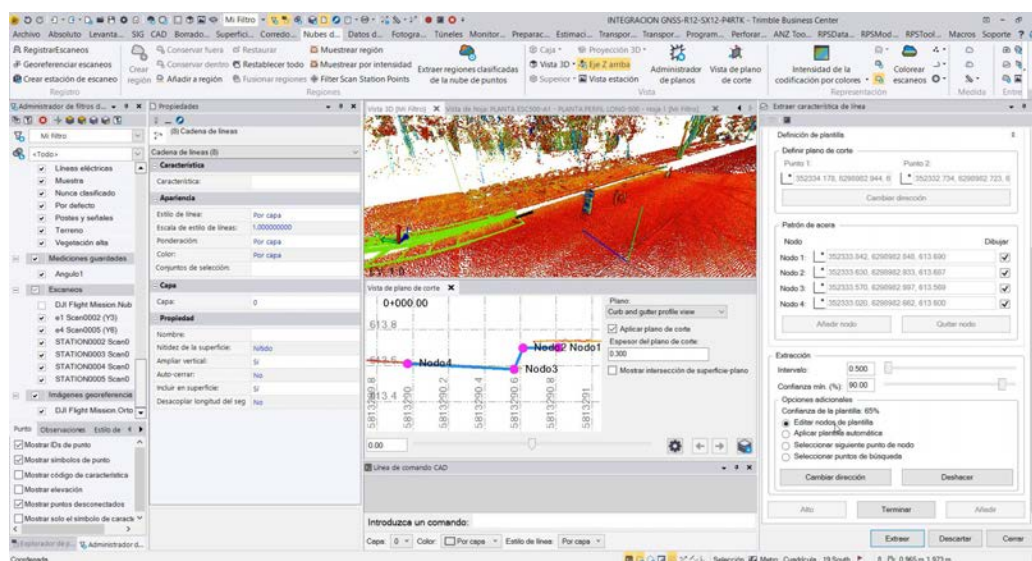


Figura 24. Extraer característica de línea.

Utilizar la nube de puntos proveniente desde fotogrametría o escáner láser permite catastrar cualquier elemento existente. Las herramientas CAD que posee TBC, permiten crear líneas 2D, 3D, puntos, polígonos, entre otros. También clasificarlos en capas, aplicando colores y estilos de líneas.

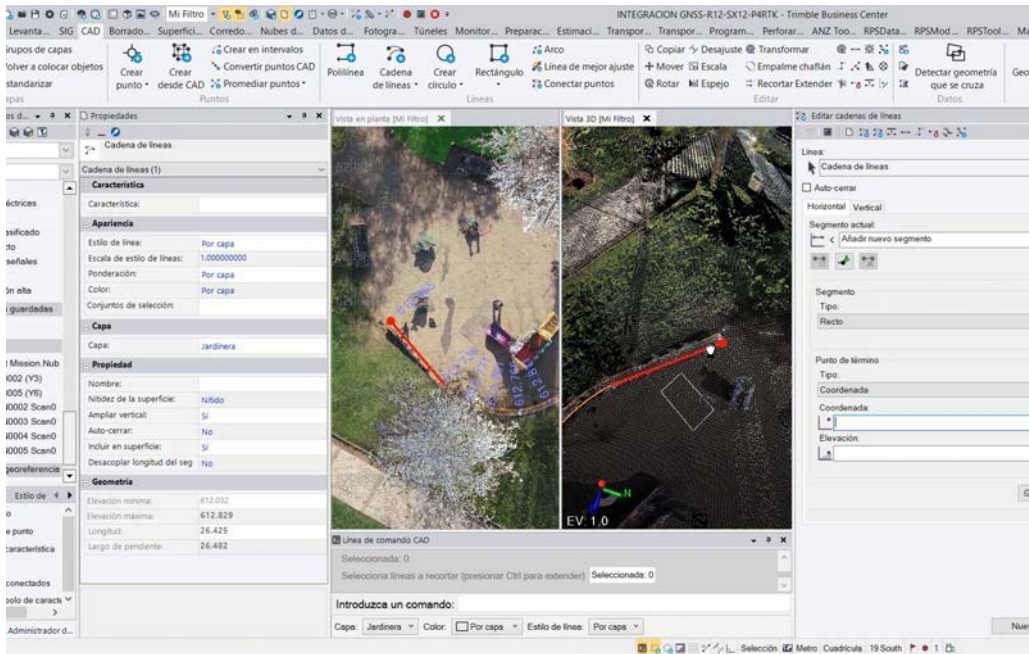


Figura 25. Herramientas CAD.

A su vez, al activar la vista de estación, es posible identificar elementos y de igual forma dibujar sobre la nube sobrepuesta en la imagen, de esta manera, la identificación de accidentes topográficos, infraestructura, material, entre otros, mejora sustancialmente la calidad de la información capturada.

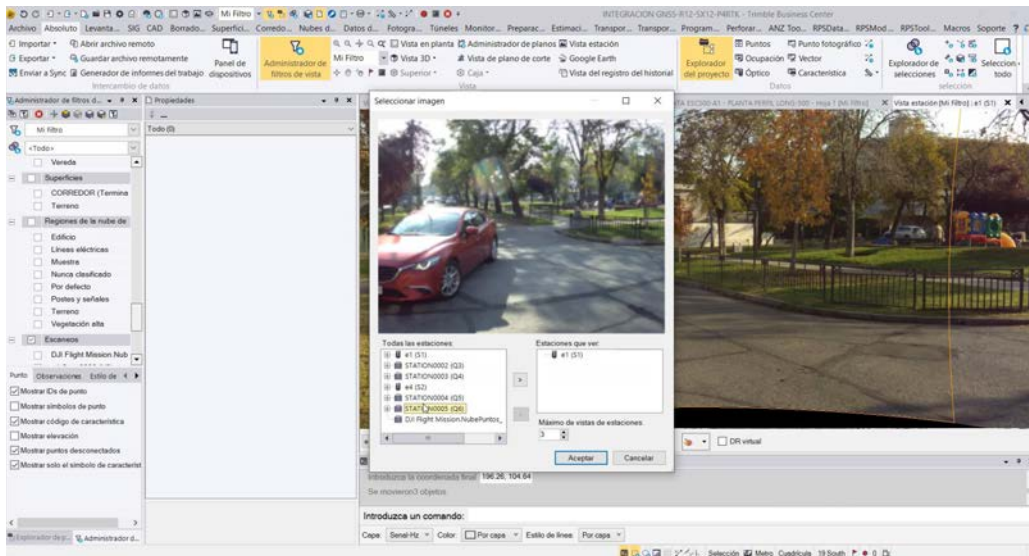


Figura 26. Vista estación.

La vista de plano de corte permite realizar distintos tipos de secciones, tanto a nubes de puntos, elementos CAD y superficies. En estas vistas es posible dibujar y crear representaciones gráficas de la realidad integrando nubes de sensores LIDAR terrestre, móvil y fotogramétrico, como es este caso en particular. Esta vista de corte puede ser incluida posteriormente en la lámina final.

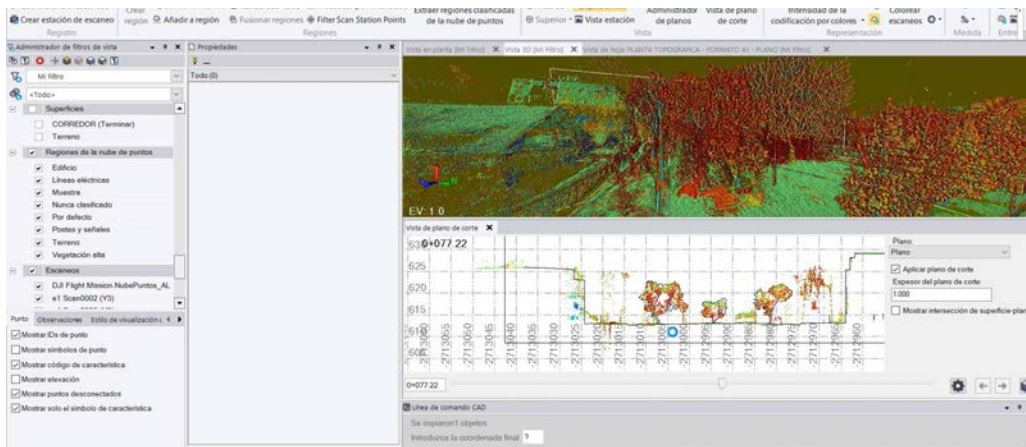


Figura 27. Vista de plano de corte.

Las herramientas CAD de TBC permiten la representación de planimetría como, por ejemplo, la demarcación horizontal, ya sea, disco pare, ceda el paso, entre otros elementos, y pueden ser almacenadas como bloques CAD, para posteriormente ser utilizado como un elemento típico en sectores con igual demarcación.

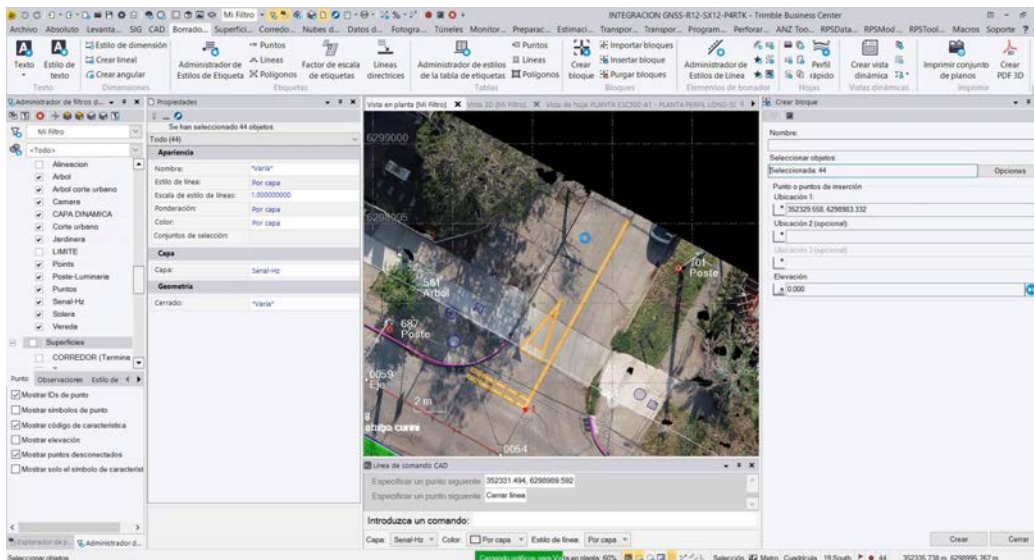


Figura 28. Herramientas CAD aplicadas en la orto imagen.

El módulo de superficies de TBC permite la integración, tanto de elementos gráficos como líneas 2D y 3D, nubes de puntos y puntos discretos, donde a partir de la nube del terreno clasificada, es posible realizar un muestreo y quitar densidad, transformar estos a puntos CAD, e integrarlos a superficies creadas con líneas de quiebre, como cunetas, soleras, eje, crestas y pie de talud, generando a su vez las curvas de nivel requeridas para el proyecto con la configuración de textos aplicada según la escala de salida.

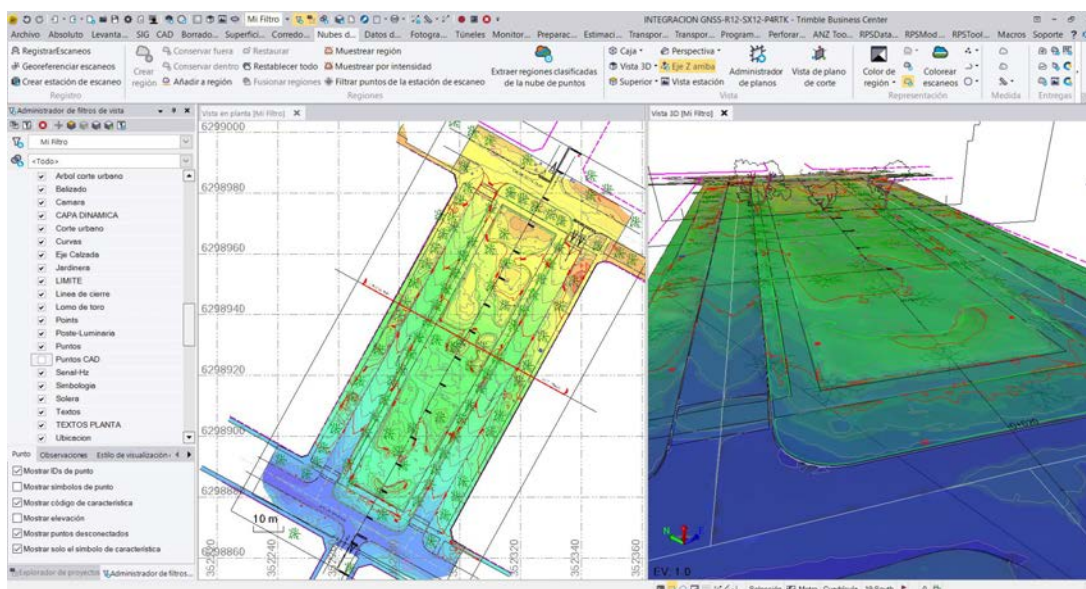
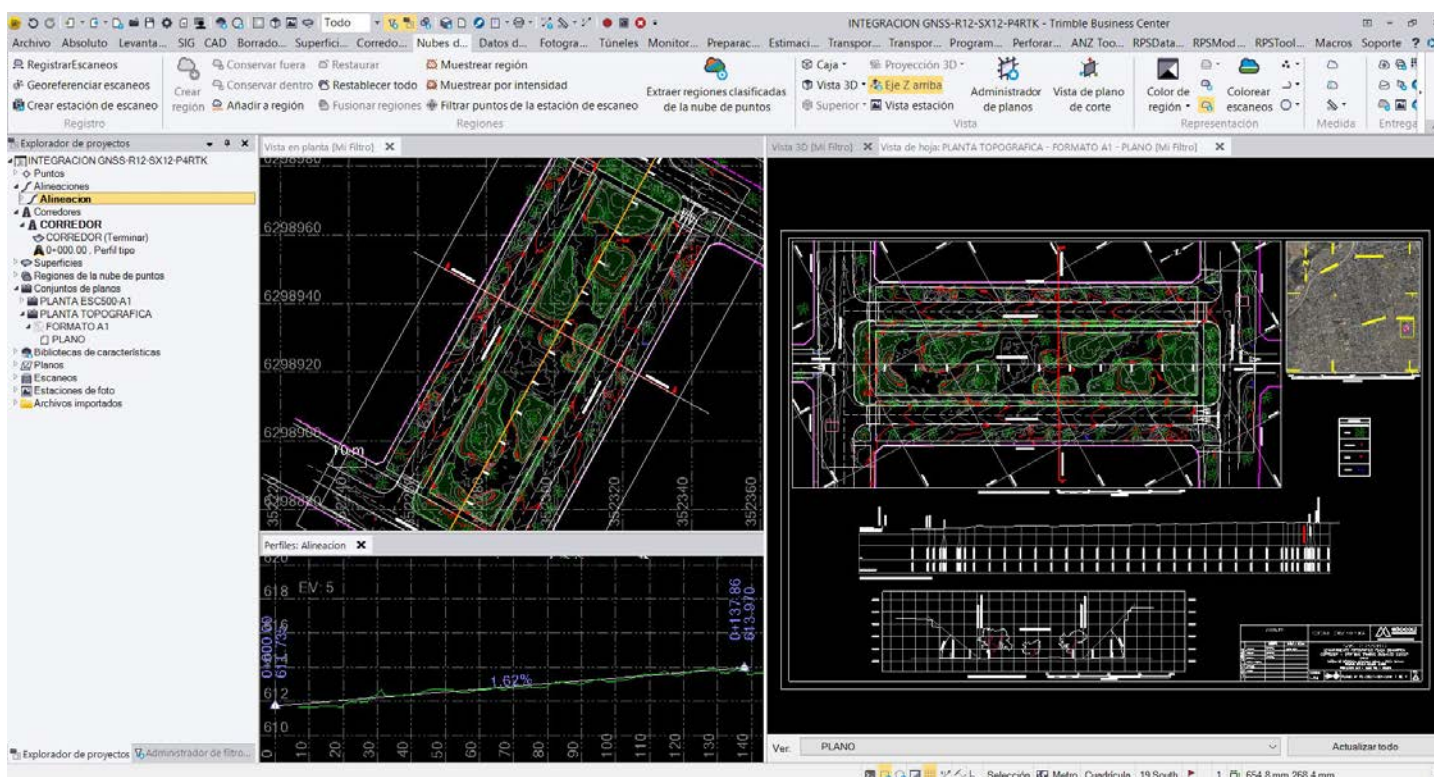
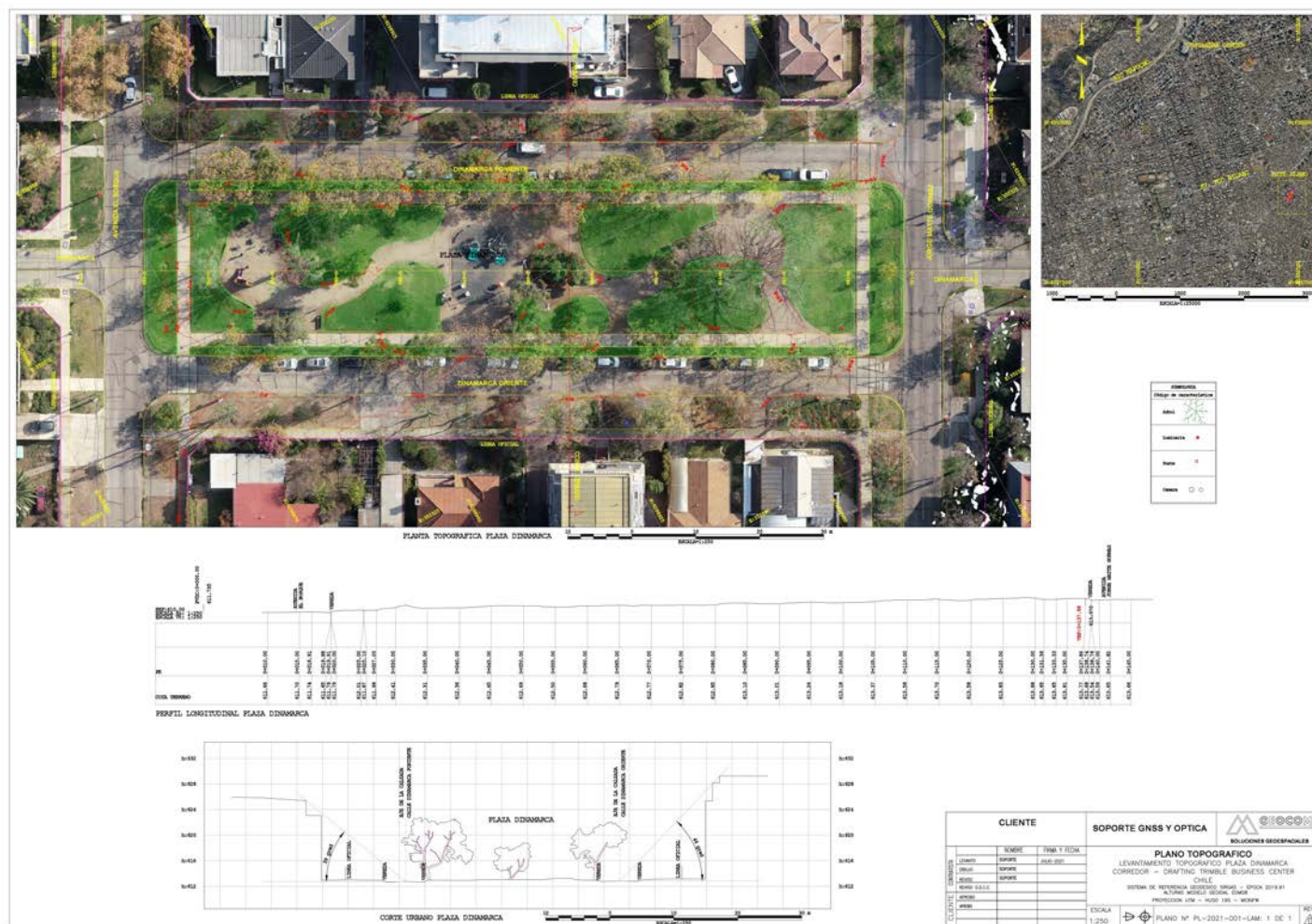


Figura 29. Planimetría y superficie.

Finalmente, las herramientas Drafting de TBC permiten crear láminas exportables en formato CAD y PDF, estas láminas pueden ser manuales, automatizadas o mixtas, en distintos formatos y escalas. En este ejemplo, se realizó una lámina formato A1, con herramientas de corredor (Planta y perfil longitudinal), que automatizan el proceso de dibujo mediante una plantilla configurada en formato VCL. En esta vista dinámica, se configura escala, grilla de coordenadas, estilo y tamaño de texto, independiente de la escala del formato, bloque norte y complementario con dibujos; como una vista de corte, planta de ubicación, escala gráfica, simbología, etc.

Figura 30. Herramientas de corredor y Drafting automatizado.





CONCLUSIONES

A partir de la integración de diferentes plataformas de observación fue posible abordar distintos requerimientos de un proyecto. Cada técnica proporcionó resultados, los que integrados entregaron una solución más eficiente y que técnicamente cumple con las directrices de lo solicitado. Si bien la integración fue realizada en un ambiente de menor escala, este es completamente extrapolable a proyectos más extensos en los cuales las características de “lo observado” puede condicionar una técnica o situarla como la más eficiente para su captura.

Como punto central de la integración encontramos a GNSS, que permite la georreferenciación tanto de los productos observados de forma terrestre como lo fue con SX12 y de forma aérea, como los productos provenientes de fotogrametría a partir de la captura con Phantom 4 RTK y el procesamiento en TBC. Un aspecto importante del proceso de georreferenciación es la automatización de este, tradicionalmente asociado a posicionamiento estático para la densificación del marco y su posterior empleo bajo técnicas de tiempo real, hoy en día la Red GNSS de GEOCOM proporciona acceso mediante NTRIP, permitiendo asociar el levantamiento a un marco de referencia proporcionado por la Red GNSS de GEOCOM y que en la actualidad cuenta con dos realizaciones, 2016.00 y 2019.00, referidas a la soluciones semanales de SIRGAS. Los resultados del uso NTRIP para el levantamiento GNSS mostraron resultados con precisiones centimétricas en línea con valores esperados sumado a una alta eficiencia en el proceso asociado al uso del receptor GNSS R12i, el cual basado en la tecnología ProPoint de procesamiento intensivo y la integración de TIP que incorpora al posicionamiento las propiedades de un sensor inercial, permitieron centrar el levantamiento en la punta del jalón, realizando mediciones inclinadas, aumentando así la productividad del levantamiento.

Figura 31. Producto final PDF y DWG.

Respecto a la integración GNSS y Levantamientos terrestres con SX12, la resolución matemática, que permitió compatibilizar observaciones satelitales y terrestres, fue abordada por de forma automatizada por Trimble Access, el cual mediante la aplicación “topografía integrada”, posibilitó el empleo de posiciones definidas por GNSS como puntos de control para la orientación de SX12, georreferenciando los productos. En este punto la versatilidad de SX12 permite rescatar las mejores características de un instrumento de captura de datos masivo y las posibilidades más tradicionales asociadas a estación total, todo con un alto nivel de automatización.

En el caso del Phantom 4 RTK, la vinculación al marco geodésico para el proceso de georreferenciación fue abordado mediante el posicionamiento PPK, aquí la Red GNSS de GEOCOM proporcionó la observación base para el procesamiento de la trayectoria. Metodológicamente la planificación de vuelo permitió configurar previamente las características del vuelo a realizar, definiendo los parámetros idóneos según las particularidades del área de levantamiento, aumentando así la productividad en terreno.

El procesamiento de datos en TBC permitió la obtención de productos intermedios, como la visualización del levantamiento GNSS, el procesamiento de escenas o estaciones de escaneado de SX12 y el procesamiento fotogramétrico. A partir de estos resultados fue generado un producto final, el cual empleó características de los productos intermedios en su elaboración, destacando las herramientas de registro y clasificación de nubes de puntos, dibujo automatizado, herramientas CAD y Drafting.

A partir de los resultados obtenidos, es importante destacar el nivel de automatización en terreno, tanto en el levantamiento GNSS, como en la compatibilización de diferentes referenciales, destacando la importancia de la vinculación a un marco geodésico que permite la gestión más eficiente de proyectos. En este sentido, también la automatización en la orientación de SX12 destaca, permitiendo un flujo más eficiente de procesamiento, a partir de datos en un mismo marco geodésico. Finalmente, el uso de fotogrametría y un procesamiento con un alto grado de automatización permitió un flujo eficiente en la etapa de elaboración de productos finales.

REFERENCIAS

- Trimble (2021a). *Trimble ProPoint Engine - Next Generation Centimeter Positioning and Orientation*. Technical publication.
- Silva, A. (2020). *Ajuste de la Red GNSS GEOCOM* 2019.91. GEOCOM.
- Doucet, K., Herwig, M., Kipka, A., Kreikenbohm, P., Landau, H., Leandro, R., Moessmer, M., Pagels (2012). *Introducing Ambiguity Resolution in Web hosted Global Multi-GNSS Precise Positioning with Trimble RTX-PP*. Trimble TerraSat GmbH, Germany.
- Chen, X., Allison, T., Cao, W., Kendall Ferguson K., Grünig, S., Gomez, V., Kipka, A., Köhler, J., Landau, H., Leandro, R., Lu, G., Stolz, R., Nick Talbot N. (2019). *Trimble RTX, an Innovative New Approach for Network RTK*. Trimble TerraSat GmbH, Germany.
- Leandro, R., Landau H., Nitschke M., Glocker M., Seeger S., Chen X., Deking A., BenTahar M., Zhang F., Ferguson K., Stolz R., Talbot N., Lu G., Allison T., Brandl M., Gomez V., Cao W., Kipka A. (2020). *RTX Positioning: The Next Generation of cm-accurate Real-Time GNSS Positioning*. Trimble Terrasat GmbH, Germany.
- Robert Krzyżek (2013). Verification of applicability of the Trimble RTX satellite technology with xFill function in establishing surveying control networks. *Geodesy and Cartography* 62(2).
- Trimble survey division (2012). *Trimble HD-GNSS processing*. White Pages, Westminster, Colorado, USA.
- Department of Transport and Main Roads (The State of Queensland) (2021). *Trimble Business Center v5.0 – Processing and Adjusting GNSS Survey Control Networks* (Manual).



Mian, O., Lipa, G., Gopaul, N., Hutton, J. (2020). *Using the Trimble post processed centerpoint © rtx tm fast positioning service for highly accurate uas based mapping and surveying without GNSS reference stations*. Geo-week 2019 At: Denver, Colorado.

M. Brandl, X. Chen, R. Drescher, M. Glocker, H. Landau, A. Nardo, M. Nitschke, D. Salazar, S. Seeger, U. Weinbach, F. Zhang (2021). *Advancing Trimble RTX Technology by adding BeiDou and Galileo*. Trimble TerraSat GmbH, Germany.

Trimble (2020a). *Trimble R12i*. GNSS System Datasheet.

Trimble (2020b). *Trimble SX12*. GNSS System Datasheet.

Moreno (2020). DJI PHANTOM 4 RTK, Entrenamiento Piloto Remoto GEOCOM.

DJI. (2021). *DJI PHANTOM 4 RTK* User Manual v2.4.

Trimble (2021b). *Trimble Business Center - Processing Aerial Survey Data*.

José Antonio Carrasco

Ingeniero de Ejecución en Geomensura de la Universidad Tecnológica Metropolitana, postítulo en túneles y espacios subterráneos de la Universidad de Chile. Especialista en Geodesia y topografía aplicados a Proyectos de Ingeniería de Infraestructura Minera. Líder de equipos multidisciplinarios en proyectos geodésicos y cartográficos en minería para ingeniería y construcción en sus distintas etapas. Profesor adjunto en Universidad Tecnológica Metropolitana, Ingeniería en Geomensura. Profesor adjunto en Universidad Santo Tomás, Ingeniería Civil en Minas y Geología.

Felipe Carvajal

Ingeniero de Ejecución en Geomensura de la Universidad de Santiago de Chile, con posgrados en Ciencias Geodésicas en Brasil, actualmente divide sus actividades como investigador, docente e ingeniero de aplicación en GEOCOM. Ha participado y desarrollado proyectos en el área de geodesia aplicada a la ingeniería e investigación, con énfasis en la integración de soluciones de posicionamiento geodésico para diferentes aplicaciones en la industria. Posee un marcado interés por la innovación tecnológica y el análisis de datos provenientes de diferentes plataformas de observación.

Óscar R. Moreno

Ingeniero Geomensor y MSc. en Teledetección con amplia experiencia como piloto instructor certificado para drones de ala fija y multirrotor de diferentes marcas: Gatewing, Trimble, Microdrones, xMobs, Wingtra, senseFly y DJI Enterprise. En el ámbito académico ha participado como docente y expositor en diversas instituciones de educación superior. Desde el 2014, trabaja en Geocom | Soluciones Geoespaciales como Ingeniero de Aplicación UAS realizando soporte técnico, capacitaciones y asesorías en la planificación, ejecución y procesamiento de datos fotogramétricos y LiDAR capturados con drones a diversos clientes de la industria geoespacial.

Ariel Silva

Ingeniero de Ejecución en Geomensura y Magíster en Geomática con experiencia en la aplicación de geodesia, topografía y fotogrametría en obras de ingeniería. Se ha desempeñado en la industria minera directamente en la operación de minas a rajo abierto, así como también en el ámbito académico como docente en varias instituciones de educación superior relacionadas con la geomensura y geomática con especialidad en el ajuste de observaciones geodésicas terrestres y satelitales. En GEOCOM se desempeña como Gerente de Soporte y Preventa, liderando un equipo de ingenieros dedicados a resolver problemas de clientes en la implementación de geotecnologías y su difusión.

Se sugiere citar:

Carrasco, J.A., F. Carvajal, O. Moreno y A. Silva (2021). *Combinación de Técnicas Geoespaciales*. *Revista Cartógrafo.CL* 1(2), pp. 12 - 34.



Bajo Licencia Creative Commons
Atribución 4.0 Internacional.