UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA URUGUAY

FACULTAD DE INGENIERÍA UDELAR

Sistemas de nivelación automáticos para motoniveladoras operados mediante receptores GNSS

Mauro Ferreira
Matías Sallaberry
Matías López

Proyecto de grado presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República en cumplimiento parcial de los requerimientos para la obtención del título de Ingeniero Agrimensor.

Tutores

Fabian Barbato

Tribunal

Jorge Faure
Magali Martínez
Roberto Pérez Rodino

Montevideo, Uruguay
Agosto de 2025

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA URUGUAY

FACULTAD DE INGENIERÍA UDELAR

Página de aprobación

El Tribunal docente integrado por los abajo firmantes aprueba informe de Proyecto Final de grado:

Sistemas de Nivelación Automáticos para Motoniveladoras Mediante Receptores GNSS

Autores: Matias Sallaberry, Mauro Ferreira, Matias Lopez
Tutores / Docentes:

- Prof. Adj. G3. Ing. Agrim. Fabian Barbato
- Asistente G2. Ing. Agrim. Martin Wainstein

Puntaje: .....

Tribunal:

Profesor……..(Nombre y firma)

Profesor……..(Nombre y firma)

Profesor……..(Nombre y firma)

Fecha: Agosto, 2025.

AGRADECIMIENTOS

Deseamos transmitir nuestro sincero agradecimiento a nuestras familias, quienes han sido pilares fundamentales en nuestra formación personal. El apoyo incondicional ha sido la base sobre la cual hemos construido cada paso de este camino. Gracias por su amor, paciencia, y por siempre estar a nuestro lado, tanto en los momentos de alegría como en los de dificultad. Cada sacrificio que hicieron, cada palabra de aliento y cada gesto de comprensión, fueron esenciales para continuar. Este logro es tanto nuestro como de ustedes, porque sin su apoyo, este viaje no habría sido posible.

Queremos agradecer especialmente a los docentes y compañeros que de una manera u otra, han enriquecido nuestra vida personal y académica. Sus enseñanzas han sido clave para nuestro desarrollo y han dejado una huella imborrable en nuestra formación como profesionales y más aún, como personas.

Queremos también agradecer a las empresas Grupo Berkes y Traxpalco, por brindarnos la oportunidad de realizar las prácticas de campo, las cuales fueron fundamentales para llevar adelante el proyecto. Asimismo, extendemos nuestro agradecimiento a los Ingenieros Agrimensores Antonio Villaluenga, director de KPN, por su disposición al brindarnos información técnica, y a Marcelo Casella, de la empresa constructora C.V.C S.A. quien se reunió con nuestro equipo para compartirnos de, primera mano, información fundamental sobre metodología y operación.

A todos aquellos que de alguna manera contribuyeron a este proceso, ya sea con una palabra de aliento, una idea compartida o su mera presencia, nuestro más sincero agradecimiento. Esta tesis no es solo el resultado de nuestro esfuerzo, sino también del de todas las personas que nos han acompañado en este viaje.

ÍNDICE

1.RESUMEN..... 9
2.JUSTIFICACIÓN..... 10
3.INTRODUCCIÓN..... 11
4.OBJETIVOS..... 13
5.METODOLOGÍA..... 14
6.MARCO TEÓRICO..... 16
6.1. CONCEPTOS GENERALES DEL INSTRUMENTAL DE TRABAJO..... 16
6.1.1. Estación Total..... 16
6.1.2. Niveles de Topografía..... 18
6.1.3. Sistemas Globales de Navegación Por Satélite..... 19
6.2. PROYECCIONES CARTOGRÁFICAS:..... 22
6.2.1. Proyección UTM..... 23
6.2.1.1. Factor de Escala “K”..... 23
6.2.2. Proyección Transversa Mercator (TM) como alternativa a la UTM..... 24
6.3. OBRAS VIALES..... 24
6.3.1. PARTICIPACIÓN DEL ING. AGRIMENSOR EN OBRAS VIALES..... 25
6.3.1.1. Materialización del sistema de referencia geodésico..... 28
6.3.2. MOTONIVELADORAS Y SU PARTICIPACIÓN EN OBRAS VIALES..... 29
6.3.2.1. Generalidades y operación de la Motoniveladora..... 29
6.3.2.2. Operación con la motoniveladora a lo largo del desarrollo de la obra.... 33
6.3.3. NIVELACIÓN POR ESTACAS (METODOLOGÍA CLÁSICA)..... 34
6.3.4. HISTORIA DE LOS SISTEMAS Y SU LLEGADA A URUGUAY..... 38
6.3.5. ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL (IRI)..... 39
6.3.5.1. Impacto de una buena nivelación base en el IRI obtenido..... 40
6.3.5.2. Efecto de la compactación sobre el IRI:..... 40
6.4. SISTEMAS DE NIVELACIÓN AUTOMÁTICOS..... 41
6.4.1. SISTEMAS DE NIVELACIÓN 2D..... 41
6.4.2. SISTEMAS DE NIVELACIÓN 3D..... 48
6.4.2.1. Sistema 3D Single GNSS..... 49
6.4.2.2. Sistema 3D Doble GNSS:..... 53
6.4.2.3. Elementos de desgaste de la motoniveladora y su influencia en las precisiones alcanzadas..... 55
6.4.2.3.1. Calibración - Sistemas 3D single GNSS..... 59
7.CONSIDERACIONES DE LAS PRÁCTICAS DE CAMPO..... 61
7.1. PREANÁLISIS DE ERRORES Y ELECCIÓN DEL INSTRUMENTAL DE TRABAJO... 61
7.1.1. PREANÁLISIS DE ERRORES DEL INSTRUMENTAL DE TOPOGRAFÍA:..... 62
7.1.1.1. Estación Total Trimble S5 de 2”:..... 62
7.1.1.2. Nivel Digital - Leica Sprinter 50:..... 64
7.1.2 PREANÁLISIS DE ERRORES DE LOS SISTEMAS DE NIVELACIÓN 3D..... 64

7.1.2.1. Sistema de Nivelación 2D:..... 64
7.1.2.2. Posicionamiento RTK de receptor GNSS:.....66
7.1.2.3. Error esperado sistema 3D Single GNSS..... 66
7.1.2.4. Error esperado sistema 3D Doble GNSS.....67
7.1.2.5. Tolerancias de obra.....68
7.1.2.6. Conclusiones del Preanálisis:.....69
7.2. CONSIDERACIONES PREVIAS.....71
7.2.1. CONDICIONES DE LA MOTONIVELADORA.....71
7.2.2. CONDICIONES IDEALES - GNSS:..... 72
7.2.3. SISTEMA DE REFERENCIA DE CADA PROYECTO..... 72
7.2.4. CANCHA “TIPO” IDEAL..... 73
7.2.5. METODOLOGÍA DE CAMPO A SEGUIR..... 73
7.2.5.1. Trisección y Factor de Escala.....74
7.2.5.2. Estudio de Pendientes Transversales..... 74
7.2.5.3. Evaluación altimétrica con Estación Total..... 76
8.PRÁCTICAS DE CAMPO:.....77
8.1. SISTEMA 3D SINGLE GNSS:.....77
8.1.1. CONSIDERACIONES PREVIAS - SISTEMA SINGLE GNSS..... 78
8.1.1.1. Respecto a la “Cancha Tipo”.....78
8.1.1.2. Características del tramo:.....79
8.1.1.3. Características de los elementos GNSS:..... 79
8.1.1.4. Sistema de referencia del proyecto:.....80
8.1.1.5. Tolerancias establecidas para el proyecto:.....80
8.1.1.6. Estado de la Motoniveladora - Elementos de desgaste..... 82
8.1.2. ACTIVIDAD DE CAMPO..... 84
8.1.2.1. Análisis de pendiente transversal con nivel digital..... 87
8.1.2.2. Relevamiento Planialtimétrico con Estación Total..... 88
8.1.3. ACTIVIDAD DE GABINETE..... 89
8.1.3.1. Análisis de Pendientes Transversales.....90
8.1.3.2. Análisis altimétrico del sistema 3D Single GNSS.....93
8.2. SISTEMA 3D DOBLE GNSS.....95
8.2.1. CONSIDERACIONES PREVIAS - SISTEMA DOBLE GNSS..... 96
8.2.1.1. Respecto a la “Cancha Tipo”:.....96
8.2.1.2. Características del tramo:.....97
8.2.1.3. Características de los elementos GNSS:..... 97
8.2.1.4. Sistema de referencia del proyecto:.....97
8.2.1.5. Tolerancias establecidas para el proyecto:.....98
8.2.1.6. Estado de la motoniveladora - Elementos de desgaste..... 98
8.2.2. ACTIVIDAD DE CAMPO..... 100
8.2.2.1. Análisis de pendiente transversal con nivel digital..... 102
8.2.2.2. Relevamiento Planialtimétrico con Estación Total..... 103

8.2.3. ACTIVIDAD DE GABINETE..... 104
8.2.3.1. Análisis de Pendientes Transversales..... 105
8.2.3.2. Análisis Altimétrico del sistema 3D Doble GNSS..... 107
8.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS EN AMBAS PRÁCTICAS..... 108
8.3.1. SISTEMA DE NIVELACIÓN 3D SINGLE GNSS:..... 108
8.3.2. SISTEMA DE NIVELACIÓN 3D DOBLE GNSS:..... 112
9.CONCLUSIONES..... 116
10.RESUMEN EJECUTIVO..... 120
11.ANEXO..... 121
12. BIBLIOGRAFIA Y WEBGRAFIA..... 122

ÍNDICE DE IMÁGENES:

Imagen N° 1 - Estación Total Robótica, prisma y controladora

Imagen N° 2 - Partes del Nivel Óptico

Imagen N° 3 - Nivel Digital

Imagen N° 4 - Posicionamiento GNSS

Imagen N° 5 - GNSS Base y Rover

Imagen N° 6 - Fórmula Factor de escala K

Imagen N° 7 - Motoniveladora John Deere

Imagen N° 8 - Partes de la Motoniveladora

Imagen N° 9 - Rotación de cuchilla en plano horizontal

Imagen N° 10 - Círculo desplazado lateralmente

Imagen N° 11 - Inclinación de cuchilla por cilindros de elevación

Imagen N° 12 - Borde de corte de motoniveladora

Imagen N° 13 - Movimiento lateral de la cuchilla

Imagen N° 14 - Sub Rasante, Sub base, Base de un pavimento regular

Imagen N° 15 - Nivelación tradicional

Imagen N° 16 - Colocación de estacas

Imagen N° 17- Imagen real de estaqueo

Imagen N° 18 - Sensores de sistema 2D CAT

Imagen N° 19 - Sensor de pendiente montado en una motoniveladora

Imagen N° 20 - Sensor de Pendiente principal montado sobre el marco de una motoniveladora

Imagen N° 21 - El sensor de pendiente principal mide la pendiente de la máquina.

Imagen N° 22 - Sensor de rotación de la cuchilla.

Imagen N° 23 - Ejemplo de rotación

Imagen N° 24 - Motoniveladora CAT con sistema 2D (lectura de los sensores de rotación y pendiente principal)

Imagen N° 25 - Motoniveladora con sistema 3D single GNSS Topcon
Imagen N° 26 - Posición del extremo de la cuchilla sin receptor - sistema 3D single GNSS
Imagen N° 27 - Medidas introducción en la máquina - Sistema 3D single GNSS
Imagen N° 28 - Posiciones de los extremos de cuchilla - Sistema 3D Single GNSS
Imagen N° 29 - Motoniveladora realizando un corte con Sistema 3D Single GNSS
Imagen N° 30 - Sistema 3D Doble GNSS de Trimble
Imagen N° 31 - Elementos de desgaste
Imagen N° 32 - Desgaste de la cuchilla
Imagen N° 33 - Cuchilla desgastada en motoniveladora John Deere
Imagen N° 34 - Situación ideal y errónea del perno de suspensión
Imagen N° 35 - Croquis esquemático del preanálisis
Imagen N° 36 - Resultados del preanalisis
Imagen N° 37 - Esquematización método 3,4,5
Imagen N° 38 - Croquis de Ubicación 1 - Práctica 1
Imagen N° 39 - Croquis de Ubicación 1.1 - Práctica 1
Imagen N° 40 - Situación “Tramo tipo” - Práctica 3D single GNSS
Imagen N° 41 - Cobertura satelital del Sistema 3D single GNSS
Imagen N° 42 - Motoniveladora John Deere con sistema 3D Single GNSS
Imagen N° 43 - Desgaste de los bronces – Práctica 1
Imagen N° 44 - Desgaste en el tornillo del círculo – Práctica 1
Imagen N° 45 - Desgaste en los Soportes de la Mesa - Práctica 1
Imagen N° 46 - Desgaste de la Bola de los Cilindros - Práctica 1
Imagen N° 47 - Desgaste de la cuchilla - Práctica 1
Imagen N° 48 - Visualización de la pantalla del sistema de nivelación en la motoniveladora – Práctica 1
Imagen N° 49 - Coordenadas y desviaciones asociadas a la Trisección – Práctica 1
Imagen N° 50 - Trisección – Práctica 1
Imagen N° 51 - Método 3,4,5 plasmado en campo – Practica 1
Imagen N° 52 - Depuración de la muestra – Practica 1
Imagen N° 53 - Análisis pendientes transversales depuradas – Práctica 1

Imagen N° 54 - Vista reducida de la tabla de comparación de elevaciones - Práctica 1
Imagen N° 55 - Motoniveladora Caterpillar con sistema 3D Doble GNSS
Imagen N° 56 - Croquis de Ubicación 2 - Práctica 2
Imagen N° 57 - Situación “Tramo tipo” - Práctica 3D Doble GNSS
Imagen N° 58 - Cobertura satelital del sistema 3D Doble GNSS
Imagen N° 59 - Desgaste de bronces – Práctica 2
Imagen N° 60 - Desgaste en los soportes de la mesa – Practica 2
Imagen N° 61 - Desgaste de la bola de los cilindros – Práctica 2
Imagen N° 62 - Desgaste de la cuchilla – Práctica 2
Imagen N° 63 - Ocupación de puntos para Trisección - Práctica 2
Imagen N° 64 - Croquis de Trisección - Práctica 2
Imagen N° 65 - Coordenadas y desviaciones asociadas a la trisección
Imagen N° 66 - Materialización del eje auxiliar - Práctica 2
Imagen N° 67 - Estación Total estacionada previo a relevamiento a realizar - Práctica 2
Imagen N° 68 - Depuración de la muestra - Practica 2
Imagen N° 69 - Planilla de datos correspondiente a la nivelación - Práctica 2
Imagen N° 70 - Errores asociados a la nivelación - Práctica 2
Imagen N° 71 - Vista reducida de la tabla de comparación de elevaciones - Práctica 2
Imagen N° 72 - Tabla de datos de pendiente del sistema Single GNSS
Imagen N° 73 - Vista parcial de Tabla de datos altimétricos del sistema Single GNSS
Imagen N° 74 - Relación de puntos con respecto a la superficie de proyecto - Practica 1
Imagen N° 75 - Detalle de sección transversal de la lámina “Relevamiento planialtimetrico - 1era Practica - Single GNSS”
Imagen N° 76 - Resultados Finales sistema 3D Single GNSS
Imagen N° 77 - Tabla de datos de pendiente del sistema Doble GNSS
Imagen N° 78 - Vista parcial de Tabla de datos altimétricos del sistema Doble GNSS
Imagen N° 79 - Relación de puntos con respecto a la superficie de proyecto
Imagen N° 80 - Detalle de sección transversal de la lámina “Relevamiento planialtimétrico - 2da Práctica - Doble GNSS”
Imagen N° 81 - Resultados Finales Sistema Doble GNSS
Imagen N° 82 - Resultados Finales - Ambas Prácticas

1.RESUMEN

La presente investigación se enmarca en el estudio de tecnologías de posicionamiento satelital aplicadas al control automático de maquinaria pesada, específicamente en motoniveladoras.

Se realiza una comparación técnica entre dos sistemas GNSS nivelación automática: un sistema Topcon, que opera con una sola antena receptora, y un sistema Trimble, que emplea una configuración de doble antena. Ambos sistemas constituyen soluciones tecnológicas avanzadas que permiten automatizar el movimiento de la cuchilla de la motoniveladora. No obstante, presentan diferencias relevantes en cuanto a exactitud posicional, características de funcionamiento, comportamiento en superficies irregulares, e implicancias económicas.

Esta tesis busca, además de conocer y profundizar en el universo del control de maquinaria, estudiar el funcionamiento de estos sistemas, identificar y analizar las diferencias entre ambos, detectar las virtudes y falencias de cada uno, así mismo analizar los resultados obtenidos y su relación con las tecnologías utilizadas con el fin de establecer criterios técnicos que orienten la elección del sistema más adecuado según las condiciones específicas del entorno de trabajo y los requerimientos del proyecto.

2.JUSTIFICACIÓN

La elección del tema surge a partir del interés de los integrantes de este equipo en lo que respecta a la actividad del Ingeniero Agrimensor en el rubro de la obra vial y, específicamente a la tecnología de alta precisión aplicada a este tipo de proyectos.

Considerando la versatilidad que proporciona la formación del Ingeniero Agrimensor, resulta atractivo explorar un nuevo ámbito en el cual pueda desempeñarse de manera profesional. Con frecuencia, se lo asocia exclusivamente al ejercicio catastral, enfocado en tareas como la confección de planos de mensura, declaraciones juradas, amojonamientos, entre otras. Sin embargo, además de ser un profesional capacitado en materia catastral, el Ingeniero Agrimensor es también un ingeniero, con las competencias necesarias para participar activamente en obras de infraestructura.

Con el paso de los años, la tecnología se encuentra cada vez más ligada a la profesión, ya sea mediante drones, tecnología LIDAR, control de maquinaria, etc. Por lo que no resulta novedoso que dichos avances jueguen un rol más relevante en las tareas a realizar.

En lo que respecta al desarrollo de una obra, ya sea en un proyecto civil o vial, el Ingeniero Agrimensor es quien realiza los controles y corrobora que los elementos constructivos se encuentren dentro de las tolerancias establecidas en el pliego de la obra. Para llevar a cabo estos procedimientos, se cuenta con tecnologías y metodologías que hacen posible alcanzar las máximas precisiones de la manera más eficiente y obteniendo mejores resultados posibles.

En el caso de las obras viales, particularmente, evitar errores y mantener precisiones durante el desarrollo de la obra resulta fundamental para reducir costos, errores y gastos futuros por mantenimiento. Si bien puede parecer redundante, el objetivo de cualquier proyecto es obtener los mejores resultados con la menor cantidad de recursos. En este estudio, se analizará cómo la introducción de sistemas de nivelación automatizados para motoniveladoras en Uruguay responde a una necesidad específica del sector.

3.INTRODUCCIÓN

En este informe se estudiarán las precisiones asociadas a dos diferentes Sistemas de nivelación automáticos para motoniveladoras basados en receptores GNSS, por ser en principio un tema poco habitual en lo que respecta al desarrollo académico del Ingeniero Agrimensor, algunos conceptos pueden parecer complejos en un primer momento, sin embargo, a medida que se avance en el desarrollo del trabajo, los mismos se explicarán y cobrarán sentido.

El concepto *"Sistemas de Nivelación"* como generalidad en este informe hace referencia a los elementos mecánicos e hidráulicos, que en conjunto con el instrumental topográfico conforman los sistemas de automatización y control para las diferentes máquinas, este estudio se centró concretamente en los ***sistemas de nivelación automática para motoniveladoras***, los cuales han tomado un papel importante en los últimos años en las obras viales en el Uruguay.

Un aspecto no menor es que, es el Ingeniero Agrimensor quién tendrá más contacto con este tipo de tecnologías en el transcurso de una obra, ya que, si bien a priori no es a quien le corresponde realizar los controles respecto al funcionamiento de la maquinaria como tal, es el profesional al que le corresponde llevar adelante los controles topográfico y presentar resultados dentro de las tolerancias predefinidas. De esta manera, su desempeño en obra está íntimamente relacionado al producto obtenido con los sistemas de nivelación automática.
Es por esto que, frente a la aparición de los sistemas de control de maquinaria basados en técnicas e instrumental topográfico, son los agrimensores, quienes en la práctica tienen la responsabilidad de corroborar el correcto funcionamiento, lo que lo que lleva a la necesidad de adquirir los conocimientos necesarios acerca del funcionamiento y metodología de trabajo de estos sistemas.
A medida que el equipo avanzó en el estudio y conocimiento de estos "Sistemas de nivelación automáticos", los objetivos se fueron dirigiendo a diferentes lugares, específicamente se optó por realizar la comparación de dos diferentes sistemas de nivelación basados en tecnologías diferentes y asimismo, de diferentes marcas, lo que deja un espectro de resultados suficientemente amplio permitiendo así obtener importantes conclusiones al respecto.
Dentro del universo de los sistemas de nivelación 3D existen dos grandes grupos, aquellos que funcionan a partir de receptores GNSS, y otros enfocados a trabajos de mayor precisión, basados en Estaciones Totales robóticas.

A lo largo de este proyecto, concretamente se estudiaron y compararon las precisiones obtenidas por 2 sistemas de automatización diferentes, un sistema 3D Single GNSS con una única antena receptora, para el cual se utilizó un sistema Topcon montado sobre una

motoniveladora John Deere 670P*;* un sistema 3D Dual GNSS con dos antenas receptoras, para el cual se utilizó un sistema Trimble sobre una motoniveladora Caterpillar 140M.
En primera instancia algunos de estos conceptos pueden parecer poco claros, asimismo, cada uno de los mismos serán desarrollados en el transcurso de este estudio.

4.OBJETIVOS

El objetivo general del proyecto es determinar las precisiones obtenidas mediante diferentes sistemas de nivelación automáticos para motoniveladoras operados a partir de receptores GNSS, específicamente el estudio se focalizó en estudiar y comparar las precisiones obtenidas mediante 2 sistemas en concreto, como se explicó en el apartado anterior. A continuación se puntualizan los objetivos principales de este estudio:

- Estudiar las precisiones asociadas a los sistemas de nivelación 3D single GNSS con una antena receptora.
- Estudiar las precisiones asociadas a los sistemas de nivelación 3D Dual GNSS con dos antenas receptoras.
- Realizar un estudio comparativo de precisiones obtenidas entre los dos sistemas estudiados.

5.METODOLOGÍA

Esta sección no busca desarrollar enteramente la metodología seguida por el equipo, sino realizar una breve introducción de los procedimientos seguidos a lo largo del desarrollo del estudio; se profundizará en cada sección específica de este informe.

En primer lugar, antes de dar inicio a la investigación, resulta esencial conocer algunos conceptos relacionados a las obras viales. Dentro de este amplio ámbito, merece especial atención la componente topográfica, el área en la que el Ingeniero Agrimensor desempeña un papel central y activo. Su intervención no sólo es crucial en la planificación y ejecución de estas obras, sino también en el análisis y optimización de los procesos relacionados con esta área.
Tras esta etapa inicial de exploración con el propósito de adquirir el conocimiento general dentro del ámbito de las obras viales, se focaliza el estudio en un elemento específico de las mismas: el uso y funcionamiento de los sistemas de nivelación automáticos para motoniveladoras.

En lo que respecta al desarrollo de este estudio, el pre análisis de errores se presenta como una dificultad a la hora de intentar modelar los errores asociados a cada uno de los sistemas de nivelación. Si bien cada sistema de nivelación tiene un error asociado a la determinación de la posición del implemento de corte de la máquina, acorde a la información determinada por uno o dos receptores GNSS, los sistemas no actúan directamente sobre el implemento de corte de la máquina, sino que trabajan activando el control hidráulico de la máquina, de esta manera, excede los límites de esta investigación entender cómo responde un sistema hidráulico determinado a las correcciones enviadas por cada sistema de nivelación y el error correspondiente a esto.

Es decir, analizando en retrospectiva y generalizando, se puede decir que, a cada sistema le corresponden dos grupos de errores, aquellos asociados directamente a sensores digitales e instrumental topográfico(receptores GNSS), modelables con los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera, y por otra parte, un segundo grupo de errores, asociados a la interpretación del sistema electro-hidráulico de las correcciones enviadas por la computadora que se encarga de procesar las lecturas de posición provenientes directamente del instrumental topográfico y sensores antes mencionados.
De esta manera, el equipo se limita a estudiar los errores modelables de cada sistema, dando por sentado que, el resto del error (aparentemente provenientes del sistema hidráulico de la máquina y algoritmos de interpretación) quedará plasmado en las prácticas de campo.

En cuanto a las prácticas de campo, se planifica la realización de dos prácticas específicas, una con cada sistema seleccionado. Estas prácticas se llevan a cabo en dos obras viales distintas, para lo cual se contó con la colaboración y el apoyo de las empresas involucradas, a quienes se expresa el más sincero agradecimiento.

Durante las prácticas, se trabajó sobre una superficie “tipo” previamente estipulada. No obstante, se tenía presente que cada obra vial presentaba características particulares y, por ende, fue necesario adaptarse a las condiciones y actividades específicas que se estuvieran desarrollando en cada sitio al momento de la visita. En lo que respecta a las prácticas en sí,

las mismas cuentan con dos partes principales: Un relevamiento planialtimétrico con estación total y chequeo de pendientes transversales con nivel óptico.
Finalmente los datos de campo se procesan y analizan en los respectivos apartados de "Actividad de gabinete". Cada una de las prácticas aquí realizadas se detallan rigurosamente en las secciones determinadas, siendo esta explicación un breve resumen.

6.MARCO TEÓRICO

El presente marco teórico tiene como objetivo abordar los principales conceptos y estudios relacionados con los sistemas de nivelación automáticos para motoniveladoras, centrándose en la precisión asociada a estos sistemas. En primer lugar, se abordan los principales conceptos asociados al universo de las obras viales que serán necesarios para comprender y apreciar el funcionamiento de los mismos. Se indicarán los diferentes tipos de tecnologías de nivelación implementadas en las motoniveladoras, desde los sistemas manuales hasta los automatizados, así como su evolución en el tiempo. Posteriormente, se revisaron los factores que influyen en su desempeño, tales como las condiciones del terreno, la calibración de los equipos y las tecnologías de medición empleadas.

Si bien este tipo de tecnologías se encuentra disponible en el mercado hace ya muchos años, no se dispone de suficiente bibliografía de calidad para desarrollar este estudio, es por este motivo que, se pone especial énfasis en la revisión de estudios previos, los cuales proporcionaron los cimientos conceptuales necesarios para comprender el contexto en el que se enmarca la investigación, asimismo, algunos de los resultados obtenidos en dichas investigaciones fueron imprescindibles para tomar decisiones en el marco de este proyecto.

6.1. CONCEPTOS GENERALES DEL INSTRUMENTAL DE TRABAJO.

A continuación serán presentados algunos de los instrumentos topográficos que fueron necesarios para llevar adelante esta investigación, que de una manera u otra formaron parte en el transcurso de este informe y deben ser introducidos. No se detalla a fondo el funcionamiento de cada elemento en sí, se realizará una breve introducción que es considerada más que suficiente a efectos de comprender su aplicabilidad en este estudio. La Estación Total y el Nivel Digital son los principales instrumentos utilizados por el equipo en el desarrollo de las prácticas de campo. Finalmente, se realiza una breve introducción al posicionamiento GNSS, el cual será uno de los aspectos principales en este estudio.

6.1.1. Estación Total

Las estaciones totales son un instrumento ampliamente utilizado en Topografía, Agrimensura, Ingeniería Civil y Obras de Infraestructura. Unifica las funciones de un teodolito con un distanciómetro electrónico, lo que permite la medición en conjunto de ángulos y distancias desde una misma posición y con el mismo instrumento.

Es un instrumento que, mediante lectura de ángulos y distancias permite asignar coordenadas planas y alturas a puntos específicos.

Imagen Nº 1 - Estacion Total Robotica, prisma y controladora

Con el avance de la tecnología surgieron las *Estaciones Totales Robóticas*, las cuales permiten operar el equipo de forma remota. A diferencia de las estaciones convencionales, estos dispositivos incluyen motores integrados que permiten el movimiento automático del instrumento y sistemas de seguimiento constante del prisma (Auto-Tracking), esto permite prescindir de un segundo "operador" para sostener el prisma.

6.1.2. Niveles de Topografía

Nivel Óptico:

El nivel óptico o equialtímetro es un instrumento topográfico que permite determinar el desnivel entre dos puntos mediante visuales horizontales dirigidas a miras verticales. Este instrumento va montado sobre un trípode y gira alrededor de un eje de rotación.

Existen diferentes tipos de niveles, entre ellos:

- Niveles de línea
- Niveles automáticos
- Niveles digitales

En la figura pueden apreciarse los componentes principales de un nivel del tipo automático.

Imagen Nº 2 - Partes del Nivel Optico

Nivel Digital:

Los niveles digitales poseen un dispositivo electrónico que permite realizar la lectura a miras provistas de un código de barra (*ver imagen Nº 3*). Evitando así la estimación de la lectura por parte del operador.

Una vez se logra visualizar la mira, se presiona un botón, el cual acciona al instrumento, generando que este emita un láser dirigido a la mira, en cuestión de segundos la lectura correspondiente se detalla directamente en la pantalla del instrumento. Algunos además poseen una memoria interna para almacenar dichas lecturas, evitando así nuevamente un error humano como el de anotar cada una de las lecturas en una libreta de campo. Son muy útiles en aquellos trabajos donde se realizan una extensa cantidad de lecturas, ahorrando mucho tiempo y posibles errores del operador.

Imagen Nº 3 - Nivel Digital

6.1.3. Sistemas Globales de Navegación Por Satélite[1]

Como se comenta al inicio de esta sección, se desarrollan algunos conceptos generales en lo que respecta a instrumental topográfico y las metodologías de posicionamiento, necesarios para comprender el desarrollo de este informe. Este informe estudia los sistemas de nivelación automática operados por receptores GNSS, de esta manera, es imprescindible mencionar la metodología de posicionamiento satelital.
No se profundiza en esta temática, ya que esto corresponde a un estudio diferente que excede los límites de este proyecto; De igual manera, a continuación se desarrolla una descripción general sobre el posicionamiento satelital a partir de receptores GNSS.

Los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS) permiten determinar la posición de un receptor en la Tierra midiendo la distancia a un mínimo de cuatro satélites simultáneamente. Estos satélites transmiten señales con información sobre su posición y el instante exacto en que fueron emitidas. El receptor al captar estas señales, puede calcular el tiempo de viaje de cada una, multiplicando ese tiempo por la velocidad de propagación de la señal (aproximadamente la velocidad de la luz en el medio), se obtiene la distancia entre cada satélite y el receptor.

Los satélites, al igual que los receptores terrestres, están equipados con relojes(relojes atómicos en el caso de los satélites); de esta manera, es posible determinar la diferencia temporal entre la emisión y recepción de la señal.
En el hipotético caso de que los satélites y la tierra fueran estáticos, se llega rápidamente a la

[1] *Observación: A los efectos de desarrollar el marco teórico de este trabajo, se decide abordar el funcionamiento de los sistemas GNSS a partir de los conceptos fundamentales correspondientes a la constelación GPS. Esta elección permite generalizar los principios de posicionamiento satelital sin extender el análisis a las particularidades de cada una de las constelaciones actualmente existentes (GLONASS, Galileo, BeiDou, etc.), lo cual excede el alcance de este estudio. Se considera que los conceptos tratados resultan representativos y suficientes para comprender el funcionamiento general de los sistemas de posicionamiento aplicados.*

conclusión de que para determinar la posición de un elemento en la tierra son necesarios 3 satélites, para resolver un sistema de ecuaciones de 3 incógnitas (X,Y,Z) coordenadas del receptor en la tierra asociadas al sistema de referencia de los satélites.
Esto no es así, siendo necesarios cuatro satélites, para determinar así la cuarta variable, el tiempo (t).

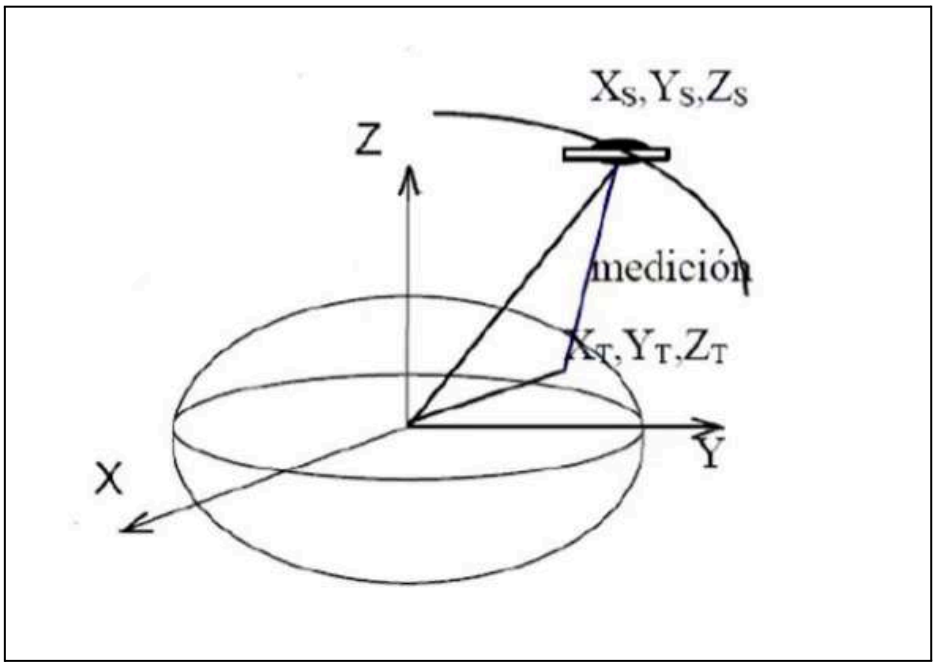

Imagen Nº 4 - Posicionamiento GNSS

El **posicionamiento satelital** se basa en la determinación de la posición de un receptor a partir de tres componentes fundamentales:

1. **Una magnitud conocida:** La posición del satélite en coordenadas espaciales (X,YS,ZS).
2. **Una cantidad mensurable:** La distancia entre el satélite y el receptor (ρ), obtenida midiendo el tiempo de propagación de la señal desde el satélite hasta el receptor y multiplicándose por la velocidad de propagación de la luz.
3. **Una cantidad desconocida:** La posición del receptor en coordenadas espaciales (XT,YT,ZT), que es el objetivo a determinar.

$$\rho \sqrt{(XS - XR)^2 + (YS - YR)^2 + (ZS - ZR)^2}$$

Una vez se tiene comprendido básicamente el los fundamentos generales del posicionamiento GNSS, se tiene que destacar las diversas metodologías de posicionamiento que pueden utilizarse acorde al trabajo a realizar, precisiones requeridas o instrumental disponible.

Tipos de Posicionamiento:

1) **Posicionamiento diferencial o relativo**

Este método consiste en el procesamiento de ya no las observaciones de un solo receptor, sino de diferencias de observaciones simultáneas, realizadas por al menos dos estaciones a los mismos satélites.

Se calculan las coordenadas de puntos respecto de al menos una estación de referencia que debe tener coordenadas conocidas a priori. La situación deseable es que el cálculo diferencial no se encuentre afectado por errores sistemáticos apreciables. En este caso, la exactitud de las coordenadas estará dada por la coordenadas a priori de la estación de referencia. La precisión de las mismas en cambio estará determinada por el método diferencial en sí y por las condiciones que se utilizan.

2) **Post Proceso**

El post-proceso en el contexto de los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS) se refiere al análisis y tratamiento de los datos recopilados luego de la observación, en lugar de calcular la posición en tiempo real. Esta metodología permite mejorar significativamente la precisión y confianza de los resultados aplicando diversas técnicas de corrección y ajuste.

3) **Tiempo Real o RTK**

Hoy en día es el método más utilizado, consta de utilizar correcciones en tiempo real desde una estación base cercana. Esta afirmación es una generalización y no quiere expresar que el resto de métodos se encuentren obsoletos. Cada método tiene sus aplicaciones dependiendo de las precisiones y tolerancias establecidas para cada trabajo.

La estación de referencia (base) tiene un radio enlace conectado y retransmite los datos que recibe de los satélites. Además el móvil también tiene un radio enlace por el cual recibe las señales transmitidas por la base, y los datos de los satélites desde su antena. Estos dos conjuntos de datos pueden ser procesados juntos en el móvil para resolver las ambigüedades y obtener una posición muy precisa en relación con el receptor de referencia.

Cuando está rastreando satélites y recibiendo datos de referencia de la base, puede empezar el proceso de inicialización.

Una vez que se ha completado el inicio, las ambigüedades son resueltas y el móvil puede registrar puntos y sus coordenadas con una precisión del orden de 1 a 5 cm.

Es importante mantener la comunicación con la base, de otra manera el móvil puede perder la ambigüedad. Si esto sucede la posición calculada es mucho menos precisa. Además, se pueden presentar problemas cuando se mide cerca de obstrucciones tales como edificios altos, árboles, etc. ya que la señal de los satélites puede ser bloqueada.

Imagen Nº 5 - GNSS Base y Rover

6.2. PROYECCIONES CARTOGRÁFICAS:

Resulta de especial importancia introducir el concepto de proyección cartográfica, especialmente en lo que respecta a deformaciones y el cálculo del factor de escala K. Esto es esencial a la hora de combinar observaciones obtenidas mediante receptores GNSS y aquellas obtenidas mediante instrumental de topografía óptico, como lo es la estación total.
Cómo veremos más adelante, el equipo trabajó utilizando una Estación Total sobre puntos y proyectos netamente basados en observaciones de receptores GNSS, por lo que es especialmente importante entender cuál es la metodología que debe ser aplicada para minimizar los errores en estas situaciones de trabajo.

Las proyecciones cartográficas son métodos matemáticos utilizados para representar la superficie curva de la Tierra en un plano. Debido a que la Tierra es un geoide, la cual es una superficie curva compleja, por ende cualquier representación plana conlleva cierto grado de distorsión en propiedades como la forma, la distancia, la dirección o la escala. Para minimizar estas distorsiones, se han desarrollado diversas proyecciones cartográficas, cada una con características específicas que las hacen adecuadas para distintos propósitos.

Entre las proyecciones más utilizadas se encuentra la proyección UTM (Universal Transversal Mercator), siendo la proyección adoptada por todas las empresas constructoras a las cuales se realizó la visita para las prácticas de campo en el marco del presente proyecto.

6.2.1. Proyección UTM

La proyección UTM es un sistema de representación cartográfica basado en la proyección Transversal de Mercator, desarrollado para dividir la superficie terrestre en 60 zonas o husos de 6° de longitud cada una. En este caso nos ubicamos en el huso 21 Sur.

Características principales de la proyección UTM:

Es una proyección basada en un cilindro transversal tangente al meridiano central de cada huso, que preserva la forma de los objetos representados.

Para este meridiano central el ***factor de escala k*** es de 0.9996 con el fin de reducir distorsiones.

La unidad de este sistema de coordenadas es en metros con el origen del falso este en el meridiano central de cada huso y el falso norte en el polo (latitud 0º).

6.2.1.1. Factor de Escala "K"

El coeficiente de escala en la proyección UTM se conoce como Factor k o coeficiente de anamorfosis (k) y representa la relación entre la escala local en un punto y la escala nominal de la proyección.

Valor del Factor de escala:

El valor del Factor de escala o K, varía dependiendo de la ubicación dentro del huso, teniendo un valor en el meridiano central de cada huso de 0.9996 es decir que altera las distancias reduciendolas, pero esto se hace para lograr que en todo el huso se logren las menores distorsiones.

A continuación detallaremos cómo se calcula el factor k para un punto de coordenadas conocidas (φ,λ) además de esto necesitamos conocer los parámetros del elipsoide.

$$k = 0.9996 \times \left[1 + \frac{\Delta\lambda^2}{2} \times \cos^2 \varphi \times (1 + n^2) \right]$$

Imagen N° 6 - Fórmula Factor de escala k

Siendo:

Δ: La diferencia de Longitudes entre el meridiano central y la longitud del punto.

φ: La latitud del punto.

n: Depende del elipsoide n= cos(φ)*$\sqrt{}$ (e^2/(1-e^2)), siendo e^2 la segunda excentricidad del elipsoide.

En el apartado de prácticas de campo se detalla un ejemplo claro de aplicación de esta fórmula en una situación real. Es necesaria la aplicación de la misma en las prácticas de campo realizadas por el equipo, especialmente al momento de estacionarse mediante el método de trisección, utilizando como referencia puntos determinados a partir de un receptor GNSS, para posteriormente medir puntos que serán comparados con un proyecto definido en una proyección UTM.
Este ejemplo resulta útil para comprender la metodología a seguir, y es por este motivo que se introduce el concepto de "factor de escala K".

6.2.2. Proyección Transversa Mercator (TM) como alternativa a la UTM

La proyección UTM es ampliamente utilizada en obras de ingeniería debido a su versatilidad y cobertura global. Esta permite trabajar con precisiones aceptables para distancias moderadas. Sin embargo, se debe entender que la proyección UTM es un caso especial de la proyección Transversa de Mercator estandarizada para trabajar globalmente, con parámetros fijos bien definidos.

Por otra parte, la proyección Transversa mercator permite mayor flexibilidad, ya que los parámetros se pueden definir según las necesidades específicas de cada proyecto. Esto permite definir un sistema de coordenadas local a partir de un meridiano central y un factor de escala ajustado, minimizando las deformaciones métricas dentro de la zona de trabajo.

Este procedimiento es común en proyectos de gran magnitud; Al reducir las deformaciones por escala, se mejora la calidad cartográfica optimizando así la calidad de los relevamientos y los Modelos Digitales de Terreno (MDT).

6.3. OBRAS VIALES

En este párrafo se introducen los conceptos íntimamente relacionados con la materia de este proyecto de investigación. Cómo ya se mencionó en reiteradas ocasiones, es necesaria una introducción a las Obras Viales como generalidad, pasando por sus procesos y requerimientos, para poder comprender la importancia y aplicabilidad de los resultados obtenidos en este estudio.

Dentro de lo que respecta a obras de infraestructura en Uruguay, la obra vial es una de las más importantes y en la cual se encuentra una de las mayores inversiones económicas de nuestro país. De esta manera, al tratarse de un rubro con alto incentivo económico, las técnicas y métodos de trabajo se encuentran en constante evolución, de la misma manera que

las tecnologías aplicadas al sector. El surgimiento de los sistemas automatización de maquinaria es producto de la búsqueda de mayor productividad, rendimiento y ahorro de costos para las empresas constructoras.
Dentro del espectro de lo que se menciona como "obras viales" se incluyen carreteras, caminos, puentes, túneles y otras infraestructuras relacionadas. En Uruguay, las obras viales son esenciales para el desarrollo económico y social.

Se pueden definir diferentes etapas dentro del desarrollo de un proyecto vial, en las cuales el Ingeniero Agrimensor interviene en algunas de manera activa, en otras tendrá menor participación y hay etapas que están completamente fuera de su campo de aplicación. A continuación se desarrolla el proceso de participación de este profesional en este rubro en específico, realizando un énfasis en las tareas competentes dentro del rubro vial.

6.3.1. PARTICIPACIÓN DEL ING. AGRIMENSOR EN OBRAS VIALES

La topografía como tal juega un papel más que importante en el desarrollo de cualquier obra de infraestructura, particularmente, en las obras viales cobra especial importancia, desde el control de un movimiento de suelos hasta el ajuste de una red de mojones nivelados. De esta manera, el Ingeniero Agrimensor es quien, por ser el especialista en la materia, toma un papel insoslayable y estratégico en el desarrollo de estos proyectos, participando activamente de diferentes etapas. Es el Agrimensor quien genera el MDT total de la zona de trabajo, sobre el cual se diseña y construye toda obra de ingeniería, es quien define y modela las bases de la totalidad del proyecto. De esta manera, el Ing. Agrimensor es un pilar fundamental de las siguientes etapas:

1) Presupuestación de obra: Si bien no participa directamente del proceso de cotización como tal, la presupuestación de obra se basa en un "Anteproyecto" utilizado como base para la estimación de costos del proyecto. Es el Ingeniero Agrimensor (en algunos casos otro profesional puede tomar parte), quien debe utilizar los recursos disponibles para brindarle al personal encargado de la presupuestación un Ante-proyecto como tal.
   Una práctica habitual consiste en realizar un vuelo con Dron para generar un MDT para realizar este primer proyecto sobre el mismo. En general las tolerancias para esta etapa son bajas, ya que solo se utilizará el producto para estimar materiales, costos operacionales, personal, etc.

2) Proyección de obra: Las empresas de gran magnitud en general cuentan con una oficina técnica encargada específicamente de la realización del proyecto. En la práctica, el Ingeniero Agrimensor es quien tiene mayor contacto con la etapa de diseño de obra, para esto es necesario contar con un conocimiento sólido en Softwares

específicos para manejo de este tipo de datos, así como conocer las normativas de diseño particulares de las obras a realizarse en este rubro.

3) Control de tolerancias espaciales y geométricas durante el desarrollo del proyecto: El Ing. Agrimensor toma un papel fundamental a diario realizando controles rutinarios de tolerancias, en general, cada vez que se realiza una modificación en materia topográfica, el Ing. Agrim. debe corroborar que los resultados obtenidos sean los adecuados. Será responsabilidad de el mismo el contar con un marco de referencia adecuado, conocer los parámetros del proyecto y solicitar el instrumental adecuado para cada etapa del proyecto.

4) Control final de obra: De la misma manera que se menciona anteriormente, antes de que una obra se considere finalizada, el proyecto terminado deberá estar dentro de las tolerancias establecidas por el pliego de la obra, si durante el proceso de desarrollo de la misma se cometieron errores, los mismos saldrán a la luz en la etapa final de obra. En cualquier caso, los resultados finales serán evaluados por un Ingeniero Agrimensor, en conjunto con otros profesionales de la materia.

Como todo trabajo de topografía siempre es fundamental conocer bajo qué precisiones se quiere trabajar y esto influye directamente en la metodología a aplicar; en el rubro vial, a lo largo de las diferentes etapas, se deben cumplir con las tolerancias preestablecidas en el pliego de la obra y el no cumplirlas conlleva importantes consecuencias.

El desarrollo de nuevas tecnologías permite que alcanzar altas precisiones sea aparentemente más accesible, en lo que respecta a operación. Quizás hace algunos años, realizar una nivelación milimétrica para elaborar un aeropuerto, por ejemplo, resultaba extremadamente complejo, aumentando costos operativos y tiempo de trabajo, hoy en día la tecnología aplicada de manera inteligente permite realizar este tipo de actividades de manera más eficiente.
Es particularmente responsabilidad del Ingeniero Agrimensor seguir las técnicas adecuadas, escoger el instrumental correcto y determinar la metodología a desarrollar para alcanzar las precisiones deseadas.
Como en la mayoría de los trabajos que se realizan en esta profesión, la gran pregunta es *¿Para qué se está midiendo? ¿Se está realizando un camino de balasto por el que circulará maquinaria forestal o se nivelará un terreno para un circuito de Fórmula 1?* Evidentemente los objetivos influyen directamente en el instrumental y metodologías necesarias.

¿Qué conlleva el incumplimiento de las tolerancias establecidas para el proyecto?

No cumplirlas impacta directamente en 3 aspectos esenciales:

- **Seguridad**: El incumplimiento de las tolerancias establecidas en el desarrollo de las diferentes etapas de una obra vial impacta de manera directa en la última capa de rodadura de la vía de circulación, de esta manera, el cometer errores a lo largo del proceso constructivo afecta directamente a la circulación de los vehículos. Las pendientes longitudinales y transversales son diseñadas siguiendo una serie de parámetros para cumplir con las condiciones de seguridad determinadas y drenajes pluviales.
  Una construcción "mediocre" será más propensa a sufrir daños por el tránsito, generando baches, fisuras, etc. que afectan directamente a la seguridad del usuario.

- **Durabilidad**: Los errores, principalmente aquellos asociados a la altimetría del proyecto, afectan directamente a la estructura diseñada ya que el paquete estructural, se diseña en función del cálculo de cargas y materiales a utilizar, por lo que no respetar este "modelo" conlleva a que no se obtenga la durabilidad esperada en la vía a construir. De la misma manera que se mencionó anteriormente, el no respetar las tolerancias admitidas, provocará que el producto generado sea de menor calidad, siendo así más propenso a daños y necesitando un mayor mantenimiento a lo largo del tiempo.
  Este punto cobra especial interés en el apartado de *"Aparición de los sistemas de nivelación 3D en Uruguay"*

- **Costos**: Durante el proceso de planificación y presupuestación de una obra, es necesario estimar con precisión todos los recursos a utilizar durante el desarrollo de las diferentes etapas, considerando siempre que se cumplirá con las tolerancias técnicas preestablecidas para cada fase constructiva. Las tolerancias definen los márgenes aceptables de error en niveles, alineamientos, pendientes, espesores, etc.

  No cumplir con las tolerancias puede significar la reconstrucción total o parcial de la fase ejecutada, lo que implica un aumento de costos: Materiales, mano de obra, uso de maquinaria, combustible, reprogramación de tareas, y otras múltiples variables que se encuentran condicionadas por los plazos de la obra. De esta manera, desde el punto de vista económico, la precisión en la ejecución es un factor clave para garantizar que los recursos previstos sean suficientes.

  En este contexto, los sistemas de nivelación automáticos juegan un papel fundamental, prometiendo la eliminación del retrabajo al mantener las precisiones durante las diferentes fases de la obra

6.3.1.1. Materialización del sistema de referencia geodésico

En cualquier obra de ingeniería, y en particular en proyectos viales, uno de los primeros pasos a dar, es definir el sistema de referencia sobre el cual se basará todo el proyecto. Esto es fundamental ya que permite conectar la información del terreno existente, obtenida a través de relevamientos topográficos, con el diseño de la obra proyectada. Además, garantiza la coherencia y precisión de los datos a lo largo de todo el desarrollo del proyecto, desde la planificación hasta la ejecución.

La calidad del marco de referencia es un pilar fundamental para trabajar bajo altos estándares de precisión.

Si bien no se profundiza en los conceptos de sistema y marco de referencia, deben ser considerados algunos aspectos esenciales para su correcta definición y aplicación.

- **Definición:** se deben planificar, construir, medir y ajustar los puntos que definen el sistema de referencia. Como se verá posteriormente, la calidad del marco de referencia toma una parte especialmente importante en el transcurso de una obra de estas características.

- **Permanencia:** Los puntos fundamentales o vértices deben estar materializados de forma tal de asegurar su permanencia durante el tiempo necesario de trabajo. Deberán estar correctamente balizados para ser identificados de manera rápida, segura y sin equivocaciones.

- **Exactitud del marco de referencia:** La materialización del sistema de referencia debe realizarse aplicando métodos e instrumental que aseguren precisiones dentro de las tolerancias predefinidas.
  Una buena práctica consiste en materializar una red de mojones nivelados mediante un nivel topográfico, más allá de que las tolerancias de la obra puedan permitir trabajar con instrumentos no tan precisos, el comenzar con altas precisiones certifica que los puntos de control se encuentran con holgura dentro de las precisiones necesarias.

- **Extensión del marco de referencia:** Es importante que la materialización de puntos de dicho sistema abarque toda la superficie de la obra. Una práctica habitual en obras de estas características consiste en materializar una red de mojones nivelados a lo largo de la totalidad de la obra.

A continuación se desarrollan una serie de conceptos específicos acerca de las motoniveladoras, el objetivo de esto es comprender el funcionamiento de estas máquinas en relación al desarrollo de las obras viales, asimismo, comprender su manera de operar y como forman parte de la actividad del Ingeniero Agrimensor en el desarrollo de proyectos viales.

6.3.2. MOTONIVELADORAS Y SU PARTICIPACIÓN EN OBRAS VIALES

6.3.2.1. Generalidades y operación de la Motoniveladora

La motoniveladora forma parte del conjunto de maquinaria pesada utilizada en la construcción, para nivelar y dar forma a terrenos irregulares. Su función principal es la de alisar superficies y definir pendientes con precisión. Se emplea tanto en las etapas iniciales de preparación del suelo como en el acabado final, asegurando una base uniforme para diversos proyectos. Su uso es esencial en la construcción de rutas, plataformas niveladas, plateas y cualquier obra que requiera movimiento de suelos y nivelación precisa.

Imagen Nº 7 - Motoniveladora John Deere

Se muestran algunos de los componentes principales de las motoniveladoras que se necesitan conocer para poder entender los movimientos que realiza para nivelar el terreno y de qué manera trabajan los sensores en el proceso de automatización a partir de sistemas de nivelación que se verán más adelante.

Imagen Nº 8 - Partes de la motoniveladoras

Si bien las motoniveladoras pueden realizar una variedad de movimientos para adaptarse a distintos trabajos, además de las nivelaciones precisas, como el corte de cunetas, la remoción de asfalto dañado con el ripper o la construcción de canales, este análisis enfoca únicamente en los componentes que intervienen en los movimientos del implemento de corte.
Como se menciona en apartados siguientes, estos movimientos son controlados por sensores en los sistemas de nivelación, y por lo tanto, en los que se pondrá el foco en este estudio.

Partes de la motoniveladora que participan en el movimiento de la cuchilla:

- Círculo / Tornamesa: Permite rotar la cuchilla, la cuchilla se rota para que el material acumulado se desplace hacia un costado y no se acumule en frente a la máquina.

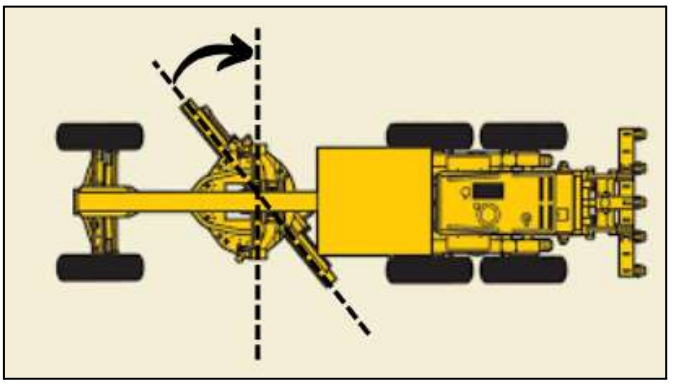

Imagen N° 9-Rotación de cuchilla en plano horizontal

El círculo también permite desplazarse lateralmente para realizar otro tipo de trabajos o para evitar obstáculos.

Imagen N° 10-Círculo desplazado lateralmente

- Cilindros: Los cilindros se utilizan para darle pendiente a la hoja mediante el cambio de elevaciones del lado izquierdo y derecho.

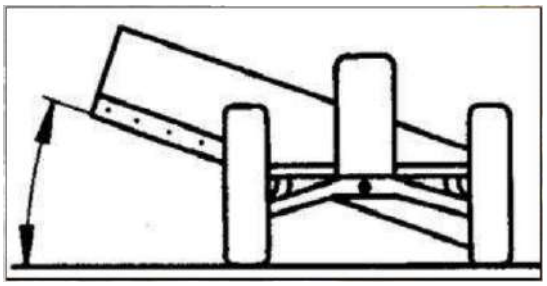

Imagen N° 11-Inclinación de cuchilla por cilindros de elevación

- Borde de corte / Cuchilla: Las cuchillas son elementos de desgaste, como veremos posteriormente, son el extremo que va contra el material y que por lo tanto se desgasta.

Imagen N°12-Borde de corte de motoniveladora

- Bastidor: El bastidor no realiza movimientos, se menciona exclusivamente por ser necesario para controlar los movimientos de la motoniveladora a la hora de introducir los sistemas de nivelación como se detalla en los apartados siguientes. Se puede apreciar en la *Imagen N°8 - Partes de las motoniveladoras.*

Otros Movimientos:

- Ángulo de ataque: Se define como el ángulo formado entre la cuchilla y el plano horizontal del terreno sobre el cual actúa. Este ángulo determina cómo penetra la cuchilla en el suelo y cómo se comporta el material durante el corte, el acarreo y la nivelación. El ángulo se suele elegir dependiendo del tipo del suelo y las condiciones de trabajo.
- Movimiento lateral: Permite deslizar la cuchilla en sentido transversal a la máquina para hacer trabajos específicos.

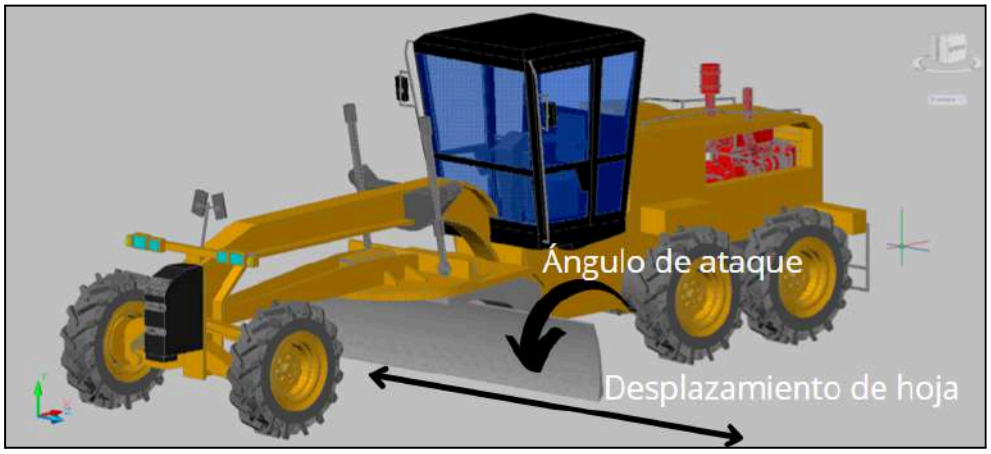

Imagen N°13-Movimiento lateral de la cuchilla

A continuación, se desarrolla de manera general, la participación de la motoniveladora en el proceso de construcción de una obra vial, en qué momento y de qué manera toma parte de la misma. Evidentemente algunos de estos aspectos dependen de las características de cada proyecto a realizar, sin embargo, se describe a grandes rasgos cómo se lleva adelante la operación habitualmente.

6.3.2.2. Operación con la motoniveladora a lo largo del desarrollo de la obra

En ingeniería, la importancia de los componentes estructurales es fundamental para el éxito de cualquier obra. Sin una base sólida, el resto de los procesos no se desarrollan de manera adecuada. Esta realidad también se aplica a la construcción vial.

La calidad de una vía de circulación, ya sea un camino vecinal de tosca o una ruta pavimentada, no depende únicamente de la capa final, ni de sus características. Se puede construir un pavimento con una compactación exacta y a la temperatura ideal, pero si las capas base no fueron correctamente ejecutadas, el resultado no será el esperado.

La construcción de una buena vía de circulación implica un trabajo de la motoniveladora en varias etapas, las cuales en general se rigen por la realización de las diferentes capas que se ven en el siguiente esquema.

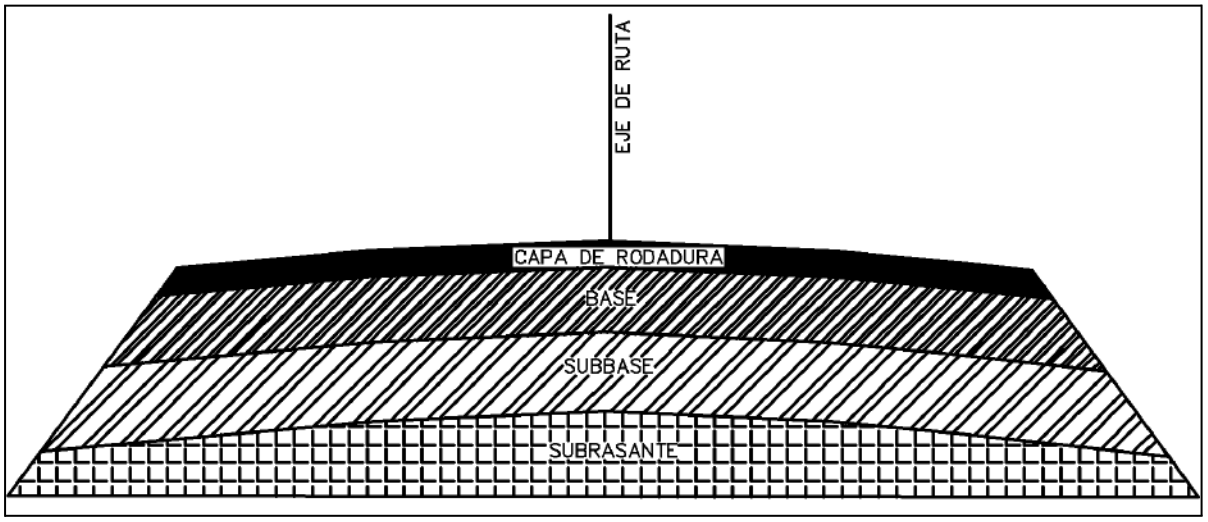

Imagen Nº 14 - Subrasante, Sub base y Base de un pavimento regular

Para cada una de las capas se comienza con un trabajo "grueso" con un tipo de material determinado y diferenciado según la granulometría del mismo. En general la capa inferior, (*correspondiente a la "subrasante" en la imagen Nº14*), se realiza con un material más grueso, y se seleccionan materiales de menor granulometría conforme nos vamos acercando a la capa superior, finalizando con un trabajo de "refinado" al finalizarlas. En este punto, a la hora de refinar el trabajo realizado es cuando los sistemas de automatización juegan quizás su papel más importante a lo largo del desarrollo de la obra.
La incorporación de sistemas de automatización en motoniveladoras transforma la metodología de trabajo en las diferentes fases, esto afecta directamente a la planificación de las obras en lo que respecta a tiempos, presupuestos, mantenimientos y capacitación del personal de trabajo.

En este punto resulta interesante incorporar el concepto de lo que se llamara "***metodología clásica***", este concepto se refiere a la metodología de trabajo por estacas niveladas colocadas por un topógrafo. Al incorporar sistemas de nivelación automáticos, esta metodología queda obsoleta, sin embargo se continúa utilizando para algunas aplicaciones, sobre todo por empresas constructoras más pequeñas que no cuentan con sistemas de nivelación automáticos, o simplemente para proyectos de caminería que no los requieren.
A continuación se desarrolla esta metodología de trabajo, es importante comprender este punto para posteriormente, poder identificar virtudes y defectos de la automatización de este proceso en específico.

6.3.3. NIVELACIÓN POR ESTACAS (METODOLOGÍA CLÁSICA)

Primero se introducen algunos conceptos importantes para este análisis; qué se entiende cuando se habla de "*nivelar una cancha*"? Y específicamente qué se entiende por "*cancha*"?

Una cancha es un término recurrente en la jerga de las obras viales, en general hace referencia a un tramo específico de la vía de circulación que se encuentra en construcción en ese momento. No existe una distancia específica para este tramo, en general se corresponde a la cantidad de personal disponible, cantidad de maquinaria, volumen de trabajo, plazos, etc. Pero se podría establecer una "cancha tipo" de 300 m de longitud y de ancho correspondiente a la vía de circulación de trabajo.

Cómo se desarrolla en la sección anterior, el procedimiento de nivelación de una cancha se realiza por etapas, se trabaja siguiendo un procedimiento algo reiterativo, se realiza una primera capa base, esta se nivela, luego se compacta, sobre esta se construye otra capa de material más fino y así sucesivamente. Durante el desarrollo, la topografía juega un papel fundamental, siendo esencial el buen control de elevaciones y pendientes.

La motoniveladora cuenta con una cuchilla que puede realizar cortes a diferentes pendientes.
Como se explica en el apartado específico de la motoniveladora (*Ver página Nº27*), los movimientos de la cuchilla son controlados de manera manual por el operador (Si no se cuenta con sistemas de automatización), debido a esto, es responsabilidad del equipo de topografía materializar una guía visual para que el operador de la motoniveladora pueda realizar los cortes a las elevaciones y pendientes requeridas.

El procedimiento que se sigue para establecer el marco de referencia visual es el estaqueo, en general realizado a partir de receptores GNSS, Estación Total o Niveles Topográficos.

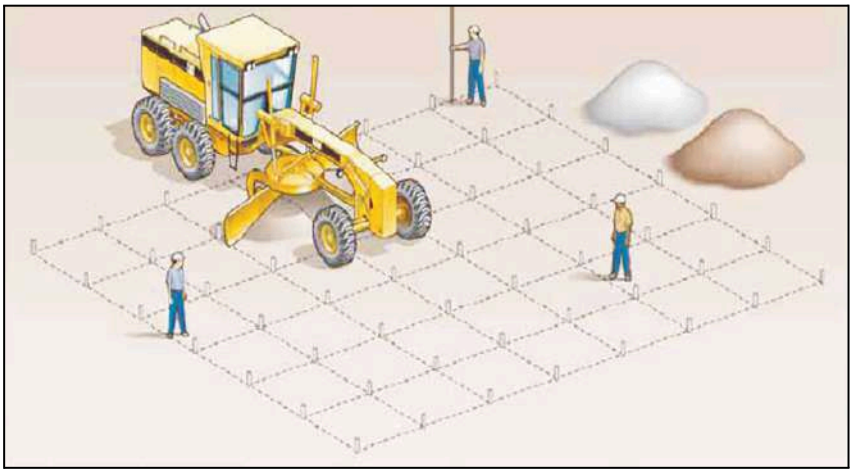

Imagen N°15- Nivelación tradicional

El procedimiento clásico se basa en la colocación de estacas a elevaciones específicas, buscando que la máquina deje material "peinando" la parte superior de las mismas. Se estaquean puntos notables, como ejes y borde de plataforma; se utilizan estacas de madera quedando la sección superior de estas a la altura que se quiere alcanzar.
Aunque es habitual que se deje la sección superior de la estaca 2 o 3 cm por encima del nivel de referencia deseada a solicitud del operador, de esta manera, el operador puede estimar cuando llega al nivel deseado.
Cuando la cuchilla "peina" las estacas significa que el material también se encuentra a la altura deseada, colocando entonces una estaca en el eje de la ruta y otra en su borde a las elevaciones necesarias, se puede alcanzar la pendiente deseada como se puede ver en la siguiente imagen

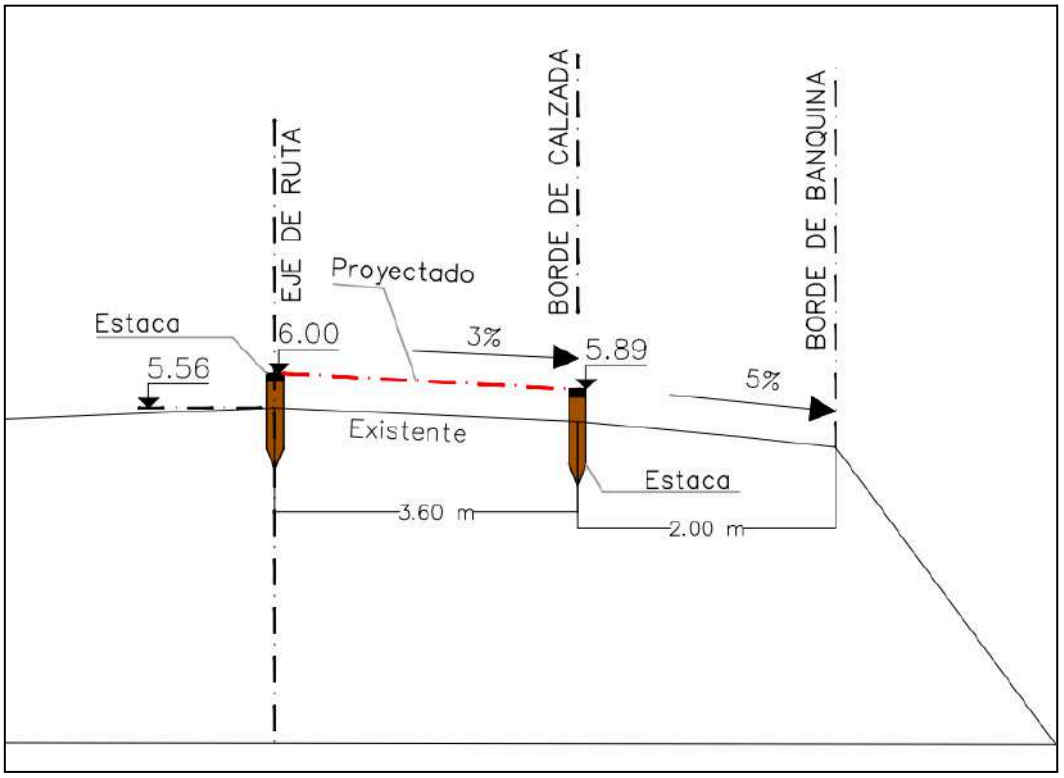

Figura N°16 - Colocación de estacas

En la imagen anterior se presenta un corte transversal simplificado de una ruta en construcción, como se ilustra la cota de terreno existente en el eje es de 5.56 m. Suponiendo que se rellenará con la siguiente capa buscando un espesor de 4.0 cm, de esta manera se coloca una estaca a cota 6.00 m. Como el proyecto tiene una pendiente transversal de 3%, se coloca una segunda estaca a 5.89 m dado que la distancia horizontal entre el eje de ruta y el borde de calzada es de 3.60 m.

Ocasionalmente se podría colocar una tercera estaca en medio, dependiendo del ancho de cuchilla de la máquina y del proyecto en cuestión, pero el principio de nivelación sería el mismo.

Teniendo en cuenta que en el desarrollo de una obra, se colocan perfiles de estacas en intervalos longitudinales de aproximadamente 25 metros, en un tramo de 10 km, se necesita un equipo de topógrafos para colocar como mínimo 1200 estacas niveladas. Debe tenerse en cuenta que, previo a cada recargo se deben colocar estacas nuevas siguiendo este procedimiento:

1 - Estaqueo de las canchas
2 - Recargo del material mediante camiones
3 - Compactación del material
4- Nuevo estaqueo para verificar la altura alcanzada mediante la tarea del recargo
5- Corte final de cancha tomando como guía este estaqueo final

Esto da una idea del trabajo que representa para el equipo de topografía realizar el proceso de nivelación de una cancha.
El estaqueo en una superficie base para la construcción de una carretera no es tarea sencilla debido a que cada sub base tiene una compactación importante, debido a la intención de aumentar la estabilidad y poder de soporte. Siendo necesario utilizar un cincel punta y una maceta para generar un orificio en el cual se pueda colocar la estaca, luego se procede a golpear reiteradas veces con la maceta para presentar la cara superior de la estaca con la altimetría correspondiente.

*Imagen N°17- Imagen real de estaqueo realizado en cam*po

Sumado al arduo trabajo del equipo de topografía, hay que tener en cuenta que el "peinar" la estaca corre a cuenta de la capacidad técnica del operador de la motoniveladora, así como el mantener la elevación entre los intervalos de estacas.
Los operadores más hábiles logran llevar a cabo este procedimiento con gran precisión, el gran problema se encuentra en los intervalos entre estacas.
Más allá de que el operador logre "peinar" la estaca con gran precisión, en los intervalos entre estacas, la elevación tiende a variar, generando problemas en las pendientes finales del terreno (transversales o longitudinales).
La solución habitual a este problema, suele ser aumentar el número de estacas por segmento, es decir, añadirle referencias al operador de la máquina, pero esto deja de tener sentido en cierto punto cuando se analiza el tiempo requerido para esta actividad. Colocar más estacas implica más tiempo, más topógrafos y un mayor presupuesto.

Introducido el tema y presentada la actividad del Ingeniero Agrimensor en las obras viales, así como la metodología clásica, se introduce el concepto de sistema de nivelación automático, buscando responder algunas preguntas como: *¿Desde hace cuánto tiempo existen? ¿Cómo Funcionan? ¿Cómo y en qué año se comenzaron a utilizar en el Uruguay?*.

Para responder estas preguntas, se comienza a analizar el motivo de su entrada al mercado, cómo fue y que se busco con ellos.

6.3.4. HISTORIA DE LOS SISTEMAS Y SU LLEGADA A URUGUAY

Los sistemas de control de maquinaria controlados por GNSS comenzaron a aparecer en la década del 90, desarrollados por las principales marcas de equipos de topografía, Trimble, Topcon y Leica. De cualquier manera, estos no fueron introducidos a Uruguay hasta hace algunos años.

En una charla con el director de KPN, Antonio Villaluenga (adjunta en el anexo) cuenta que, no fue hasta alrededor del año 2014, con la aparición de los contratos PPP para la elaboración de rutas nacionales de gran importancia para el desarrollo vial en el país.

En este tipo de contratos se realizan una multitud de cambios en relación a las licitaciones para la construcción de rutas vistas hasta el momento en el país, sobre todo en lo relacionado con el mantenimiento de las rutas y en el compromiso de la empresa constructora frente al Estado con el mantenimiento de la ruta construida.
Anteriormente, el período de mantenimiento era de 3 años, a partir de estos contratos el mantenimiento pasa a estar a cargo de la empresa constructora por un período de 30 años; Asimismo, se establecen estándares rigurosos para el control del IRI, de esta manera, el foco de la empresa constructora está en obtener resultados de gran calidad y fundamentalmente, en que estos sean duraderos en el tiempo, a modo de prevenir intervenciones en el futuro, traducidas en inversiones de dinero por reparaciones.

Esto no quiere decir que anteriormente el foco de las empresas no estuviese en la realización de obras de la más alta calidad posible, simplemente que se establece un “incentivo” de carácter económico. Si la obra es de mala calidad, requiere mayor cantidad de mantenimiento en los próximos 30 años, disminuyendo así, las ganancias de la empresa constructora en cuestión.

A continuación se desarrolla el concepto de IRI, el mismo es imprescindible a la hora de hablar de Sistemas de Nivelación Automáticos, ya que, es uno de los principales incentivos técnicos que promovieron la llegada de los sistemas, no solamente a Uruguay sino que al mercado global.

6.3.5. ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL (IRI)

El IRI es un indicador que mide las irregularidades en la superficie del pavimento, las cuales inciden directamente en la uniformidad o suavidad de la superficie de una carretera, es uno de los estándares más utilizados a nivel mundial para evaluar la calidad del pavimento en términos de comodidad, confort y seguridad de los usuarios que transiten por la carretera.

Un IRI bajo indica que la carretera tiene una superficie suave, aumentando a medida que presenta mayores rugosidades e irregularidades.

Se destacan algunos elementos que relacionan este índice con los costos constructivos y cómo influyen directamente en la toma de decisiones de las empresas.

- Las técnicas de pavimentación que producen superficies más suaves suelen tener un costo inicial más elevado, reduciéndose los costos de mantenimiento y reparación producto de menor desgaste del pavimento. Concluyendo que un IRI alto genera mayores costos de mantenimiento y rehabilitación.
- Las carreteras con un IRI bajo tienden a tener mayor vida útil, generando menores intervenciones de renovación o rehabilitación, y por lo tanto menores costos asociados a largo plazo.
- La calidad del pavimento, medida por el IRI, también influye en el consumo de combustible de los vehículos. Las carreteras más rugosas aumentan el esfuerzo del vehículo y, por ello, el consumo de combustible, lo que a largo plazo puede tener un impacto económico indirecto.

En resumen, el IRI influye directamente en los costos de construcción, mantenimiento y operación de las carreteras. Mantener un IRI bajo desde la fase de diseño y construcción puede reducir significativamente los costos a largo plazo, mientras que una carretera con un IRI alto puede generar mayores gastos tanto en mantenimiento como en el uso de la carretera.

En un análisis rápido del concepto de IRI y en lo que implica obtener mejores o peores resultados se puede entender el razonamiento que lleva a una empresa constructora a intentar obtener valores más bajos de este índice, más aún cuando los costos de las reparaciones quedarán a cargo de la misma por un largo periodo de tiempo.

Esto motiva en gran parte a la adquisición de sistemas de nivelación 3D automáticos, que en parte, prometen obtención de mejores resultados con un menor costo constructivo y en menor tiempo que trabajando con la metodología tradicional.

Si bien en este informe en ningún momento se realizan mediciones del IRI obtenido, es importante que se entiendan los conceptos asociados a la materia de estudio, y entender cómo se relaciona con el hecho de que una empresa constructora determinada invierta en este tipo de tecnologías.

6.3.5.1. Impacto de una buena nivelación base en el IRI obtenido

El IRI obtenido se encuentra íntimamente relacionado con la calidad de la base construida, un terreno correctamente nivelado se traduce en una base más uniforme para la capa de pavimento, minimizando la variabilidad del IRI.

Relación esperada: A mayor precisión en la nivelación, es probable que se obtenga un IRI más bajo (menos irregularidades), lo que implica una mejor calidad en la superficie de la carretera. Se dice "probable" ya que, como se comentó anteriormente, los resultados obtenidos con el pavimento se derivan de multitud de factores, como temperatura, tiempo y manera de aplicación, maquinaria utilizada, material utilizado, etc. por lo que la realización de una buena base nivelada no garantiza la calidad del producto final, pero ayuda a obtenerlo. La mayoría de defectos en la nivelación de la base salen a la vista a la hora de compactar el material.

6.3.5.2. Efecto de la compactación sobre el IRI:

Durante el proceso de compactación, la base de la carretera se compacta y se vuelve más estable. Si la nivelación previa es precisa, la distribución de la compactación será más uniforme, pudiendo obtener un IRI menor. Si la nivelación tiene defectos o irregularidades grandes, la compactación podría ser menos efectiva, reflejándose en un IRI mayor, las variaciones en la compactación pueden influir en la relación entre la precisión del sistema 3D y el IRI.

Aspectos Importantes: Se debe recalcar que el resultado en términos de calidad de la construcción de una ruta no depende de un solo factor, es decir, no se obtendrá una ruta perfecta con un IRI mínimo por el hecho de automatizar nuestras motoniveladoras, o por utilizar materiales de primera calidad. Los resultados están asociados a un largo proceso constructivo cuyos errores dependen de una multitud de factores. Debiendo ser responsabilidad de los Ingenieros Agrimensores reducir los errores en la mayor medida posible en los procesos en los que se participa de forma activa.

Una vez introducidos los conceptos necesarios, tales como el instrumental de trabajo, la metodología de posicionamiento, características principales de las obras viales y parámetros/índices como el IRI, los cuales conforman el marco técnico indispensable para avanzar hacia el foco principal de este trabajo: el análisis de los sistemas de nivelación automáticos en motoniveladoras. A partir de este punto, se desarrollará en detalle la descripción, funcionamiento y evaluación de los sistemas bajo estudio.

6.4. SISTEMAS DE NIVELACIÓN AUTOMÁTICOS

Si bien estos ya fueron mencionados anteriormente a lo largo del desarrollo del informe, resulta necesario definir correctamente y de manera precisa los sistemas 3D automáticos y sus componentes que serán materia de estudio.
Este apartado se centra en determinar a qué se refiere, de manera general, el concepto "Sistema de nivelación automático" para luego profundizar en los dos sistemas que serán materia de estudio, los llamados "Sistemas 3D".
No se puede comenzar a hablar de sistemas 3D sin antes mencionar a sus antecesores, los Sistemas 2D, los cuales, como veremos a continuación, son la base de los mismos.

La llegada de los primeros sistemas 2D (Sistemas más básicos que los estudiados en este informe), se presentó como una gran mejora en cuanto a la eficiencia del trabajo; A medida que los métodos topográficos fueron evolucionando, con la inclusión de modelos digitales de terreno (MDT) en las obras de infraestructura, y métodos de medición más rápidos y precisos, la tecnología asociada a la maquinaria también evolucionó, llegando a lo que hoy conocemos como sistemas de nivelación 3D automáticos.

A continuación se desarrollan los sistemas que formarán parte de este estudio, pasando por los sistemas 2D antes mencionados, que forman parte (en algunos casos) de estos sistemas de nivelación 3D.

6.4.1. SISTEMAS DE NIVELACIÓN 2D

[2]Los sistemas 2D son lo que dan origen a los sistemas 3D, pero no por ello se encuentran obsoletos, actualmente se continúan utilizando según las necesidades de cada trabajo, en algunos casos estos actualmente ya se encuentran preinstalados en la máquina desde fábrica.

En general, el concepto de sistema 2D se refiere a aquellos en los que la altimetría requiere ser manejada de manera manual por el operador, en general se utiliza una referencia física en el terreno, ya sea una estaca previamente nivelada, una cota conocida, por ejemplo, el eje de una carretera ya nivelado, etc. A continuación se desarrolla esta idea.
En muchas situaciones, lo único que interesa es la posición relativa del implemento de la maquinaria (cuchilla de la motoniveladora) a una referencia, y no la posición de la misma en un sistema de coordenadas.
En el caso particular de las motoniveladoras, los sistemas 2D controlan la pendiente transversal de la cuchilla y la elevación es dada por el operador de la máquina.
Para entender el funcionamiento de los sistemas de automatización y su utilidad, se debe entender cómo operan estas máquinas.

---

[2] *Observación: La información sobre sensores se toma de manuales y hojas de datos de Topcon (ver anexo) y se generaliza para este estudio. Sumado a esto, se debe tener en consideración que, solo uno de los sistemas analizados utiliza sensores digitales y el mismo correspondiente a dicha marca.*

Como se explicó anteriormente en la sección de "*motoniveladoras y su participación en obras viales" (Pág-26)*, estas cuentan con una cuchilla que permite realizar diferentes movimientos basados en la rotación e inclinación con el fin de nivelar el terreno, los movimientos que puede realizar la cuchilla y por lo tanto aquellos que deben ser controlados a efectos de automatizar la operativa son algunos de los mencionados en la misma sección:

- Rotación de la cuchilla
- Inclinación de la cuchilla (pendiente)
- Pendiente longitudinal (principal) de la máquina medida sobre el bastidor

Los sistemas 2D, en general y a grandes rasgos, sin importar la marca del sistema, ***se componen de 3 sensores***, dos de ellos actúan como niveles midiendo la pendiente longitudinal de la máquina y la inclinación de la cuchilla, estos trabajan en conjunto con un sensor de rotación que mide la rotación de la misma.
Entender cómo funciona cada sensor y cómo afecta a la precisión general de la pendiente obtenida es fundamental. A continuación se ilustran estos sensores, indicando su ubicación sobre la maquinaria.

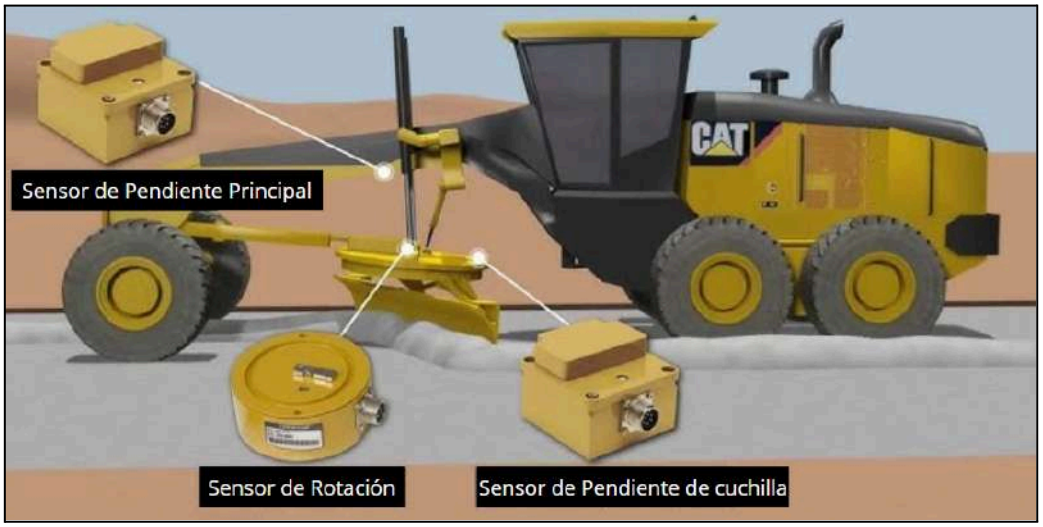

Imagen N°18 - Sensores de sistema 2D CAT

- **Sensor de pendiente de cuchilla:**
  El sensor de inclinación de la hoja mide la inclinación del borde de corte. Tiene un nivel electrónico en su interior que funciona como un nivel digital, este ***cuenta con una resolución de +/- 0,025%***. La lectura del mismo es transmitida a una caja de control.
  En general, está montado sobre el marco circular y gira con la cuchilla, es decir, se coloca de manera que el nivel se encuentre paralelo con el borde de corte buscando medir siempre la pendiente en la dirección de la cuchilla y permitiendo obtener una

magnitud relacionable con el trazado longitudinal de la máquina en caso de rotar la cuchilla.

Imagen N°19 - Sensor de pendiente montado en una motoniveladora

Este sensor requiere mantenimiento y calibración, lo cual será un tema importante a lo largo del desarrollo de este informe y en el estudio en general.
Se debe entender que la maquinaria vial trabaja en ambientes variables y en muchos casos el uso no es del todo apropiado o controlado, por lo que sus componentes, especialmente aquellos asociados a los elementos de corte, sufren un desgaste constante. Debido a esto, los componentes de los sistemas de nivelación se deben adaptar a estos cambios ya que de otra manera las lecturas de los sensores no serán representativas de la realidad, este y otros aspectos serán vistos más adelante pero vale la pena la mención.

- **Sensor de pendiente principal**
  El sensor de inclinación principal se suele montar en el marco principal (bastidor antes mencionado en la *Imagen Nº 8 - Partes de las motoniveladoras*) de la motoniveladora.
  Utiliza el mismo nivel que se encuentra en el sensor de inclinación de la hoja, en este caso el sensor mide la pendiente en la dirección de desplazamiento de la máquina, es decir, la pendiente longitudinal.
  Al igual que el sensor de pendiente de la cuchilla, ***cuenta con una resolución de +/- 0,025%.***

Imagen N°20 - Sensor de Pendiente principal montado sobre el marco de una motoniveladora.

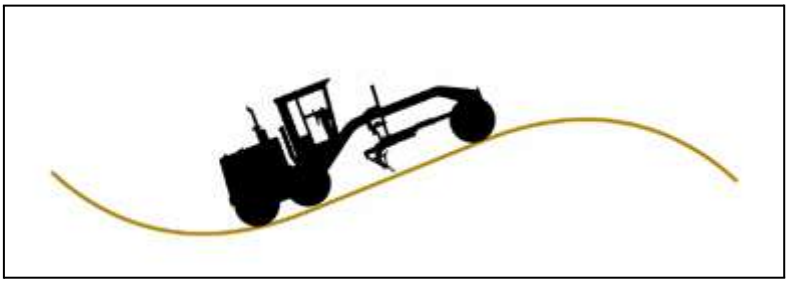

Imagen N°21 - El sensor de pendiente principal mide la pendiente de la máquina.

Si bien no hay elementos de desgaste directamente relacionados con la lectura del sensor de pendiente longitudinal, ya que el mismo se encuentra montado sobre una parte del chasis de la máquina, uno de los factores que inciden en la lectura del mismo, es la presión de los neumáticos. Si se realizan cambios en las presiones por cualquier motivo, el sensor debe calibrarse para adaptarse a la nueva lectura.

- **Sensor de rotación de la cuchilla**
  El sensor de rotación mide el ángulo de rotación de la hoja o cuchilla con respecto a una posición de la cuchilla transversal a la máquina previamente establecida, ***este mide continuamente el ángulo de rotación de la hoja con una precisión de 0.5°*** con el objetivo de garantizar una pendiente transversal correcta.

Imagen N°22 - Sensor de rotación de la cuchilla.

Cálculo de la pendiente transversal con los sistemas 2D

Entender cómo operan estos sistemas para determinar la pendiente deseada por el maquinista, es fundamental para comprender el funcionamiento de los sistemas 3D, asimismo, en los siguientes párrafos se desarrollan fórmulas matemáticas que necesariamente deben ser presentadas, ya que forman parte crucial del apartado de preanálisis de errores.

A priori se puede pensar que la pendiente transversal corresponde a la lectura del sensor de inclinación de la cuchilla, esta afirmación es correcta, únicamente en el caso de que la máquina se encuentre sobre una superficie completamente plana (lectura del sensor de pendiente longitudinal = 0º) con la cuchilla completamente perpendicular (lectura del sensor de rotación =0º).

Como se comentó anteriormente, cuando se nivela un terreno, el operador rota la cuchilla para poder desplazar el material excedente hacia un costado, evitando la acumulación de material frente a la máquina, por otra parte, en la mayoría de las situaciones la superficie del terreno no será completamente llana.

De esta manera, los sistemas de nivelación 2D deben relacionar las lecturas de los 3 sensores para poder llevar la cuchilla a la pendiente transversal deseada.

A continuación se plasma un ejemplo para desarrollar la idea con una aplicación práctica.

Ejemplo:

En el siguiente ejemplo, la pendiente transversal deseada es de un 2 % hasta la línea punteada

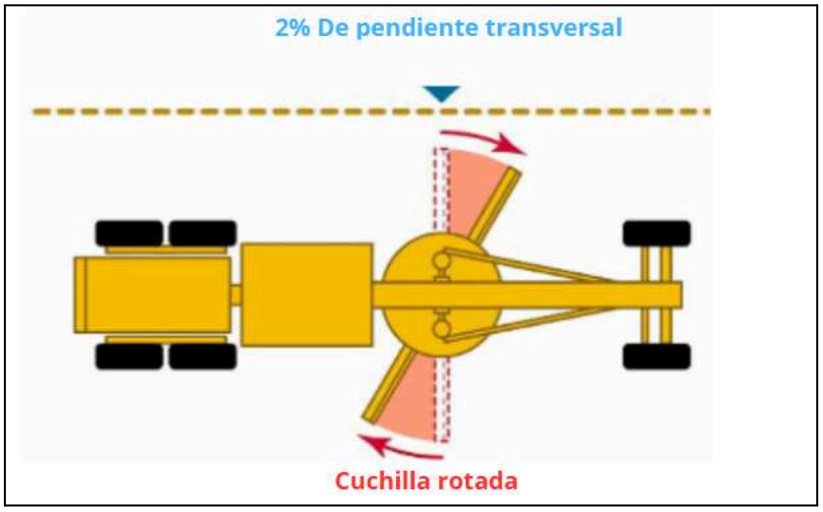

Imagen N°23 - Ejemplo de Rotación

Inclinación transversal deseada = 2%

En este ejemplo, el operador ha introducido una inclinación transversal deseada del ***2,0 %***, y la hoja se encuentra rotada un ángulo de ***-22°*** (Para este caso se denominará "Rot") mientras que el sensor de pendiente longitudinal presenta una lectura del ***6%*** por la inclinación principal (En el ejemplo se llamará "MF").

Inclinación de la hoja = (SX x Cos Rot) + (MF x Sen Rot)

Siendo:

- Inclinación de la hoja: Pendiente deseada
- SX: Lectura del sensor de pendiente transversal
- Rot: Lectura del sensor de rotación
- MF: Lectura del sensor de pendiente longitudinal

De esta manera, se quiere determinar el valor de lectura del lector de pendiente (SX) de la cuchilla para poder alcanzar el valor de pendiente transversal deseado.

Despejando *SX* de la ecuación anterior:

$$SX = \left(\frac{Inclinación\ de\ la\ hoja}{MF\ x\ Sen\ Rot}\right) \div Cos\ (Rot)$$

Finalmente, para este caso: *SX = -1.95%*

Este valor es recalculado a medida que varía la pendiente longitudinal de desplazamiento de la máquina por cambios en el terreno o a medida que el operador modifica la rotación de la hoja, el único valor que se mantendrá constante es el valor de pendiente deseado.

La pendiente transversal deseada puede variar si se requiere, por ejemplo, en casos de transiciones de curvas a rectas o en el desarrollo de rotondas, donde la pendiente transversal debe variar gradualmente para alcanzar una transición “suave”.

Observación relevante:
Es importante comprender que el desarrollo anterior no es representativo de la aritmética total detrás del cálculo de pendiente realizado por el “software”, es probable que el mismo no se pueda aplicar a todos los modelos y marcas de sistemas 2D.
El software y las controladoras de los sistemas siguen algoritmos complejos al enviar señales eléctricas para accionar los componentes hidráulicos de la máquina, este procedimiento corresponde únicamente a una simplificación necesaria para avanzar con el estudio.

Es necesario contar con relaciones aritméticas a efectos de poder realizar un preanálisis de errores donde sea posible independizar los errores provenientes de la apreciación de los sensores, dicho esto, se generaliza la relación antes vista como método de cálculo de pendiente en los sistemas 2D
La atención debe estar en comprender el objetivo de la utilización de estos sistemas, que es alcanzar una pendiente transversal deseada y comprender que para ello utiliza dos lecturas de pendiente (Longitudinal y de cuchilla), la lectura del sensor de rotación de la hoja de corte y no focalizar la atención en el procedimiento de cálculo de dichos valores.

Metodología de trabajo con sistemas 2D
Luego de haber visto y explicado el funcionamiento de los sistemas 2D se explicará su manera de trabajar. Si bien ya fue mencionado de manera básica, cómo el operador debe manejar de manera manual la elevación de la cuchilla, este procedimiento debe ser analizado con detalle.

Imagen N°24 - Motoniveladora CAT con sistema 2D (lectura de los sensores de rotación y pendiente principal)

Al trabajar con sistemas 2D, la pendiente de la cuchilla es controlada automáticamente, mientras que el operador de la motoniveladora debe determinar la elevación de uno de los lados de la cuchilla de manera manual.
En general, se trabaja de manera manual con el lado opuesto a la caída de la pendiente, si se realiza uno de los lados de una ruta, las estacas se colocan sobre el eje de la ruta para utilizarlas como referencia para el manejo manual de la elevación y se deja trabajar el otro lado con pendiente de caída automática. Es decir, similar al trabajo sin sistemas de nivelación, se "peina" las estacas de un lado y se deja caída con pendiente constante hacia el otro.
Lo que suele suceder en estos casos, es que a pesar de tener un control constante de la pendiente de la cuchilla, la elevación sigue siendo controlada por un operador y los resultados logrados siguen estando relacionados a la capacidad práctica del operador de la máquina.
En algunos casos, a estos sistemas 2D se les incorpora un sensor láser o sensores ultrasónicos de sonido que permiten mantener la elevación de uno de los lados de la cuchilla constante, o seguir una referencia como un hilo nivelado, esto evita el error manual del operador, en general estos elementos no terminan de ser del todo prácticos y son utilizados exclusivamente para aplicaciones determinadas.
En cualquier caso, dichos componentes exceden el análisis de este informe y carece de sentido profundizar en ellos. Finalmente, la solución a este problema se encuentra en el control automático por sistemas 3D, por lo que a continuación se desarrollan los sistemas 3D automáticos.

6.4.2. SISTEMAS DE NIVELACIÓN 3D

En general, cuando se habla de sistemas 3D en cualquier tipo de maquinaria, se entiende como un conjunto de elementos cuyo objetivo es trasladar la posición de un receptor GNSS o un prisma de 360º (en el caso de trabajar con estación total) al implemento de la máquina en cuestión, pudiendo ser el balde de una excavadora, la regla de una pavimentadora, la cuchilla de un Bulldozer, o en este caso, el borde de la cuchilla de una motoniveladora.

A medida que la tecnología avanza, específicamente hablando de aquella aplicada a la topografía, cada vez son más las obras viales en las cuales se trabaja sobre un proyecto de diseño es decir, utilizando un MDT; dicho proyecto es la guía que tiene el equipo de topografía para llevar adelante la obra en cuestión.
En la sección anterior se menciona que al trabajar en 2D, el operador debe controlar la elevación de referencia para el implemento de la máquina. En el caso de los sistemas 3D, la máquina se encuentra posicionada dentro de un sistema de referencia, lo que permite ubicarla sobre un MDT georeferenciado.
Por lo tanto, cuando se trabaja en 3D, el sistema toma la elevación de referencia del MDT, evitando así, cualquier tipo de control manual por parte del operador en lo que respecta a

elevación y pendiente. Evidentemente, la máquina sigue siendo controlada por el operador, al igual que la rotación de la cuchilla y los otros movimientos antes desarrollados.

A continuación se desarrollan los sistemas 3D que serán materia de estudio en esta tesis. Resulta necesaria la identificación de cada uno de ellos ya que la metodología de trabajo de ambos es diferente, la descripción de los sistemas 2D antes vistos forma la base del sistema 3D single GNSS, como se describe a continuación.

6.4.2.1. Sistema 3D Single GNSS

Imagen N°25 - Motoniveladora con sistema 3D single GNSS Topcon

Los sistemas 3D single GNSS se componen, a grandes rasgos, de un receptor GNSS montado sobre un mástil en uno de los lados de la cuchilla de la motoniveladora, y el conjunto de sensores que conforman los antes mencionados sistemas 2D, un sensor de rotación y dos sensores de pendiente[3].
Se utiliza la antena receptora GNSS para determinar la posición del punto de la cuchilla sobre el que se encuentra montado, para luego, utilizando las lecturas de los sensores antes vistos, en conjunto con una serie de medidas geométricas de la máquina (*Ver Imagen N°27*), calcular la posición del otro extremo de la cuchilla. Es decir, el sistema conoce una posición y a partir de las lecturas de los sensores conoce la posición de la cuchilla relativa a la máquina, en conjunto con las dimensiones geométricas de la cuchilla, puede calcular la posición del otro extremo de la cuchilla relativo al sistema de coordenadas del proyecto.

[3] *Actualmente, la mayoría de los sistemas 3D cuentan con sensores inerciales IMU, para compensar la inclinación del mástil, pero se entrará en detalles.*

La metodología que utiliza la antena receptora para determinar la posición puede variar, en la mayoría de los casos se trabaja con posicionamiento RTK; particularmente, las empresa visitadas en las prácticas de campo trabajan utilizando una base local transmitiendo correcciones en tiempo real mediante un enlace de radio.

Visto lo desarrollado en el párrafo anterior, a priori se puede determinar que los errores asociados a los sistemas 3D están directamente relacionados a las precisiones del receptor GNSS (y al método de posicionamiento usado) para determinar la posición de uno de los bordes de la cuchilla y de la capacidad y precisión de los sensores para trasladar dicha posición al otro extremo de la cuchilla.

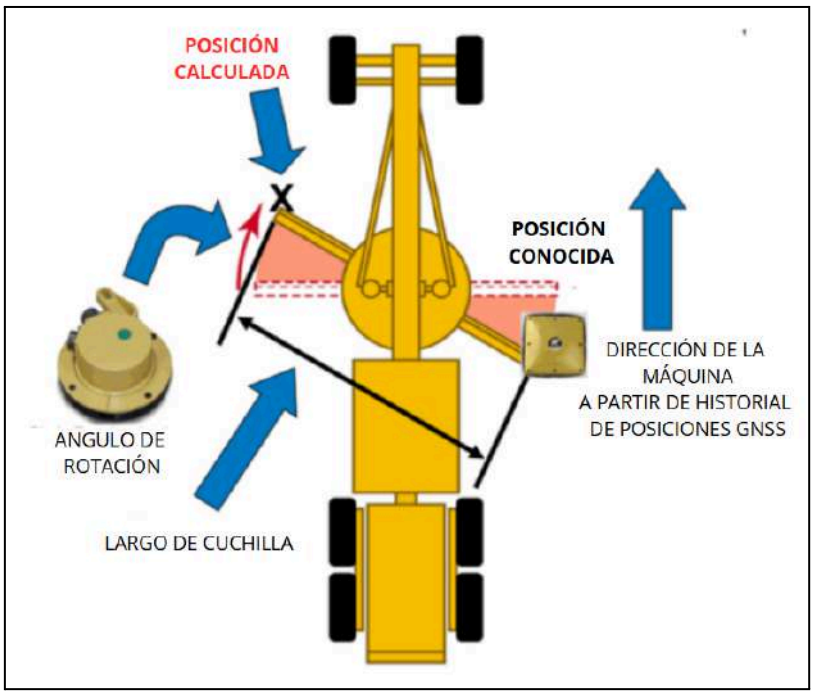

Imagen N°26 - Posición del extremo de la cuchilla sin receptor Sistema 3D single GNSS

Determinación de la posición del extremo de cuchilla sin receptor GNSS:

El sistema del esquema de la *Imagen N°26* cuenta con una única antena receptora ubicada en el lado derecho de la cuchilla, como se explicó anteriormente, el sistema utiliza las lecturas de los sensores en conjunto con una serie de medidas geométricas para calcular la posición de el borde opuesto, que se denominará “lado de la pendiente”.
Para determinar dónde se encuentra el lado de la pendiente de la hoja, el sistema necesita la siguiente información:

1. **El rumbo de la máquina, determinado por el historial de la posición del GNSS**
2. **El ángulo de rotación de la hoja que se determina mediante el sensor de rotación**
3. **La distancia entre el lado de la pendiente de la hoja y la antena GNSS (Largo de cuchilla)**

Observación: Se habla de rumbo de la máquina ya que se cuenta únicamente con un receptor GNSS que aporta una posición puntual, sin un historial de posiciones de aproximadamente 3 metros es imposible saber hacia dónde se mueve la máquina.

Imagen N°27 - Medidas introducidas en la máquina - Sistema 3D single GNSS

Con la información anterior, el sistema puede determinar la ubicación del lado de la pendiente. El procedimiento se puede desglosar de la siguiente manera:

1. Se compara la elevación del borde de corte debajo de la antena GNSS (como si fuera un bastón de topografía, utilizando las medidas representadas en la *Imagen N°27*) con la elevación del MDT, la máquina utiliza el sistema hidráulico para llevar el borde de corte hasta el proyecto.
2. Mediante la lectura del sensor de rotación de la cuchilla, el largo de la misma y el sensor de pendiente de cuchilla, el sistema puede saber en donde se encuentra el lado de la pendiente.
3. El sistema calcula las coordenadas del lado de la pendiente y utilizando el sistema hidráulico lleva dicho lado hasta el MDT. Cada vez que las lecturas del sensor de rotación y la posición del lado derecho (lado de la antena GNSS) varían, el sistema debe recalcular la posición del lado opuesto y "llevarla" a hasta el proyecto MDT. Es decir, el operador sigue teniendo libertad de movimientos, lo único controlado por el sistema automático son los gatos hidráulicos que controlan la inclinación de la cuchilla.

En la siguiente imagen se puede apreciar una captura de pantalla de un sistema 3D Single GNSS, en la misma se ven las coordenadas calculadas en ambos lados del borde de la cuchilla.

Imagen N°28 - Posiciones de los extremos de cuchilla - Sistema 3D Single GNSS

Imagen N°29 - Motoniveladora realizando un corte con Sistema 3D Single GNSS

La idea de los sistemas de nivelación 3D es simple, actualmente, en la mayoría de las obras viales el equipo de topografía trabaja a partir un MDT, principalmente realizando replanteos para chequear los trabajos realizados. Se puede pensar a los sistemas 3D como una extrapolación de esta idea a las máquinas pesadas. La idea es la misma, simplemente que el replanteo lo realiza la motoniveladora a partir del mismo MDT.

6.4.2.2. Sistema 3D Doble GNSS:

El concepto del sistema de doble antena GNSS es simple, anteriormente se analizó que parte de los errores asociados a los sistemas 3D estaban relacionados con la capacidad de los sensores de trasladar la posición de un extremo de la cuchilla a otro. Agregando una antena receptora en cada extremo de la cuchilla, se elimina la necesidad de utilizar sensores digitales para determinar la posición del otro extremo de la cuchilla.
El sistema conoce en cada momento la posición de las dos antenas receptoras, y mediante una serie de medidas geométricas, traslada dicha posición al borde de corte de la cuchilla.

Imagen N°30 - Sistema 3D Doble GNSS de Trimble

A priori, esta configuración presenta algunas diferencias respecto a la utilización de una única antena receptora GNSS. En lo que respecta a metodología de trabajo; al no contar con sensores, el sistema no debe calcular la posición de ningún extremo de la cuchilla. Una vez que se encuentra listo para operar y que se cuenta con un MDT, el sistema trabaja llevando cada borde de corte hasta la elevación de la superficie de diseño.

Una de las características principales se da en lo que respecta a la posición de la máquina, anteriormente se mencionó que los sistemas Single GNSS trabajan a partir de un historial de posiciones para determinar el rumbo y posición de la máquina.

En este caso, la posición de la cuchilla se conoce en todo momento y no se necesita del desplazamiento de la máquina[4]. Esto es especialmente útil cuando se trabaja en aplicaciones que requieren pequeños movimientos a velocidad reducida de la máquina. El conocer la posición de la cuchilla en todo momento, hace que el sistema se centre en el control de la misma, y no en conocer la posición de la cuchilla en relación a la máquina, como ocurre en los sistemas de una sola antena receptora. De esta manera, el sistema promete una mejora de precisiones respecto a los sistemas single GNSS.

Al contar con dos receptores ubicados a una distancia fija y conocida entre sí, el sistema puede definir una línea base entre ambas antenas. Esta línea, permite calcular directamente el rumbo (heading) mediante la determinación del azimut entre las posiciones de las antenas, sin necesidad de que la máquina se desplace. En cambio, en sistemas de una sola antena, el rumbo sólo puede inferirse a partir del movimiento del equipo, calculando la dirección entre posiciones sucesivas. Esto implica que, hasta que no exista un desplazamiento suficientemente significativo, no es posible estimar con precisión la orientación de la máquina en el plano horizontal.

De esta manera se introduce un concepto clave a la hora de hablar de sistemas 3D Doble GNSS; el concepto *"Heading"* se conoce como el rumbo hacia el cual está orientada la máquina, medido siempre respecto al norte geográfico. En estos sistemas, este rumbo se calcula directamente mediante la diferencia de posición que determinan cada una de las antenas GNSS (ubicadas una en cada extremo de la cuchilla), logrando así eliminar la dependencia del movimiento para determinar el sentido de avance de la máquina.

Esta diferencia, aunque puede parecer sutil, aporta una mejoría de trabajo en algunas aplicaciones específicas, en las motoniveladoras los movimientos suelen ser lentos, el conocer la posición de la máquina en todo momento se convierte en una gran herramienta. Principalmente aporta comodidad de manejo al operador, ya que la nivelación automática puede activarse en cualquier momento, sin necesidad de posicionar a la máquina con un movimiento longitudinal inicial para determinar el rumbo, habilita al operador a moverse en todos los sentidos.

Otra de las diferencias que destacan respecto a la configuración de una antena receptora es en lo que respecta a elementos de desgaste, como se analiza en el apartado "*Elementos de desgaste de la motoniveladora y su influencia en las precisiones alcanzadas"* los elementos de desgaste de la motoniveladora aportan error a la nivelación si no se toman las consideraciones adecuadas, en este caso, dichos errores se reducen en gran medida, ya que no se cuenta con sensores, los cuales puedan ver sus lecturas afectadas debido a estos elementos.

---

[4] A pesar de que excede los límites de este informe, este concepto es el mismo que se aplica a los sistemas 3D para excavadoras, las mismas suelen trabajar estáticas, de esta manera, utilizando dos antenas GNSS, se puede conocer la posición correcta de la misma sin la necesidad de movimiento.

Habiendo analizado el funcionamiento de estos sistemas y sus principales diferencias con respecto a los sistemas Single GNSS, se plantea una de las dudas que motiva a la realización de esta comparativa en particular.

Como se verá en el apartado dedicado a pre análisis de errores, si bien los sensores digitales aportan error al posicionamiento de la cuchilla en carácter de apreciación, el principal error en el caso de los sistemas de una antena GNSS está dado por las precisiones asociadas al posicionamiento GNSS, a partir de esto es surge la siguiente pregunta:

¿Es mejor trabajar con dos receptores GNSS y multiplicar así el error relacionado a esta solución, o por otro lado, se trabaja mejor con un único receptor, con sus errores asociados y sensores ultra-precisos que calculan la posición del otro extremo de la cuchilla?

Esta y otras preguntas de carácter similar serán respondidas a lo largo del desarrollo de este informe. En primera instancia no se tiene respuesta a esta pregunta y como se menciona en el apartado de pre análisis de errores, gran parte de la metodología interna que lleva a cabo cada uno de los sistemas para determinar la posición de la cuchilla y accionar el movimiento hidráulico de la misma exceden en sobremedida los límites de este informe; con este comentario se quiere dejar en claro que las hipótesis que realiza el equipo se encuentran exclusivamente ligadas a los elementos de topografía que participan en este análisis.

Habiendo analizado el funcionamiento de los dos sistemas que serán parte de este estudio, ahora se deben analizar algunos componentes de la máquina que infieren de una manera u otra en las precisiones alcanzadas con los sistemas de nivelación 3D. Indudablemente las precisiones de ambos sistemas se encuentran íntimamente relacionadas al estado de la máquina sobre la que se encuentran montados, a continuación se desarrollan los principales elementos de desgaste de las motoniveladoras y que deben ser tenidos en cuenta para desarrollar este tema.

6.4.2.3. Elementos de desgaste de la motoniveladora y su influencia en las precisiones alcanzadas

Como cualquier máquina, vehículo o herramienta de trabajo, existen elementos que sufren desgastes con el paso del tiempo y el uso, si bien los componentes de los sistemas no tienen elementos de desgaste como tal, si los tiene la motoniveladora sobre la que están montados.
Resulta fundamental, a la hora de realizar un análisis riguroso de precisiones alcanzadas, entender qué elementos deben ser tenidos en cuenta para considerar las características óptimas de trabajo y que los resultados obtenidos sean comparables. De esta manera, se confeccionó un listado de aquellos elementos que deberán ser chequeados en obra a la hora de recabar datos de campo.

Antes de seguir adelante, se debe tener en cuenta que los elementos de desgaste se analizan para motoniveladoras en general, es decir, algunos de ellos están directamente relacionados

con las lecturas de determinados sensores. Como los sistemas con dos antenas receptoras no cuentan con sensores, se podría inferir que dicho elemento de desgaste no debe ser tenido en cuenta, sin embargo, como se aclara posteriormente, es difícil determinar con exactitud con qué magnitud se ve afectada la lectura de determinado sensor debido a un desgaste en particular, lo mismo ocurre con el sistema de dos antenas receptoras. De esta manera, para que la nivelación sea correcta y para que los sistemas sean comparables, el estado de los siguientes elementos debe ser excelente.

Imagen N°31 - Elementos de desgaste

Resulta complejo asignarle una consecuencia a cada uno de los elementos de desgaste; en general se puede identificar teóricamente como alguno de ellos afectan de manera más o menos directa en las lecturas de determinados sensores de los sistemas de nivelación.
A continuación se explica la incidencia de los mismos; se debe tomar con el recaudo necesario, precisamente por esto, se buscó que estos desgastes fueran inexistentes a la hora de realizar las prácticas, como se explica más adelante.
Observación: La numeración que sigue a continuación en el listado de elementos de desgaste, se encuentra referida a la *Imagen N°31*, con excepción de los elementos N°4 y N°5, los cuales cuentan con imágenes dedicadas.

1) *Desgaste de la bola de los cilindros de los gatos hidráulicos:*
   La bola de los cilindros se encuentra en el extremo de ambos cilindros hidráulicos, que son los que controlan la elevación de la cuchilla. En el extremo de estos se cuenta con una abrazadera que cubre una "bola" de metal, con el uso prolongado, esta bola comienza a desgastarse, lo que provoca que se genere un espacio entre las paredes de la abrazadera y el borde de la bola, esto genera que, al apoyar la cuchilla sobre el

material la misma comience a hacer fuerza una vez que la bola toca el borde de la abrazadera, provocando un error en las elevaciones del sistema 3D.
Este desgaste (como todos los que se verán a continuación), se puede visualizar a la hora de apoyar la cuchilla sobre el suelo, cuando la máquina hace fuerza sobre el piso, se pueden apreciar ciertos "juegos" en las piezas mencionadas.

2) *Desgaste de los bronces:*
Los bronces son las correderas por donde se desliza la cuchilla, estos deben ser ajustados periódicamente y posteriormente cambiados.
Genera un efecto similar al anterior. Al irse desgastando provoca que la cuchilla tenga un movimiento vertical irregular no deseado al apoyarse sobre el material, de esta manera, las lecturas del sensor de pendiente no se corresponden con la realidad, provocando así un error.

3) *Desgaste en los insertos de la mesa:*
Los insertos de la mesa son elementos plásticos que se desgastan con el uso de la máquina, al irse desgastando provocan que al realizar fuerza con la cuchilla contra el material, tenga un movimiento vertical no deseado, afectando de manera directa la elevación y la pendiente percibida por el sistema de nivelación 3D.

4) *Desgaste de la cuchilla:*
En general, la "hoja" de la motoniveladora está conformada por dos partes, la "pantalla" y la cuchilla, que es específicamente el elemento de corte y el cual se desgasta. En la siguiente imagen, la cuchilla está enmarcada por un rectángulo rojo:

Imagen N°32 - Desgaste de la cuchilla

Este desgaste en general suele ser mayor de un lado que de otro de la cuchilla, debido a la costumbre del operador, de utilizar un lado más que el otro, pero al igual que el resto de errores, este no cumple una regla estricta mediante la cual se pueda modelar el error de manera representativa, es por ello que la cuchilla debe cambiarse una vez que se encuentra desgastada, y en caso de no hacerlo, comprender que las precisiones asociadas al sistema de nivelación 3D no serán las mejores.
Como se ve en la siguiente imagen, existe un desgaste irregular en la cuchilla de la motoniveladora, esto genera que las lecturas del sensor de pendiente no sean coherentes con la realidad, por otra parte, como ya fue mencionado la posición de la antena receptora GNSS se traslada hasta el borde de la cuchilla, por lo que en este caso las lecturas estarían referidas a un punto inexistente de esta. Lo mismo sucede en el caso de los sistemas con dos antenas receptoras, las posiciones del borde de corte no serán las reales.
Se reitera que existen maneras de corregir estas diferencias para que las lecturas se ajusten a la realidad, de todas maneras, es un elemento a chequear ya que puede afectar los resultados obtenidos.

Imagen N°33 - Cuchilla desgastada en motoniveladora John Deere

Las motoniveladoras juegan un papel muy importante en las obras más allá de la nivelación mediante sistemas 3D, en general estas máquinas llevan al límite los elementos de desgaste siendo utilizadas para todo tipo de actividades en obra, por lo que los sistemas 3D deben adaptarse circunstancialmente a estos cambios.
De esta manera, si el desgaste de cuchilla es uniforme, puede modelarse, a partir de parámetros dentro de la configuración del software del sistema en sí.
Sin embargo, la solución esperada y recomendada es la de cambiar por completo este elemento de desgaste, y al momento de realizar las prácticas de campo el equipo buscó que la máquina tenga cuchillas nuevas o con poco desgaste.

5) *Chequeo de movimientos en el perno de suspensión:*
El perno de suspensión permite la oscilación del eje delantero de la motoniveladora, en situaciones de trabajo habitual suele desgastarse, una rotura como la que se ve en la imagen adjunta provocaría que las lecturas de los sensores no sean representativas, especialmente aquellas relacionadas a la pendiente longitudinal de la máquina.

Imagen N°34 - Situación ideal y errónea del perno de suspensión

6.4.2.3.1. Calibración - Sistemas 3D single GNSS

Dentro del círculo conceptual de los sistemas de control de maquinaria, la calibración de los sistemas es un tema habitual, cualquier Ingeniero Agrimensor que trabaje o haya trabajado con estos sistemas tendrá que estar instruido en el procedimiento de calibración de los sistemas. Tal como se mencionó en el apartado anterior, existen procedimientos rutinarios para corregir los errores asociados a los desgastes de la máquina. Estos procedimientos son los conocidos como "calibración de los sensores". Por lo general forma parte de la rutina de la obra, y cualquier profesional de la topografía deberá solicitar que el sistema se encuentre correctamente calibrado antes de comenzar a nivelar una cancha.
Cómo se desarrolla en el apartado anterior, los sistemas 3D de doble antena GNSS no cuentan con sensores como tal, de tal manera, la calibración en este caso está asociada exclusivamente a los sistemas 3D single GNSS.
Si bien los elementos del sistema no requieren un mantenimiento como tal, los implementos de la máquina sufren un desgaste progresivo, para contrarrestar los "juegos" de las piezas por desgaste, los sistemas deben calibrarse.
La calibración es un procedimiento general en las diferentes marcas, en definitiva lo que se logra con esto es "alterar" las lecturas de los sensores para que puedan corresponder a los elementos desgastados.

El procedimiento básicamente consiste en indicarle lecturas correctas a los sensores:

- Centrar la cuchilla utilizando una cinta métrica para medir la misma distancia desde sus extremos a un punto fijo, e indicarle al sensor de rotación que la rotación es nula
- Horizontalizar la cuchilla utilizando un nivel óptico e indicarle al sensor de pendiente que la pendiente debe ser nula en esa posición.
- Medir la pendiente en el terreno utilizando un nivel óptico o Estación Total e indicarle al sensor de pendiente longitudinal de la máquina (Mainfall) el valor obtenido.

En general existe la posibilidad de realizar la calibración de estos sensores prescindiendo de un equipo de topografía, ya sea este un nivel o una estación total, siguiendo una serie de pasos que el operador de la máquina puede realizar por sí solo. Cada marca tendrá un procedimiento preestablecido por lo que no se profundiza en este tema.

7.CONSIDERACIONES DE LAS PRÁCTICAS DE CAMPO

A continuación se definen las prácticas realizadas, así como algunos conceptos e ideas previamente definidas por el equipo a efectos de obtener resultados comparables en las prácticas. Debe ser tenido en cuenta que los sistemas de nivelación se encontraban realizando trabajos en algunas obras viales del país. Es decir, el equipo tuvo que solicitar permiso a las diferentes empresas para realizar una visita activa a la obra y poder tener contacto con la maquinaria, con el equipo de topografía y con los proyectos en desarrollo.

Esta aclaración se hace a efectos de destacar que si bien las condiciones ideales fueron predefinidas para la obtención de resultados comparables, al encontrarse estas máquinas trabajando, las situaciones puntuales de cada obra fueron condicionantes para las prácticas.

El equipo no tiene autoridad de cambiar la operación de trabajo de un día de la máquina, no se tuvo libertad de elegir las diferentes máquinas buscando aquellas que se encontraban en mejor estado y tampoco se tuvo libertad para alterar las configuraciones de los sistemas de nivelación para testear diferentes resultados.
Por lo tanto el equipo tuvo que adaptarse a la situación de cada obra e intentando avanzar en cada situación de la manera más similar a lo planeado posible.

7.1. PREANÁLISIS DE ERRORES Y ELECCIÓN DEL INSTRUMENTAL DE TRABAJO

Es necesario definir tolerancias a la hora de determinar las precisiones asociadas a cualquier tipo de trabajo. Si no se cuenta con un valor de comparación no es posible determinar datos “outliers”, asimismo, es necesario un valor de referencia para afirmar si los resultados obtenidos se encuentran dentro de los parámetros establecidos.

En este caso, se realizan dos preanálisis de errores, en uno de ellos se determinan las precisiones asociadas al instrumental de topografía que utilizará el equipo para realizar el control, con el objetivo de asegurar que el instrumental de trabajo es suficientemente preciso para llevar a cabo la práctica.
Por ejemplo, no tiene sentido utilizar un instrumento que determina la altura de un punto con una precisión de 1.0 cm si las tolerancias del proyecto son de 0.01 cm. Se estaría muy por encima de las tolerancias, reflejando que el instrumental a utilizar no es apto. Para llegar a una conclusión, primero se debe contar con las precisiones esperadas de los respectivos sistemas de nivelación 3D.

De esta manera, se realiza un preanálisis de errores dedicado a los sistemas de nivelación en estudio, tomando una serie de recaudos. Se analizan los errores asociados al sistema de posicionamiento de cada sistema, sin entrar en detalle de los aspectos hidráulico-mecánicos.

Es decir, forman parte de este preanalisis, los elementos de cada sistema para los que el equipo cuenta con el conocimiento para modelar los errores; estos son: sensores digitales y elementos de topografía (antenas GNSS con posicionamiento RTK, en este caso)

De esta manera, se busca obtener un valor de tolerancia con dos propósitos, determinar si las precisiones esperadas del sistema de nivelación cumple con los requerimientos de cada una de las obras (tolerancias establecidas por la Dirección Nacional de Vialidad del MTOP) y a su vez, poder definir si el instrumental de control utilizado por el equipo es el adecuado dadas las circunstancias.

7.1.1. PREANÁLISIS DE ERRORES DEL INSTRUMENTAL DE TOPOGRAFÍA:

El equipo selecciona un instrumental que, en primera instancia, cumple con las precisiones necesarias. No obstante, se procede a realizar el preanálisis de errores para verificar dicha hipótesis.
En una situación ideal, se debe definir la varianza de cada observación, así como las covarianzas entre observaciones, estas representan la correlación entre los errores de diferentes mediciones.
Esto es especialmente importante para el caso de observaciones realizadas desde una misma estación bajo condiciones similares, como es el caso de esta práctica.

Sin embargo, en la práctica, y para este caso en particular, se opta por avanzar con una simplificación habitual: se asume que las covarianzas son iguales a cero. Esto implica que los errores de las observaciones son independientes, lo cual permite avanzar con el preanálisis siguiendo un modelo razonablemente válido, sin comprometer los resultados.

Habiendo tenido en cuenta esta consideración, se avanza con el preanalisis del instrumental a utilizar durante el desarrollo de las prácticas.

7.1.1.1. Estación Total Trimble S5 de 2”:

Como se explica en apartados siguientes, para el estudio de alturas se trabajó a partir de un relevamiento con estación total, el equipo seleccionado para realizar esta práctica es una Estación total de 2” de precisión de la marca Trimble.
Se calcula el error en la obtención de coordenadas (X,Y,Z) a partir de las precisiones en medición de ángulo y distancia dadas por el fabricante (*Ver hoja de datos del instrumento adjunta al Anexo)*

Precisión angular: ±2″ (segundos de arco).
Precisión de distancia (EDM): Con prisma: ± (1 mm + 2 ppm)

Para este estudio se supuso una distancia al observador (prisma) de 100 m, si bien esto excede las previstas en la práctica, es necesario considerar situaciones límites para asegurar que se trabaja dentro de la tolerancia con cierto margen de error.
Se calcula el error en planimetría para la determinación de las coordenadas X e Y utilizando el error en distancia y el error asociado a la medición de ángulos del instrumento, por otra parte, el error en la determinación de la coordenada Z estará asociado al error en la medición de la distancia y al error en medición del ángulo vertical, siendo este máximo cuando el ángulo vertical es de 90º.

El error en distancia (ed), será: 1mm + 2ppm x D siendo D la distancia, utilizando una distancia de 100 metros, resulta un error en distancia de 1.2mm.

El error angular (ea) será: D * tan(2'') arrojando un resultado de 0.97mm.

El error asociado en planimetría XY: $Error\ XY = \sqrt{(ed)^2 + (ea)^2}$ por ende
error XY= 1.54mm

Error asociado a la determinación de la posición XY = 1.54 mm

Error en la determinación de la coordenada Z:
Si bien existen criterios de topografía que establecen que el error asociado a la determinación de la coordenada Z se puede aproximar como 1.2 veces el error en planimetría, el equipo decidió remitirse a resultados técnicos dados por manual.
La coordenada Z se calcula como Z=S·sin(α), siendo S la distancia inclinada y α el ángulo vertical. Luego, el error asociado a la coordenada será

$$\boldsymbol{\sigma}Z\sqrt{\left(\frac{\delta Z}{\delta S} * \boldsymbol{\sigma}S\right)^2 + \left(\frac{\delta Z}{\delta \alpha} * \boldsymbol{\sigma}\alpha\right)^2}$$

siendo δS y $\delta\alpha$ las derivadas parciales con respecto a ambas variables.

$$\frac{\delta Z}{\delta S} = seno(\alpha)$$

$$\frac{\delta Z}{\delta \alpha} = S * cos(\alpha)$$

Luego: $\boldsymbol{\sigma}Z = \sqrt{(seno(\alpha) * \boldsymbol{\sigma}S)^2 + (S * cos(\alpha) * \boldsymbol{\sigma}\alpha)^2}$

Considerando el error máximo cuando la lectura del ángulo vertical es máximo, cuando α=45º, pero a efectos de este análisis no tiene sentido considerarlas como tal, en obras y particularmente en el trabajo que se realizará, las lecturas tienden a ser aproximadamente horizontales, de esta manera:

$$\alpha=90^\circ \Rightarrow \sin(\alpha)=1,\ \cos(\alpha)=0$$

Suponiendo:

- Distancia S=100 m
- Error de distancia $\boldsymbol{\sigma}$S=1.2 mm
- Error angular vertical $\boldsymbol{\sigma}$α=2"

Error asociado a la determinación de la posición Z = 1.20 mm

7.1.1.2. Nivel Digital - Leica Sprinter 50:

El error de lectura se obtuvo del manual y es de 0.6mm.
Sabiendo que el desnivel es Dh= La - Lf, siendo:
"La" lectura atrás y "Lf" lectura adelante.

Por ende el error es $\boldsymbol{\sigma}$Dh=$\sqrt{(\boldsymbol{\sigma}La)^2 + (\boldsymbol{\sigma}Lf)^2}$

Finalmente, el error asociado es de 0.85mm

A partir de este valor, se define una tolerancia de 1.00 mm para todas las actividades realizadas con el respectivo nivel.

7.1.2 PREANÁLISIS DE ERRORES DE LOS SISTEMAS DE NIVELACIÓN 3D

A continuación, se reafirma la observación antes mencionada, los errores aquí estudiados están asociados a dos componentes, la apreciación de los sensores digitales del sistema 2D en el Sistema 3D single GNSS (el sistema de doble antena no cuenta con sensores digitales) y los errores asociados al posicionamiento RTK de los receptores GNSS de cada uno de los sistemas estudiados.
De esta manera y a modo de resumen se identifican los errores que se analizaran en cada uno de los sistemas:

1) Sistema 3D Single GNSS:
   1) Error asociado a la traslación de posición por sensores (Sistema 2D)
   2) Error asociado al cálculo de la posición de la cuchilla por posicionamiento RTK
2) Sistema 3D Doble GNSS:
   1) Doble error asociado al cálculo de la posición de la cuchilla por posicionamiento RTK
   2) No cuenta con sensores.

7.1.2.1. Sistema de Nivelación 2D:

Como se mencionó anteriormente, los sistemas 2D utilizan una relación analítica entre las lecturas de los diferentes sensores para determinar la lectura del sensor de pendiente de

cuchilla y así realizar una pendiente en sentido transversal a la máquina determinada por el usuario. Recordando lo visto en el "Cálculo de la pendiente transversal con los sistemas 2D":

Inclinación de la hoja = (SX x Cos Rot) + (MF x Sen Rot)

Siendo:

1) Inclinación de la hoja: Pendiente deseada (dada por el usuario)
2) SX: Lectura del sensor de pendiente transversal
3) Rot: Lectura del sensor de rotación
4) MF: Lectura del sensor de pendiente longitudinal

Operando con las derivadas parciales de cada una de las variables participantes, el error asociado a la pendiente es:

$$\boldsymbol{\sigma} Inc^2 = \left(\frac{\delta Inc}{\delta SX} * \boldsymbol{\sigma} SX\right)^2 + \left(\frac{\delta Inc}{\delta Rot} * \boldsymbol{\sigma} Rot\right)^2 + \left(\frac{\delta Inc}{\delta MF} * \boldsymbol{\sigma} MF\right)^2$$

Siendo las derivadas parciales:

$$\frac{\delta Inc}{\delta SX} = cos(Rot)$$

$$\frac{\delta Inc}{\delta Rot} = MF * cos(Rot) - Sx * seno(Rot)$$

$$\frac{\delta Inc}{\delta MF} = Seno(Rot)$$

Tomando los valores referenciales vistos en el ejemplo del apartado específico a sistemas 2D, se tiene que:

- Rot = 22º = 0.384 rad.
- MF = 6% (Porcentaje de pendiente) que equivale a un ángulo 0.060 rad.
- SX = 1.95% que equivale a un ángulo de 0.019 rad.

La apreciación de los sensores se obtiene de los respectivos manuales adjuntos al anexo.

- $\boldsymbol{\sigma} SX$ = 0.025% (porcentaje de pendiente) que equivale a un ángulo 0.00025 rad.
- $\boldsymbol{\sigma} MF$ = 0.025% (porcentaje de pendiente) que equivale a un ángulo 0.00025 rad.
- $\boldsymbol{\sigma} Rot$ = 0.5° = 0.00873 rad.

Sustituyendo los valores se obtiene que:

$$\boldsymbol{\sigma} Inc = 0.0005\, rad$$

Lo que representa un valor en porcentaje de pendiente de:

$$\boldsymbol{\sigma} Inc = 0.049\%$$

De esta manera, este valor representa el error asociado al sistema 2D exclusivamente, si la precisión de corte del sistema 2D dependiera exclusivamente de la apreciación de los

sensores digitales. El resultado se expresa en radianes y en pendiente, ya que es de esta última manera como el mismo resulta más representativo, a efectos de la aplicación que realiza. Es más simple interpretar un error de 0.049% al realizar un corte de una cancha con un 2.0% de pendiente transversal, que su correspondiente en radianes.
A continuación se desarrolla el error asociado al posicionamiento, para el caso de uno y dos receptores GNSS.

7.1.2.2. Posicionamiento RTK de receptor GNSS:

En los manuales o hoja técnica de datos de cualquier receptor GNSS para topografía, se pueden encontrar las precisiones asociadas al posicionamiento RTK, para este caso se toma el valor dado por los manuales del receptor de la marca Trimble orientado a motoniveladoras, y el mismo se generaliza para el sistema de uno y dos receptores. Como se ve a continuación, solo se tiene en cuenta el error asociado al cálculo de la posición vertical, que es el de interés para esta sección[5].

$$\boldsymbol{\sigma}\text{RTK Vertical} = 15\text{mm} + 0.5\ \text{ppm}^{6}$$

Considerando una base RTK transmitiendo por radio interna a una distancia de 1000 m (1,000,000 mm), esto representa un error de 1.55 cm.

$$\boldsymbol{\sigma}\text{RTK Vertical} = 1.55\ \text{cm}$$

7.1.2.3. Error esperado sistema 3D Single GNSS

Como se explica anteriormente, los errores que participan en este caso corresponden a los dados por los sensores del sistema 2D y el llamado $\boldsymbol{\sigma}$RTK Vertical.
De esta manera, considerando una cuchilla de motoniveladora de largo estándar de 4.267 m, podemos pensar el error máximo vertical como aquel en el extremo de la cuchilla sin antena receptora, es decir, el extremo para el cual el sistema 3D calcula la posición a partir de las lecturas de los sensores, ya que el mismo se encuentra influenciado tanto por los errores de posicionamiento GNSS, como por el cálculo de posición realizada a partir de las lecturas de los sensores.
De la sección anterior se tiene que el error asociado a la determinación de la pendiente transversal expresado en porcentaje de pendiente es $\boldsymbol{\sigma} Inc = 0.049\%$ **,** esto corresponde a un error en altura de $\boldsymbol{\sigma} h = 0.209\ cm$

---

[5] Al finalizar las prácticas de campo, serán consideradas exclusivamente las elevaciones de los puntos relevados, es por este motivo, por el cual no tiene sentido profundizar en las precisiones de las coordenadas planas (X e Y).
[6] Valores obtenidos del material adjunto al anexo "Hoja de datos del Trimble MS995 GNSS Smart Antenna".

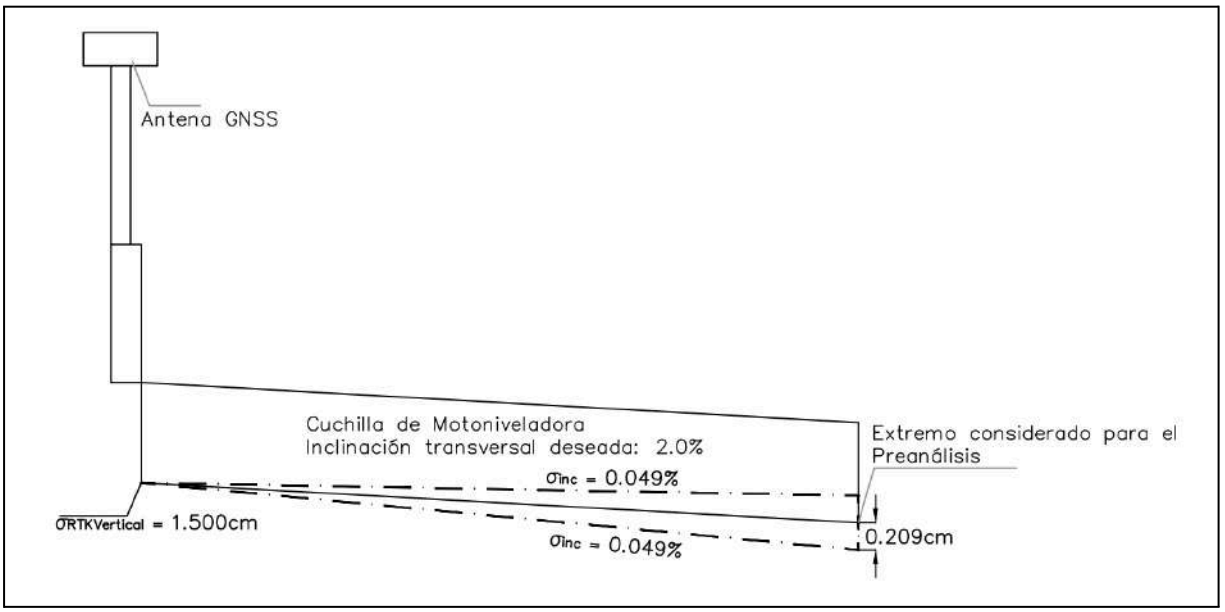

Imagen N°35 - Croquis esquemático del preanálisis

Finalmente:

$$\boldsymbol{\sigma}3DSingleGNSS^2 = \boldsymbol{\sigma}Inc\ (cm)^2 + \boldsymbol{\sigma}RTK\ Vertical(cm)^2$$

$$\boldsymbol{\sigma}3DSingleGNSS^2 = 0.209^{\ 2} + 1.550^{\ 2}$$

σ3D Single GNSS = 1.564 cm

Es decir que, si se consideran las condiciones ideales, en las que no existe error por parte del sistema hidráulico, elementos de desgaste, etc. El error asociado a la determinación de la altura en el extremo de la cuchilla es de 1.564 cm.

7.1.2.4. Error esperado sistema 3D Doble GNSS

Se considera independiente el error asociado a cada receptor GNSS ya que trabajan de manera independiente, por lo que no tendría sentido operar realizando una suma cuadrática como en el caso anterior. De esta manera, considerando las mismas condiciones que en el apartado anterior, con una base RTK transmitiendo a 1000 m de distancia, se tiene que:

σ3D Doble GNSS = 1.550 cm

Resulta importante aclarar que este valor corresponde a una desviación estándar, lo que implica que se está trabajando con un intervalo de confianza del 68%. En caso de que se requiera una mayor certeza a nivel estadístico, como un 95% de confianza, las incertidumbres reales serían mayores, ya que, para alcanzar este valor de intervalo, se debe multiplicar este valor por un factor aproximado de 2.

En una distribución normal:

- 68.27% de los valores caen dentro de $\pm 1\sigma$ (una desviación estándar)
- 95.45% dentro de $\pm 2\sigma$

Se realiza esta aclaración ya que, decir que el sistema tiene un error de 1.550 cm sin aclarar que corresponde a un intervalo de confianza del 68% puede dar una falsa sensación de precisión.
Notar que este aspecto es aplicable para el desarrollo del sistema anteriormente presentado, en ambos casos se trabaja con desviaciones estándar y, por lo tanto, este aspecto debe ser tenido en cuenta.

Por otra parte, el sistema doble antena GNSS promete trabajar mejor que los sistemas de una antena, este aspecto se relaciona con diferentes características desarrolladas en el apartado específico de su funcionamiento. Entonces, la similitud con las precisiones previstas por el preanalisis con el sistema de una antena GNSS se pueden deber a dos factores principales:

1) Las precisiones dadas por el fabricante para el posicionamiento RTK son mejores que las presentadas en la hoja técnica del equipo.
2) El sistema trabaja mejor que lo que se puede analizar en este preanálisis, como se desarrolla en el apartado dedicado al funcionamiento del sistema de doble antena GNSS, el mismo cuenta con características que, a priori, mejoran las precisiones del trabajo. Este tipo de características son difíciles de modelar, por lo que las precisiones reales se analizarán a la hora de realizar las prácticas de campo.

A continuación se adjunta un cuadro comparativo, a efectos de poder visualizar de forma clara los errores esperados que se obtienen a partir de los respectivos preanalisis:

Sistema	σh (cm)	σInc (% de pendiente)	σ Sistema 3D (cm)
Single GNSS	0.209	0.049	1.564
Doble GNSS	1.550	*No corresponde*	1.550

Imagen N°36 - Resultados del preanalisis

En el siguiente párrafo se presentan cuales son las tolerancias establecidas oficialmente para las obras que se visitan, las cuales deben ser respetadas por las empresas que trabajan con sistemas de nivelación 3D.

7.1.2.5. Tolerancias de obra

Es importante conocer de antemano las tolerancias establecidas en manera oficial por la Dirección Nacional de Vialidad (dependencia del Ministerio de Transporte y Obras Públicas - MTOP). Estos valores, en conjunto a lo antes desarrollado en el preanálisis de errores,

permiten determinar a priori, si los sistemas 3D logran alcanzar las precisiones necesarias para el trabajo.

Las tolerancias se establecen en el *documento oficial llamado* "***Pliego de Condiciones para la construcción de puentes y carreteras"***.

Para el control de espesores en la última capa de base de material granular para vías de comunicación de orden principal en el Uruguay, se determina que:

F-4-3-1-3:*"Terminada la última capa de base, cada espesor acumulado promedio determinado en la forma establecida en el artículo F4-3-1-1, no podrá diferir en defecto, en más de un (1) centímetro del espesor establecido en el proyecto y/o fijado por la Inspección."*

Estas tolerancias serán fundamentales a tener en cuenta debido al objetivo de realizar el control en estas situaciones de trabajo, es decir corroborar las precisiones alcanzadas por los sistemas 3D que están en estudio en este informe.
Nuevamente se remarca la correcta elección del instrumental a utilizar para las tareas de control por parte del equipo debido a que se cuenta con precisiones mayores a las tolerancias establecidas.

Se establece entonces una tolerancia de 1.0 cm en altura, la relación entre este valor y los valores a los que se llega en el preanalisis de errores para los sistemas se menciona en el apartado de conclusiones del preanálisis

7.1.2.6. Conclusiones del Preanálisis:

El preanálisis realizado arroja una serie de conclusiones, referentes a tres campos principales:

1) Uno de los principales objetivos de realizar un preanálisis de errores consiste en determinar si el instrumental de topografía con el que se desea trabajar es correcto, o por otra parte, seleccionar el instrumental adecuado.
Se puede concluir que el instrumental a utilizar es técnicamente adecuado y cuenta con las características para realizar un correcto control del trabajo.
Se menciona nuevamente la elección del instrumental optado por el equipo:

- Estación Total Trimble S5 de 2", otorgada por el Instituto de Agrimensura
- Nivel Digital - Leica Sprinter 50, otorgado por el Instituto de Agrimensura
- Receptores GNSS, otorgado por las diferentes empresas constructoras a las cuales se visite.

2) En la sección anterior se menciona que las tolerancias establecidas por la Dirección Nacional de Vialidad son de ±1.0 cm en altura. Este valor debe interpretarse como una

tolerancia de ±3σ, es decir que, para alcanzar las precisiones necesarias con una confianza de 99.7%, es necesario que los equipos a utilizar (En este caso los sistemas de nivelación 3D) tengan una desviación estándar menor a 0.333 cm considerando, es decir, equipos que me garanticen 1.000 cm / 3

Por preanalisis se tiene que:
$\boldsymbol{\sigma}$3D Single GNSS = 1.564 cm
$\boldsymbol{\sigma}$3D Doble GNSS = 1.550 cm
Tolerancia (±3σ) = 1.000 cm - Lo que implica σmáximo admisible = 0.333 cm

Este resultado podría inducir a pensar que los sistemas de nivelación no cumplen con las precisiones mínimas para trabajar en este tipo de obras, con respecto a esto se profundiza en dos conceptos:

1) Se debe recordar que para la realización del preanalisis se tiene en cuenta una simplificación en el funcionamiento de los sistemas, a efectos de poder modelar los errores de manera manejable. Tal como se indica desde el inicio, se decide analizar exclusivamente los errores asociados a los elementos "modelables" (elementos de posicionamiento y sensores digitales), sin profundizar en la lógica interna de funcionamiento de los algoritmos de control de maquinaria, ya que excede los límites de este trabajo.
2) El sistema de dual GNSS promete mejores precisiones que las brindadas por la hoja de datos de las antenas GNSS, se debe recordar que, los valores expresados en la hoja técnica están destinados a las antenas GNSS y no al sistema en su conjunto. Las diferentes características desarrolladas en el apartado de funcionamiento del sistema dual GNSS no son posibles de modelar en este preanálisis, y sin embargo prometen mejorar las precisiones del sistema.
3) Una tercera posibilidad corresponde a los valores dados por la ficha técnica de los receptores, existe la posibilidad de que estos valores hayan sido exagerados por los fabricantes, subestimando así las precisiones reales de los equipos.

Es por esto que, más allá de este análisis preliminar, en las prácticas de campo se determinará qué tipo de trabajo están realizando los sistemas, para qué tipo de obra están siendo utilizados, y cómo se gestionan estas tolerancias en la realidad operativa de las obras.

7.2. CONSIDERACIONES PREVIAS

Previo a avanzar con el desarrollo de las prácticas de campo en sí, se desarrollaron una serie de aspectos en lo relacionado al preanálisis de errores, donde se justifica la elección del instrumental y otros aspectos importantes. Existen una serie de conceptos y consideraciones rigurosamente establecidas por el equipo que deben ser introducidas.
Inicialmente, se analizan algunos aspectos relativos al estado de las motoniveladoras sobre las que se encuentran los respectivos sistemas en cada una de las obras.

7.2.1. CONDICIONES DE LA MOTONIVELADORA

Como se menciona en reiteradas ocasiones a lo largo de este informe, existen una serie de elementos de desgaste en las motoniveladoras, los cuales pueden afectar el funcionamiento de los sistemas de nivelación automática. Técnicamente hablando, para realizar un estudio, lo ideal es testear ambos sistemas en una misma motoniveladora nueva, pero esto es imposible dados los recursos que conlleva dicha operación.
De esta manera, para que los resultados obtenidos en ambas motoniveladoras sean comparables se mencionan los elementos que serán chequeados antes de comenzar a trabajar en campo.
Los elementos de desgaste a chequear son los analizados en el apartado *6.4.2.3 "Elementos de desgaste de la motoniveladora y su influencia en las precisiones alcanzadas" del Marco Teórico:*

1. Desgaste de la bola de los cilindros de los gatos hidráulicos
2. Desgaste de los bronces
3. Desgaste en los insertos de la mesa
4. Desgaste de la cuchilla
5. Chequeo de movimientos en el perno de suspensión

Las condiciones en las que se encuentran las dos motoniveladoras participantes de este análisis en relación a los cinco elementos antes mencionados se desarrollan en el apartado específico de cada una de las prácticas.

De la misma manera en que se analizan las condiciones de la maquinaria, otro punto a tener en cuenta es que las condiciones de trabajo en lo que respecta al posicionamiento GNSS deben ser ideales y comparables entre ambos equipos, para esto se establecen algunos puntos a tener en cuenta previo al inicio de las prácticas.

7.2.2. CONDICIONES IDEALES - GNSS:

Es evidente que el equipo no cuenta con los recursos ni la autoridad para realizar un seguimiento cercano de toda la operación en lo que respecta a trabajos realizados con receptores GNSS en cada una de las obras, sin embargo, si se puede realizar un paneo general de las metodologías seguidas por el equipo de topografía de obra. Destacando elementos como la distancia de trabajo a la base, la cobertura por árboles o líneas de alta tensión, utilización de bípodes para el relevamiento de puntos de control, calidad del marco de referencia, etc.
De esta manera, se destacan algunos elementos principales:

- Correcta visibilidad y recepción de los satélites, crucial que exista una clara visual entre los receptores GNSS y al menos cuatro satélites para obtener una posición precisa, ya que se evitan posibles interferencias y obstáculos que pueden generar errores en la señal como lo es el error de multicamino.
- Clima adecuado, la presencia de condiciones climáticas anormales como tormentas solares pueden interferir la señal de los satélites. Asimismo, se evita trabajar sobre las horas del mediodía, para evitar problemas similares.
- Distancia entre base y receptor GNSS no mayor a 10 km.

Al igual que se menciona en el apartado 7.2.1 de esta sección, los elementos que aquí se destacan son analizados para cada una de las visitas a obra en sus respectivos apartados.

Continuando con los elementos a ser definidos previos a las respectivas visitas de obra, se debe poner especial énfasis en lo que respecta a los sistemas de referencia utilizados en cada uno de los proyectos a visitar. En definitiva, esto cobra especial interés debido a que los relevamientos realizados por el equipo deberán encontrarse dentro del mismo sistema de referencia para ser comparables. Dentro de este punto, surgen algunos otros elementos, como la determinación del factor de escala y la adquisición de los archivos de proyecto georeferenciados de las empresas constructoras en cuestión.

7.2.3. SISTEMA DE REFERENCIA DE CADA PROYECTO

Es fundamental, antes de cada visita de obra, conocer el sistema de referencia utilizado en los proyectos que se van a inspeccionar. Se debe contar con el Modelo Digital georreferenciado correspondiente y con el sistema de referencia altimétrico que se emplea.

En los proyectos que se visitan, ambas empresas constructoras trabajan con una proyección UTM zona 21 SUR con Datum WGS84.

En cuanto al sistema de referencia altimétrico, en ambos casos se usaron alturas derivadas de un modelo geoidal, aunque no son alturas ortométricas. Es decir, son modelos que se generan

a partir de un relevamiento referenciado al modelo geoidal EGM2008[7], al cual se le aplican variaciones constantes en altura. Estas magnitudes serán presentadas en los datos correspondientes a cada uno de los proyectos comparados.

A continuación se incorpora un concepto clave en la búsqueda de obtener resultados comparables de dos obras separadas. Se establece una "Cancha Tipo", el objetivo de realizar esta definición, es que la misma se encuentre definida antes de realizar las visitas a obra, y que las extensiones analizadas por el equipo coincidan con los parámetros predefinidos.

7.2.4. CANCHA "TIPO" IDEAL

A efectos de que los resultados obtenidos entre los diferentes ambientes de trabajo sean comparables, se determina una zona de trabajo regular, a la que llamaremos "cancha tipo".
Esta fue determinada según las condiciones mínimas accesibles en cada obra, buscando que los resultados obtenidos puedan formar parte de una muestra representativa.
Se establece un tramo recto de 100 metros de longitud.

El ancho de la zona se define por el tramo abarcado por 2 pasadas de cuchilla, lo que aproximadamente se puede entender como un ancho de 5m

Observación: Si bien se define una cancha tipo ideal, el equipo tiene en cuenta que existe la posibilidad de no poder avanzar de tal manera a la hora de visitar cada obra, por ende tampoco se define a esta condición como totalmente indispensable para la práctica por situación ajenas al equipo. Y como se verá posteriormente, efectivamente, dichas condiciones ideales no se alcanzaron en campo.

En el siguiente párrafo se desarrolla de manera general, cómo se llevan a cabo las prácticas de campo, sin entrar en detalle de cada una de ellas y de sus particularidades. Se hace especial énfasis en cómo se procede y en qué datos se recaban

7.2.5. METODOLOGÍA DE CAMPO A SEGUIR

La actividad de campo, a grandes rasgos, se conforma de dos actividades principales, la evaluación de las pendientes transversales en una cancha y la evaluación altimétrica que se realiza en comparación al MDT del proyecto de la zona.
En este apartado se define de manera precisa cómo se avanzará en cada una de las dos actividades principales.

[7] *EGM2008 (Earth Gravitational Model 2008) es un modelo geopotencial global. Se utiliza para convertir alturas elipsoidales obtenidas por GNSS en alturas ortométricas. Existen multitud de modelos diferentes, pero este es el más utilizado en Uruguay.*

7.2.5.1. Trisección y Factor de Escala

Antes de desarrollar las dos etapas principales de la metodología de trabajo, un punto importante recae sobre el procedimiento de Trisección. En ambas actividades, se trabaja con estación total, debido a esto se debe establecer en primera instancia como se trabaja con la misma. Inicialmente, para replantear el eje del proyecto y posteriormente para relevar puntos en el mismo sistema de referencia del proyecto (MDT), en ambos casos se debe utilizar un método para "meterse" dentro del sistema de referencia adoptado por el equipo de topografía de la obra.
A priori, los puntos de coordenadas conocidas utilizados para la trisección y/o estación libre, serán materializados con receptores GNSS de topografía.
Estacionarse utilizando trisección sobre puntos colocados mediante receptores GNSS puede generar problemas si no se tienen los recaudos necesarios. En los dos frentes de obra que se visitan, se trabaja con una proyección UTM 21 SUR, por ende es necesario conocer las coordenadas geodésicas de un punto cercano a la zona de trabajo para determinar el factor de escala a ingresar en la estación total y trabajar de manera correcta.
Repasando lo desarrollado en al apartado *6.2 "PROYECCIONES CARTOGRÁFICAS" del Marco Teórico*, debemos conocer:

- Latitud y longitud de un punto cercano de la zona de trabajo.
- Meridiano de referencia de la proyección, en este caso $\lambda = 57°00' 00"$.
- Parámetros del elipsoide de la proyección, en este caso WGS84.

De esta manera, previo a visitar la obra, se le solicita al equipo de topografía de la empresa en cuestión que coloque puntos de control estratégicamente localizados y comparta las coordenadas, a efectos de ser utilizados para la trisección.

7.2.5.2. Estudio de Pendientes Transversales

En la confección de calles y caminos, las motoniveladoras suelen trabajar buscando determinadas pendientes transversales al eje de la vía de circulación, particularmente, cuando se generan los MDT, que posteriormente son introducidos en los sistemas 3D de las motoniveladoras, se proyectan pendientes transversales al eje del proyecto. Es así que, en las prácticas de campo se busca determinar las pendientes transversales al eje de proyecto previamente materializado por el equipo.

Para determinar el eje del proyecto se trabaja con estación total, los datos para replantear puntos del eje son dados por el equipo de topografía de cada empresa constructora.
Una vez que se tiene el eje materializado con varillas, se lleva adelante el siguiente procedimiento:

- Una vez que el eje se encuentra materializado, se trazan perpendiculares equiespaciadas al mismo, utilizando el método de 3,4,5[8].
- Con el Nivel digital se realizan 3 lecturas por perfil, una en el eje y dos equiespaciadas a ambos lados del mismo.
- Los perfiles se realizan cada 5 m, buscando cubrir la totalidad de la "cancha tipo"
- Se trabaja con un equipo de tres personas, un mirero, un operador de nivel y un ayudante para marcar los perfiles transversales mediante la utilización del 3,4,5 con cinta métrica.

A continuación se esquematiza la situación antes explicada, el método se repite para cada uno de los perfiles.

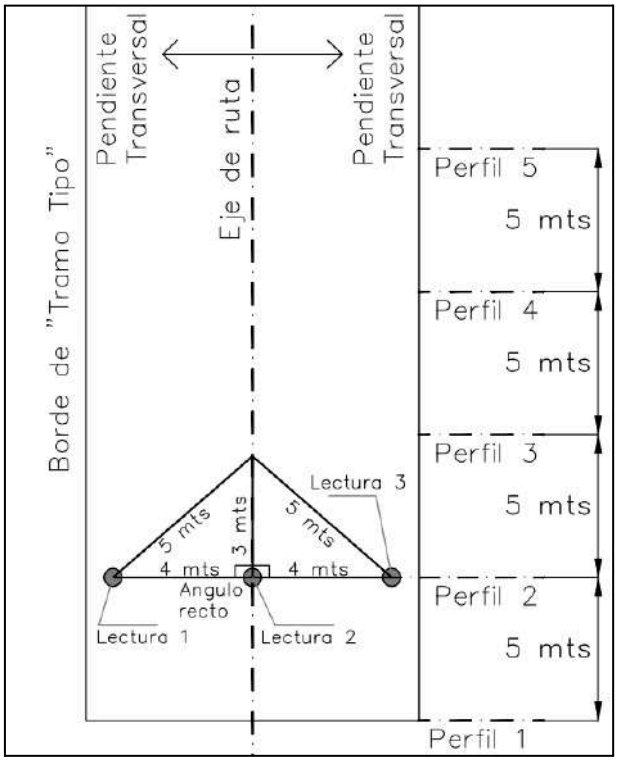

Imagen Nº37 - Esquematización método 3,4,5

Se sigue el método de doble plano colimador, es decir, cada vez que se realiza un perfil de lecturas, se rompe estación, se vuelve a estacionar y las lecturas se toman nuevamente sobre las mismas miras. Para materializar los 3 puntos sobre las perpendiculares al eje (eje, y a ambos lados) se utilizan tres galápagos, de esta manera, una vez que se rompe la estación, se pueden repetir las lecturas.

[8] El método 3,4,5 es muy utilizado en el rubro de la construcción, el mismo consiste en trazar un triángulo rectángulo, con lados de 3 m, 4 m y 5 m (o proporcionales), utilizando una cinta métrica. De esta manera, ambos catetos, en este caso uno de ellos colocado sobre el eje previamente materializado, forman 90º.

7.2.5.3. Evaluación altimétrica con Estación Total

Para trabajar con estación libre, como se menciona anteriormente, se realiza una trisección utilizando puntos colocados por el equipo de topografía de la empresa.
La actividad consiste en realizar un relevamiento de perfiles a lo largo de la "cancha tipo" en estudio.

- *Se estaciona la Estación Total, a no más de 50 m, cubriendo la totalidad de la "zona tipo" definida anteriormente.*
- *Realizar un relevamiento de perfiles cada 5 metros en sentido longitudinal para comparar las elevaciones reales con las elevaciones de diseño.*
- *Se relevan 5 puntos por perfil: Borde de zona tipo y eje de calzada, y un punto perteneciente a la cancha a cada lado del eje, intermedio entre el borde de zona tipo y el eje.*

Se toman dos puntos arbitrarios intermedios a cada lado del eje a efectos de poder conocer el estado de la cancha terminada con mayor certeza. El tomar solamente 3 puntos (Los dos bordes y el eje) puede ocultar errores de diseño intermedios.
Habiendo finalizado el apartado dedicado a estudiar las consideraciones y elementos que se deben tener en cuenta antes de avanzar, en el siguiente párrafo se desarrollan las prácticas de campo realizadas por el equipo.

8.PRÁCTICAS DE CAMPO:

Las prácticas de campo se subdividen en tres grandes apartados, los dos primeros dedicados a cada uno de los sistemas en estudio, desarrollando la respectiva actividad de campo y actividad de gabinete para cada uno de ellos, en conjunto con un apartado dedicado al análisis de resultados obtenidos en cada práctica, en el que se visualizan de manera clara los resultados más importantes obtenidos previo a profundizar sobre el significado de los mismos en el apartado de conclusiones.

8.1. SISTEMA 3D SINGLE GNSS:

El día 10 de diciembre de 2024, se realiza la primera visita de obra para realizar las actividades correspondientes asociadas al sistema 3D single GNSS. La práctica se lleva a cabo en el marco de la construcción de la doble vía de hormigón de la Ruta Nacional Nº5, en el departamento de Florida, en la intersección de la Ruta Nº5 y el Camino Alfredo Brescia, a 2km de la ciudad de Florida.

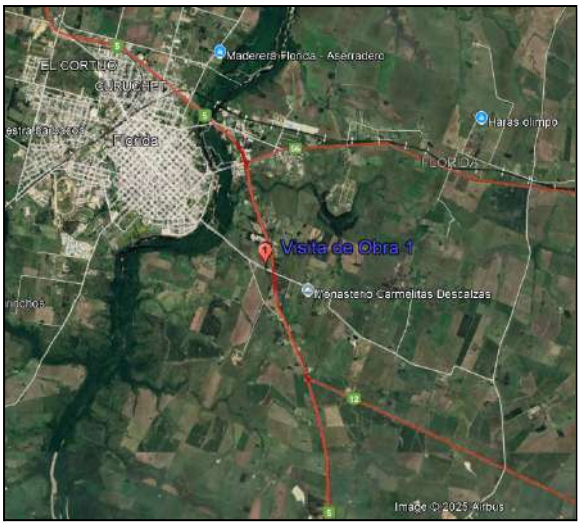

Imagen N°38 y Nº39 - Croquis de Ubicación 1 y 1.1 - Práctica 1

Al momento de introducir las prácticas de campo se establecieron una serie de consideraciones previas, concretamente en el apartado *7.2 "Consideraciones Previas"* dentro de las Consideraciones de las Prácticas de Campo. Dichas consideraciones son analizadas para cada una de las prácticas, a efectos de mantener un orden y principalmente para obtener resultados comparables.

8.1.1. CONSIDERACIONES PREVIAS - SISTEMA SINGLE GNSS

8.1.1.1. Respecto a la “Cancha Tipo”

Inicialmente se coordinó con la empresa constructora en cuestión para trabajar y controlar un segmento recto de la ruta, esto no fue posible en esta práctica debido a diversas circunstancias ajenas al control del grupo. La práctica se lleva a cabo en un ramal de salida de una rotonda (*ver croquis de ubicación, Imágenes Nº38 y Nº39*).

En las rotondas se realizan transiciones de pendientes diferentes a las de un tramo recto, en general son situaciones complejas que llevan al límite el trabajo del proyectista y de los sistemas 3D. Comparar el resultado de una rotonda con el de un tramo recto pierde sentido.

Frente a esta situación, el equipo trabaja en una zona lo más alejada posible de la intersección entre el ramal y la rotonda, con el fin de evitar errores derivados de posibles cambios en las pendientes transversales, habituales en este tipo de intersecciones. Es decir, se intenta respetar, en la mayor medida posible, el “tramo tipo” preestablecido.

En un principio, se había considerado un tramo de 100 metros, pero ante la imposibilidad de trabajar en una longitud mayor (debido a las circunstancias antes mencionadas), el equipo optó por relevar información a ambos lados del eje del ramal materializado, considerando un tramo de 50 metros. Es decir, se trabaja sobre un tramo “doble”, el cual, a efectos del análisis se considera como dos subtramos de 50 m, uno con pendiente transversal en un sentido y el otro (al otro lado del eje) con pendiente transversal opuesta. Esta decisión se toma a efectos de que los resultados sean comparables con los obtenidos en la otra práctica y buscando coherencia con lo establecido en las consideraciones previas.

En relación al ancho del tramo tipo, inicialmente se prevé trabajar en un ancho de 5m, en este caso, dadas las circunstancias, el ancho máximo en el que se puede trabajar a cada lado del eje es de 3m en sentido transversal al eje.

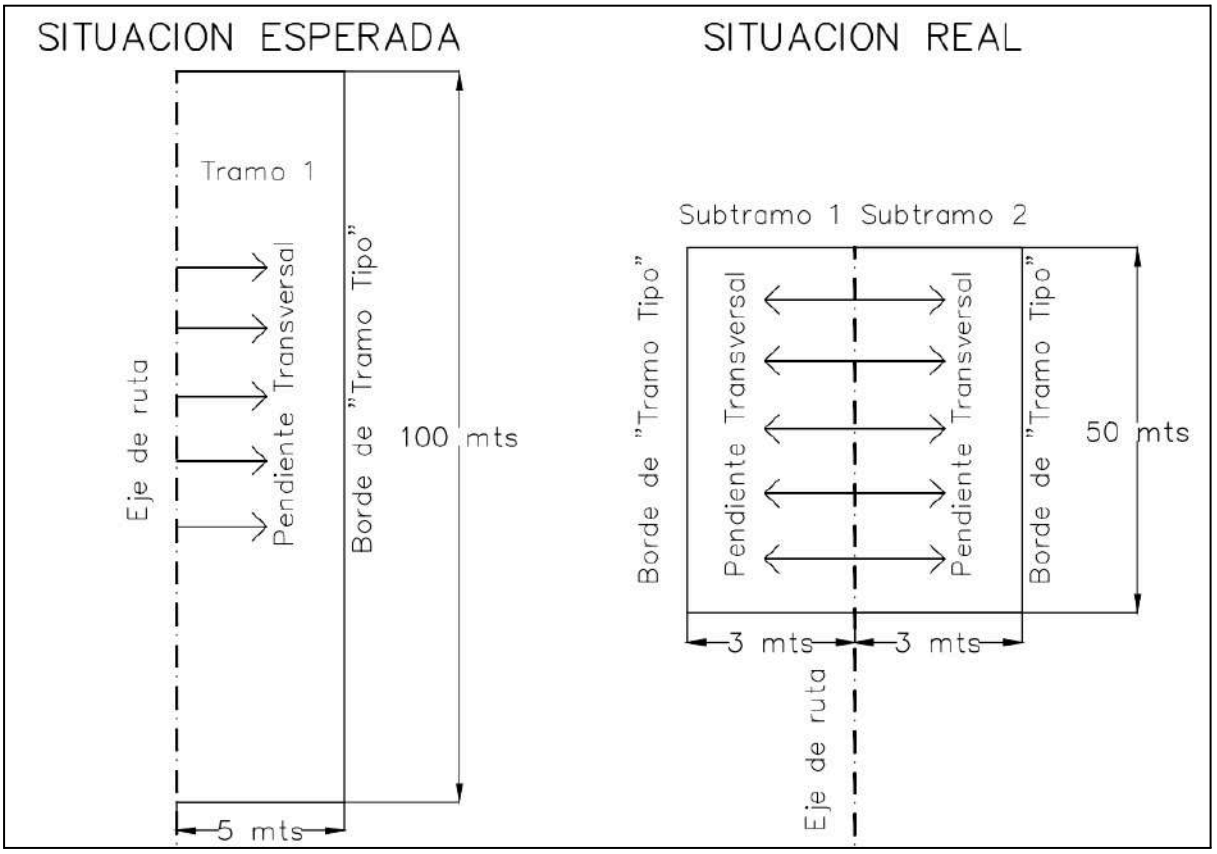

Imagen Nº40 - Situación "Tramo tipo" - Práctica 3D single GNSS

Dicho esto, se procede con los siguientes puntos de las consideraciones previas.

8.1.1.2. Características del tramo:

- Longitud del tramo: Tramo doble de 50 m. Mediciones realizadas a ambos lados.
- Pendiente longitudinal: 6%.
- Ancho del tramo: 3m a cada lado.
- Curvatura del tramo: Tramo con un radio aproximado de 300 m.

8.1.1.3. Características de los elementos GNSS:

- Distancia a la base GNSS: Aproximadamente 800 m.
- Condiciones climáticas: Aproximadamente 26°C.
- Condiciones de la zona de trabajo: La zona contaba con buena "visibilidad de cielo" y poca cobertura de árboles directamente sobre la base GNSS y los receptores (Móvil GNSS y antena receptora de la motoniveladora)
- Condiciones GNSS: Buena cobertura satelital (*Ver Figura Nº - Cobertura satelital del sistema 3D single GPS)*

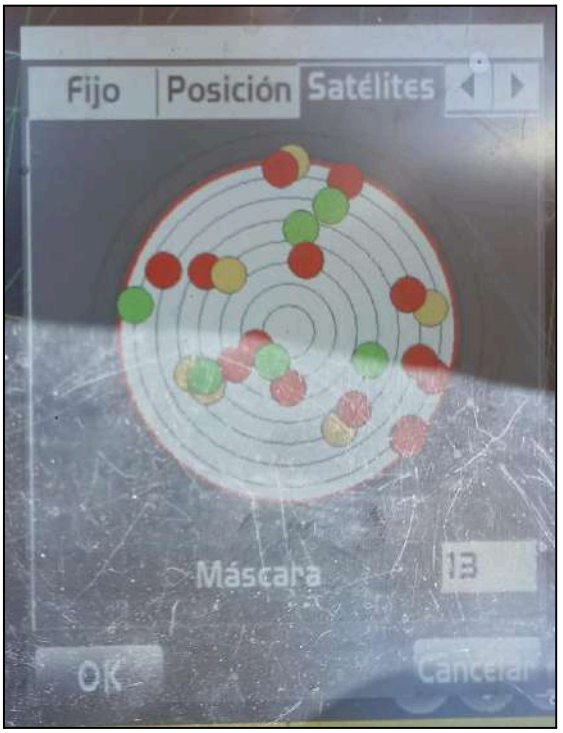

Imagen N°41 - Cobertura satelital del sistema 3D Single GNSS.

Color Rojo: Satélites GPS
Color Verde: Satélites GLONASS
Color Amarillo: Satélites BeiDou

8.1.1.4. Sistema de referencia del proyecto:

- Datum Geodésico: WGS84
- Proyección Cartográfica: Universal Transversa Mercator - Zona 21S
- Elipsoide de Referencia: Elipsoide de GRS80 (WGS84)
- Sistema de referencia altimétrico: Como se analizó anteriormente, las alturas del proyecto son derivaciones de alturas ortométricas. Es decir se tomó como base un proyecto con alturas ortométricas referidas al EGM 2008 y se le aplicó una variación a efectos de trabajar en un sistema local. La magnitud de dicha variación es de 13.50 metros, que es aproximadamente la ondulación geoidal N de la zona. Debido a esto, las alturas relevadas en campo son "similares" a las alturas elipsoidales.
- Sistema de Coordenadas: Sistema de coordenadas planas (E,N,h)

8.1.1.5. Tolerancias establecidas para el proyecto:

Como se mencionó anteriormente, las tolerancias establecidas para este proyecto se definen en el *"Pliego de condiciones para la construcción de puentes y carreteras"* de la Dirección Nacional de Vialidad del M.T.O.P.

Sin embargo, el equipo visitó la obra en una etapa previa a la final, es decir, donde las tolerancias fueron definidas internamente por la empresa.
De esta manera, se trabaja con este tipo de sistemas hasta cierto punto de la obra "aproximando" así el proyecto, para finalmente, finalizar el trabajo con sistemas más precisos que no viene al caso mencionar.
En este caso, por tratarse de vías de acceso auxiliar para la ruta en una etapa intermedia, se establecen tolerancias especiales para el tramo.

- Tolerancia vertical establecida por la empresa: ± 2.0 cm del espesor establecido por proyecto.
  Es decir, todos aquellos puntos que difieran en 2.0 cm de la cota establecida por proyecto serán considerados como defectuosos.
  Esta magnitud se traduce en que todo el instrumental que se utilice para trabaja bajo estas tolerancias, debe contar con una precisión de al menos $\boldsymbol{\sigma} = \frac{Tolerancia}{3}$, en otras palabras, los instrumentos de trabajo deben contar con una precisión de 0.666 cm.
  Visto esto, se analizan tanto los instrumentos de topografía a utilizar por el equipo (estación total y nivel de topografía), como los sistemas de nivelación, es decir, se deben comparar las tolerancias del proyecto con las precisiones previstas para los equipos en los diferentes preanalisis de errores.

Con respecto al pre análisis de errores:

- Instrumental de topografía: Establecidas las tolerancias del proyecto, se debe analizar si el instrumental a utilizar para el control del proyecto (Estación total y nivel) cumple con los requerimientos para obtener resultados dentro de las tolerancias.

  Como se explicó anteriormente, en el apartado 7.1.1, el error asociado a la determinación de la posición Z con la estación total seleccionada es de 1.20 mm o 0.120 cm, por lo que la estación total cuenta con las precisiones suficientes, en relación a los 0.666 cm antes mencionados.
  También se debe estudiar la relación de las precisiones previstas del instrumental de topografía en relación a las precisiones del sistema de nivelación, es decir, se debe determinar si el instrumental de topografía es suficientemente preciso como para llevar a cabo el control del sistema de nivelación.
  Según lo visto en el apartado 7.1.2 "*Preanálisis de errores de los sistemas de nivelación 3D"* el error en altura para el sistema 3D single GNSS es:
  σ3D Single GNSS = 1.564 cm
  Siguiendo el razonamiento anterior, para realizar el control de este tipo de sistemas se necesita un equipo que trabaje con precisiones de $\boldsymbol{\sigma} = \frac{\sigma 3D\ Single\ GNSS}{3} = 0.521cm$

Nuevamente, la estación total seleccionada cuenta con las precisiones suficientes para realizar el control del equipo.

8.1.1.6. Estado de la Motoniveladora - Elementos de desgaste

Para esta práctica práctica se trabaja con una motoniveladora John Deere 620 G del año 2024.

Imagen N°42 - Motoniveladora John Deere con sistema 3D Single GNSS.

Como se mencionó anteriormente, uno de los puntos más importantes a la hora de trabajar con sistemas de control de maquinaria, es controlar los elementos de desgaste, ya que estos inciden directamente en los resultados obtenidos, por lo que se buscó realizar la práctica con una máquina en las mejores condiciones posibles.

Los elementos de desgaste chequeados son los que se mencionan en el *apartado 7.2.1 de la sección 7 de "Consideraciones de las prácticas de campo"* y los cuales son presentados en las siguientes imágenes. No se profundiza en este aspecto, ya que la particularidad de cada elemento ha sido detallada previamente en su apartado dedicado.

Imagen N°43 - Desgaste de los bronces - Práctica 1

Imagen N°44 - Desgaste en el tornillo del círculo - Práctica 1

Imagen N°45 - Desgaste en los soportes de la mesa - Práctica 1

Imagen N°46 - Desgaste de la bola de los cilindros - Práctica 1

Imagen N°47 - Desgaste de la cuchilla - Práctica 1

Si bien resulta difícil de identificar el estado de los elementos en una fotografía, se muestran a efectos de plasmar en imágenes los elementos chequeados en campo.
Se concluye que los elementos de desgaste se encuentran en buenas condiciones, lo que permite proceder de manera segura con la máquina seleccionada.

8.1.2. ACTIVIDAD DE CAMPO

Luego de realizar el control correspondiente al estado de la motoniveladora y las condiciones de la base GNSS colocada e iniciada por el equipo de topografía de la empresa constructora, se comenzó con la actividad.

La motoniveladora realizó el trabajo en la cancha en modo automático 3D, la metodología de trabajo con sistemas 3D consiste en realizar varias pasadas cortando pequeñas capas de superficies hasta llegar a la cota del proyecto.
En general todos los sistemas 3D cuentan con la posibilidad de realizar cambios de elevación a la superficie de diseño (un desfase de superficie), pudiendo aumentar o disminuir la elevación de referencia al diseño existente.

Por ejemplo, planteado el caso extremo en que se tiene la superficie de diseño de una carretera cargado en la controladora, pero actualmente el terreno se encuentra 50.0 cm por encima del proyecto de diseño, en tal caso, no se podrá remover la totalidad del material con el sistema automático esperando que la superficie quede nivelada con la primera pasada de la motoniveladora. De esta manera, el procedimiento consiste en realizar diversas pasadas, modificando ese desfase en altura de la superficie mencionada, se trabaja "cortando capas".

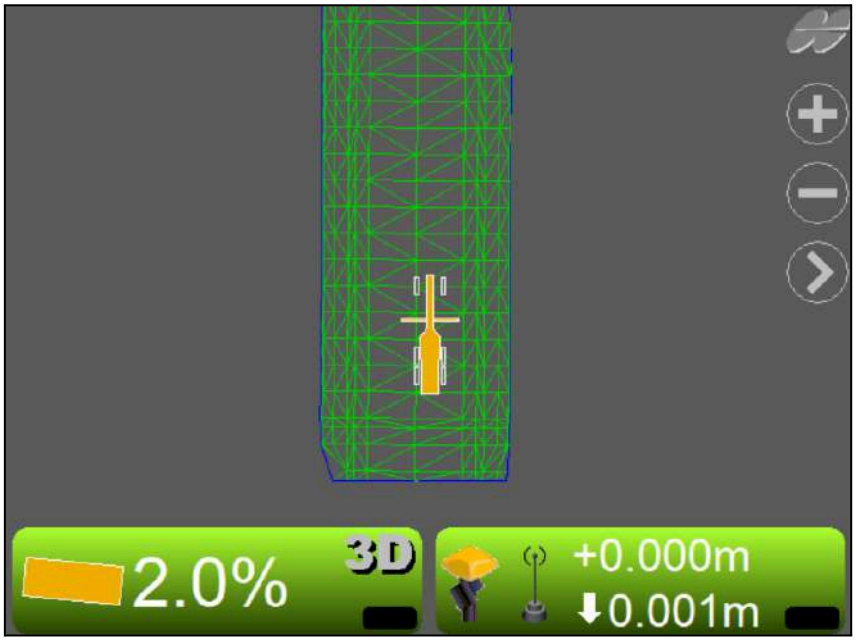

Imagen N°48 - Visualización de la pantalla del sistema de nivelación en la motoniveladora - Práctica 1.

El trabajo en campo consta de dos partes principales, en una primera etapa, se realiza el chequeo de pendientes transversales mediante nivel digital. En una segunda instancia, se lleva a cabo un relevamiento planialtimétrico mediante el uso de una estación total.
Cómo se desarrolla anteriormente, la estación total participa de ambas actividades, por lo que resulta prioritario mencionar todo lo respectivo a la determinación del factor de escala k y el procedimiento realizado para llevar a cabo la trisección.

La trisección se realiza mediante tres puntos (mojones de hierro) colocados por el equipo de topografía de la empresa, estos puntos no se encontraban previamente colocados, sino que

fueron colocados en el momento. Los puntos se relevan mediante receptores GNSS, trabajando con RTK, conectados a la misma base con la que trabaja el sistema de motoniveladora, a unos 800 m de la misma, cada punto se ocupó por 30 minutos.
La ubicación de los puntos no es arbitraria, sino que se busca establecer una geometría adecuada buscando obtener buenos resultados en la trisección; los detalles de los puntos utilizados para llevar a cabo la trisección, así como la geometría de los elementos se pueden visualizar en el croquis de la *Imagen N°50*.

Trisección y Factor de escala:
En este caso, el proyecto seguido por la empresa en cuestión cuenta con una proyección UTM 21 SUR, por ende es necesario conocer las coordenadas geodésicas de un punto cercano a la zona de trabajo para determinar el factor de escala a ingresar en la estación total y trabajar de manera correcta.

Conociendo:
- la latitud y longitud de un punto cercano de la zona de trabajo
- el meridiano de referencia de la proyección, en este caso λ= 57°00’ 00”
- parámetros del elipsoide de la proyección, en esta caso WGS84

Los cálculos correspondientes son presentados en el apartado 6.2.1.2 “Factor de escala K” del Marco teórico.
Finalmente:

K=0.999672

Este factor k es ingresado en la estación total previo al uso de la misma. Visto esto, los resultados obtenidos de la trisección fueron los siguientes:

E (mts)	N (mts)	h (mts)
574525.079	6224686.095	62.746
σE	σN	σh
0.014	0.013	0.001

Imagen N°49 - Coordenadas y desviaciones asociadas a la trisección - Práctica 1.

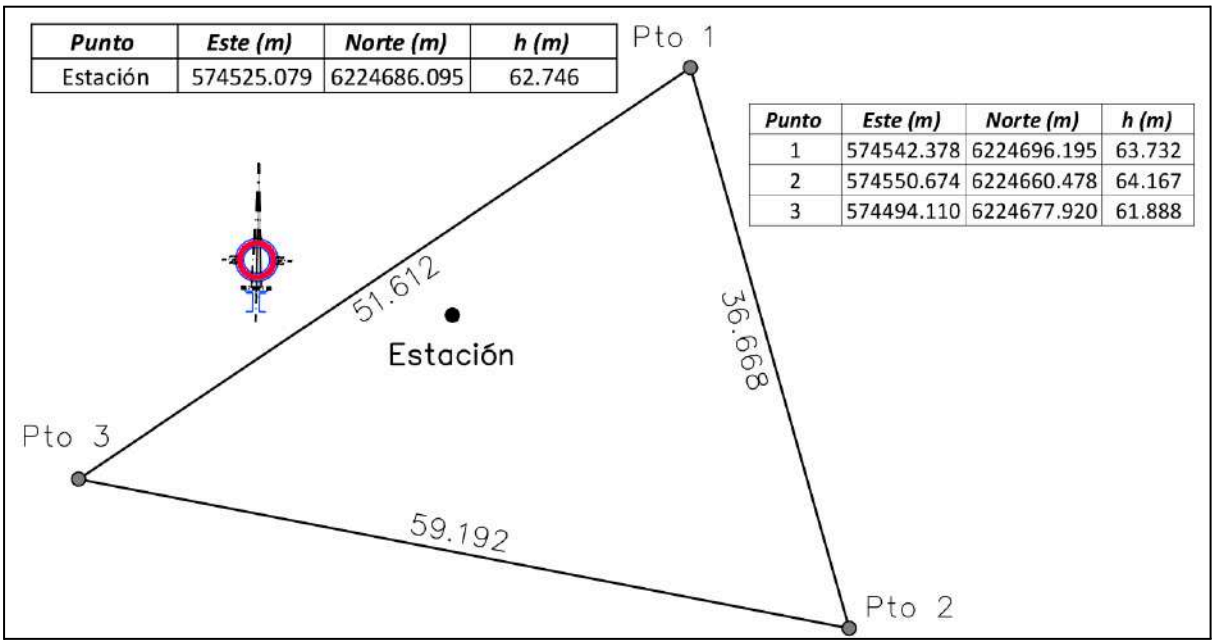

Imagen N°50 - Trisección - Práctica 1.

Posteriormente, se procede a materializar el eje del proyecto, el mismo sirve de herramienta para llevar a cabo las tareas siguientes, para ello, se utiliza la herramienta de replanteo de polilíneas de la estación total. El equipo de topografía de la empresa dispone de el MDT del proyecto y el eje del mismo.
Para la materialización del eje se utilizan varillas de hierro de $\phi 12$[9] equiespaciadas longitudinalmente sobre el eje de la cancha (*Ver Imagen N°51)*.
Explicado esto, se procede a desarrollar las dos actividades realizadas:

8.1.2.1. Análisis de pendiente transversal con nivel digital

A partir del eje previamente materializado por el equipo, se miden las pendientes transversales al eje del proyecto. Para determinar la dirección transversal al eje se utilizó el método 3,4,5.
De esta manera, se lleva a cabo una nivelación de doble plano colimador, como fue previsto, realizando lecturas sobre el eje, las cuales se corresponden con *"lectura atrás"* en la planilla de datos, y lecturas a 3.0 m medidos sobre la transversal al eje, representadas por *"lectura adelante"* en la planilla de datos. Para la medición de estas distancias sobre cada una de las perpendiculares al eje, se usa cinta métrica.

[9] *Una varilla de $\phi 12$ hace referencia a una varilla corrugada de 12 mm comúnmente utilizada en el rubro de la construcción.*

En total se toman 12 lecturas, 6 pares de lecturas correspondientes a cada uno de los lados del eje, de las cuales, luego de un proceso de depuración especificado en la sección “depuración de la muestra”, se mantienen 10; 5 a cada lado del eje.

Para esta práctica, se trabaja con una planilla de nivelación, la misma se presenta en el Anexo.

Una vez finalizada la actividad con nivel, se procede a la utilización de la estación total para el relevamiento planialtimétrico, para ello se utiliza el instrumento previamente estacionado.

Imagen N°51 - Método 3,4,5 plasmado en campo - Práctica 1

8.1.2.2. Relevamiento Planialtimétrico con Estación Total.

Para la actividad con estación total se utiliza el mismo punto de estacionamiento determinado por trisección en la actividad anterior.

Se realiza un relevamiento de perfiles, con puntos equiespaciados. En este caso, la zona de relevamiento excede el borde previamente definido para el estudio de pendientes transversales, con el objetivo de contar con redundancia de datos.
En total se relevan 61 puntos, 5 puntos por perfil, con un total de 12 perfiles de relevamiento con una separación de 4 metros entre ellos.

La elección de tomar 5 puntos por perfil y no 3 puntos (uno en el eje y dos a ambos lados) como sería habitual, recae sobre la necesidad del equipo de estudiar el estado de la cancha nivelada, más allá del estudio de las elevaciones en el eje y en los bordes, se busca contar con insumos para analizar la relación entre el proyecto y lo nivelado por la máquina en la zona intermedia de la carretera. Posteriormente, se busca generar un MDT a partir de los datos de relevamiento a efectos de realizar una comparación entre el proyecto otorgado por la empresa y el relevamiento de campo. Más allá de la comparación "Punto a punto", contar con puntos intermedios puede adicionar datos interesantes a la muestra y evitar simplificaciones por triangulación.

Otro aspecto a mencionar, recae sobre la depuración de datos. Como se ve más adelante, para esta actividad no se sigue ningún procedimiento de depuración, sin embargo, se toma cierto recaudo a la hora de realizar el relevamiento de campo.
El equipo dispone de el MDT en formato ".XML" otorgado por la empresa, este archivo se introduce en la estación total. Este instrumento cuenta con una función de replanteo de modelos digitales de terreno, de esta manera, a la hora de llevar adelante el relevamiento, este se hace realizando un replanteo de MDT en simultáneo, lo que permite visualizar la diferencia de alturas entre el punto que se está relevando y su homólogo en la superficie de diseño, pudiendo así detectar errores en tiempo real a partir de diferencias excesivas. Se lleva adelante este procedimiento para detectar posibles errores, como por ejemplo, colocar el prisma sobre una roca o sobre un hueco, evitando así errores de campo.

A diferencia del procedimiento seguido con el nivel, es claro que en este caso las diferencias no dependen exclusivamente de las precisiones del instrumento, sino que dependen de la similitud del terreno relevado con el modelo proyectado, por lo que no tiene sentido establecer una tolerancia numérica.

8.1.3. ACTIVIDAD DE GABINETE

A continuación se desarrolla el procedimiento de manejo de los datos obtenidos en la primera actividad de campo. A efectos de mantener un orden en los razonamientos, se subdivide este procedimiento en dos grandes grupos, cada uno de ellos correspondientes a cada una de las actividades previamente realizadas.

8.1.3.1. Análisis de Pendientes Transversales

Para el estudio de pendientes transversales se utilizan los datos recabados con nivel de topografía.
La *Imagen Nº52* de este apartado corresponde a una "digitalización" de la planilla de nivelación utilizada en la actividad.
Antes de poder avanzar con cualquier tipo de análisis en relación a los datos obtenidos en campo, se debe seguir un procedimiento de depuración de los mismos. En la planilla antes mencionada se pueden identificar que ciertos valores están destacados con color rojo, estos fueron depurados de la muestra. El procedimiento seguido para llevar adelante la depuración de la muestra se encuentra detallado a continuación:
Depuración de la muestra - Práctica 1:

El proceso de depuración para los datos tomados con nivel digital se lleva adelante a partir del valor de tolerancia determinado en el apartado *7.1.1.2 del apartado "Consideraciones de las prácticas de campo"* en el cual se estableció una tolerancia de 1.00 mm para todas las actividades realizadas con nivel digital. Es decir, todas las diferencias menores o iguales a 1.00 mm se consideran correctas.

Como se menciona anteriormente, a la hora de determinar la metodología de trabajo, se trabaja con el método de doble plano colimador a efectos de contar con datos de comparación para poder tomar una decisión al momento de avanzar con la depuración de la muestra.

Es decir, se realiza un primer par de lecturas, se rompe estación y se realiza un segundo par de lecturas correspondientes a *"Plano Colimador 2"*, con cada par de lecturas se calcula el desnivel como:

$$Desnivel\ (m)\ =\ Lecturas\ atrás\ -\ Lectura\ adelante$$

luego, si la diferencia de desniveles calculada como:

$$\boldsymbol{\Delta} desnivel\ =\ Desnivel\ Plano\ Colimador\ 1\ -\ Desnivel\ Plano\ Colimador\ 2$$

Si es menor o igual a 1.00 mm se considera correcta, de otra manera, los dos pares de lecturas se depuran de la muestra y no son considerados para el análisis.

A continuación, en la *Imagen Nº52,* se muestran las lecturas correspondientes a ambos planos colimadores. Se pintan de color rojo aquellas que fueron las depuradas de la muestra siguiendo el protocolo anterior. Como se puede apreciar, las diferencias de desnivel de las referencias 7 y 12 superan con creces la tolerancia de 1.00 mm.

$$\boldsymbol{\Delta} desnivel\ 7\ = 0.017\ \text{m} = 17\ \text{mm}$$

$$\Delta desnivel\ 12 \ = 0.025 \text{ m} = 25\text{mm}$$

	PLANO COLIMADOR 1			PLANO COLIMADOR 2			ΔDesnivel (m)
Referencia	Lectura atras	Lectura adelante	Desnivel (m)	Lectura atras	Lectura adelante	Desnivel (m)	
1	0.146	0.214	-0.068	1.031	1.099	-0.068	0.000
2	1.388	1.448	-0.060	1.532	1.592	-0.060	0.000
3	1.800	1.856	-0.056	2.037	2.094	-0.057	0.001
4	1.997	2.063	-0.066	1.981	2.047	-0.066	0.000
5	2.171	2.235	-0.064	1.875	1.939	-0.064	0.000
6	2.366	2.433	-0.067	2.301	2.367	-0.066	-0.001
7	1.185	1.226	-0.041	1.031	1.089	-0.058	**0.017**
8	1.385	1.449	-0.064	1.532	1.597	-0.065	0.001
9	1.800	1.867	-0.067	2.037	2.104	-0.067	0.000
10	1.996	2.054	-0.058	1.981	2.040	-0.059	0.001
11	2.172	2.226	-0.054	1.875	1.929	-0.054	0.000
12	2.364	2.402	-0.038	2.301	2.364	-0.063	**0.025**

Imagen N°52 - Depuración de la muestra - Práctica 1

Finalmente, la planilla utilizada para el análisis de datos corresponde a la identificada como "PLANO COLIMADOR 1", la decisión de escoger las lecturas correspondientes al plano colimador 1 o al plano colimador 2, no es relevante, al encontrarse cada par de lecturas dentro de la tolerancia, es indiferente la utilización de una u otra.
A continuación se opera con todos los datos menos aquellos que fueron depurados de la muestra, nuevamente se mantienen en la tabla a efectos visuales.

Se obtienen diferentes valores a raíz de la muestra de datos:

- Pendiente (Expresado en % de pendiente)
- Error (Expresado en % de pendiente)
- Error absoluto (Expresado en % de pendiente)
- Error (Expresado en metros)
- Error absoluto (Expresado en metros)

A continuación se explica qué representa cada una de estas magnitudes.

Pendiente	Error (%)	Error abs(%)	Error (m)	Error Absoluto (m)	Referencia
-2.267%	-0.267%	0.267%	-0.008	0.008	1
-2.000%	0.000%	0.000%	0.000	0.000	2
-1.867%	0.133%	0.133%	0.004	0.004	3
-2.200%	-0.200%	0.200%	-0.006	0.006	4
-2.133%	-0.133%	0.133%	-0.004	0.004	5
-2.234%	-0.234%	0.234%	-0.007	0.007	6
-1.367%					7
-2.133%	-0.133%	0.133%	-0.004	0.004	8
-2.234%	-0.234%	0.234%	-0.007	0.007	9
-1.933%	0.067%	0.067%	0.002	0.002	10
-1.800%	0.200%	0.200%	0.006	0.006	11
-1.267%					12
Promedio		**0.160%**		**0.005**	
Desviación Estandar		**0.083%**		**0.002**	

Imagen N°53 - Análisis pendientes transversales depuradas - Práctica 1

1) Pendiente (Expresado en % de pendiente): Se calcula la pendiente para cada sección transversal al eje replanteado. Para ello, se calcula la diferencia de nivel, es decir el desnivel $\Delta H = lectura\ atras - lectura\ adelante$. Luego, a partir de la distancia horizontal se puede obtener el valor de pendiente, utilizando una relación trigonométrica:

. $dh = \sqrt{di^2 - desnivel^2}$ *siendo "di" la distancia inclinada y "dh" la distancia horizontal.*

$$Pendiente\ (\%) = \frac{Desnivel}{dh} \times 100$$

2) Error de Pendiente (en m y en % de pendiente): En un hipotético caso de que la pendiente fuera 2.0% y manejando una distancia inclinada de 3.0m, la diferencia de alturas ΔH debería ser de 0.06 m. Utilizando esta relación se obtiene el error de pendiente en metros asociado a cada lectura como $\Delta H - 0.06$. Por otra parte, el error asociado a la pendiente se calcula como: $Error\ Pendiente = 2\% - \theta i$, siendo θi el ángulo medido en cada sección expresado en porcentaje de pendiente.

De esta manera se tiene el mismo error expresado de dos maneras diferentes, esto es de utilidad a efectos prácticos de interpretar el error se puede observar la referencia N°7 de la imagen N°54 antes presentada, intentar visualizar un error de 0.007 m en una sección de 3.0 m puede resultar más sencillo que hacerlo con un error de 0.234% en una pendiente de 2.0%.

3) Error Absoluto: El error absoluto, calculado como el valor absoluto de cada uno de los errores en metros y en porcentaje de pendiente, respectivamente, se obtiene a efectos de poder operar con los resultados obtenidos, esencialmente para calcular el promedio y la desviación estándar de los errores obtenidos.

Finalmente, se calcula el promedio y la desviación estándar de los dos errores absolutos presentados, estos dos estadísticos serán fundamentales para obtener conclusiones importantes. La magnitud y significado de dichos valores serán discutidas en detalle en el apartado "Análisis de resultados obtenidos en ambas prácticas".

8.1.3.2. Análisis altimétrico del sistema 3D Single GNSS

El análisis altimétrico se desarrolla a partir de los puntos relevados con estación total, el mismo consiste en comparar las elevaciones entre los puntos relevados por el equipo y sus homólogos en el MDT de diseño proporcionado por la empresa constructora, siendo el mismo que utiliza el sistema 3D de la motoniveladora al trabajar con el sistema de automatización.

El MDT se introduce en un software de diseño que permite la visualización y manejo de MDTs, en este caso se trabaja con Autocad Civil 3D.
Los puntos relevados se introducen en el mismo software, como el MDT se encuentra georeferenciado, y los puntos se encuentran en el mismo sistema de referencia, los mismos se encuentran sobre el MDT. La lámina *"Relevamiento Planialtimetrico-1er Práctica Single GNSS"* adjunta en el anexo presenta esta situación, en la misma se puede visualizar el MDT en el fondo y la totalidad de los puntos relevados con Estación Total.
Utilizando la posición planimétrica de los puntos relevados, se obtienen las elevaciones de los mismos puntos pero sobre el MDT, es decir, sus homólogos sobre la superficie de diseño. De esta manera, se comparan las elevaciones entre cada par de puntos.

Siguiendo esta metodología se obtiene la siguiente tabla (*ver Imagen N°55*) donde ΔZ se calcula como: $\boldsymbol{\Delta Z} = \textit{Elevación de Proyecto} - \textit{Elevación de Relevamiento.}$
Posteriormente son calculados los valores absolutos de dichas diferencias para poder trabajar con valores comparables.

Nº Punto	E (mts)	N (mts)	h (mts)	Descripción	ΔZ (m)	Valor Absoluto
151	574550.694	6224674.827	64.539	Relevamiento	0.018	0.018
58	574550.694	6224674.827	64.557	Proyecto		
152	574550.17	6224671.777	64.588	Relevamiento	0.027	0.027
59	574550.17	6224671.777	64.615	Proyecto		
153	574550.099	6224671.163	64.608	Relevamiento	0.020	0.020
60	574550.099	6224671.163	64.628	Proyecto		
154	574549.896	6224669.944	64.632	Relevamiento	0.018	0.018
61	574549.896	6224669.944	64.650	Proyecto		
155	574548.974	6224666.509	64.536	Relevamiento	0.018	0.018
62	574548.974	6224666.509	64.554	Proyecto		
150	574543.215	6224675.626	64.068	Relevamiento	0.007	0.007
57	574543.215	6224675.626	64.075	Proyecto		
147	574543.183	6224670.689	64.209	Relevamiento	0.019	0.019
54	574543.183	6224670.689	64.228	Proyecto		
149	574543.181	6224673.005	64.143	Relevamiento	0.021	0.021
56	574543.181	6224673.005	64.164	Proyecto		
148	574543.131	6224671.705	64.176	Relevamiento	0.024	0.024

Imagen N°54 - Vista reducida de la tabla de comparación de elevaciones - Práctica 1 - Ver tabla total adjunta al anexo

Analisis visual y analitico:

En paralelo a esta comparación punto a punto, se generó un MDT a partir de los puntos relevados, esto se hace a efectos de poder generar visuales de las secciones transversales, logrando obtener una comparación visual entre ambos modelos, el otorgado por la empresa y el generado a partir del relevamiento.

De esta manera, el análisis de elevaciones no consiste exclusivamente en comparar la elevación de cada par de puntos, sino que, dadas las características de estos sistemas y el objetivo del trabajo realizado con ellos, es importante analizar cómo se comporta la superficie transversal y longitudinalmente.
Para ello se buscó realizar una comparación visual utilizando secciones transversales sobre ambas superficies.

El análisis analítico corresponde directamente a lo definido anteriormente, a una diferencia concisa entre elevaciones, por otra parte, el análisis visual recae sobre la intención del equipo de observar el comportamiento de la superficie, para ello se utiliza la herramienta de visualización de secciones transversales del software CAD en cuestión (Autocad Civil3D). Esto puede resultar algo confuso en una primera lectura, pero posteriormente será analizado de manera más rigurosa en el apartado siguiente correspondiente al análisis de resultados obtenidos.

8.2. SISTEMA 3D DOBLE GNSS

La práctica se lleva a cabo el día Jueves 20 de Febrero, siendo la segunda práctica de campo que realiza el equipo. La visita se realiza en el marco de la construcción de la doble vía de la Ruta Nacional Nº9, en el departamento de Maldonado, concretamente en el empalme de la Ruta Nacional Nº9 con la Ruta Nº39, en las cercanías de la ciudad de San Carlos.

Imagen N°55 - Motoniveladora Caterpillar con sistema 3D Doble GNSS

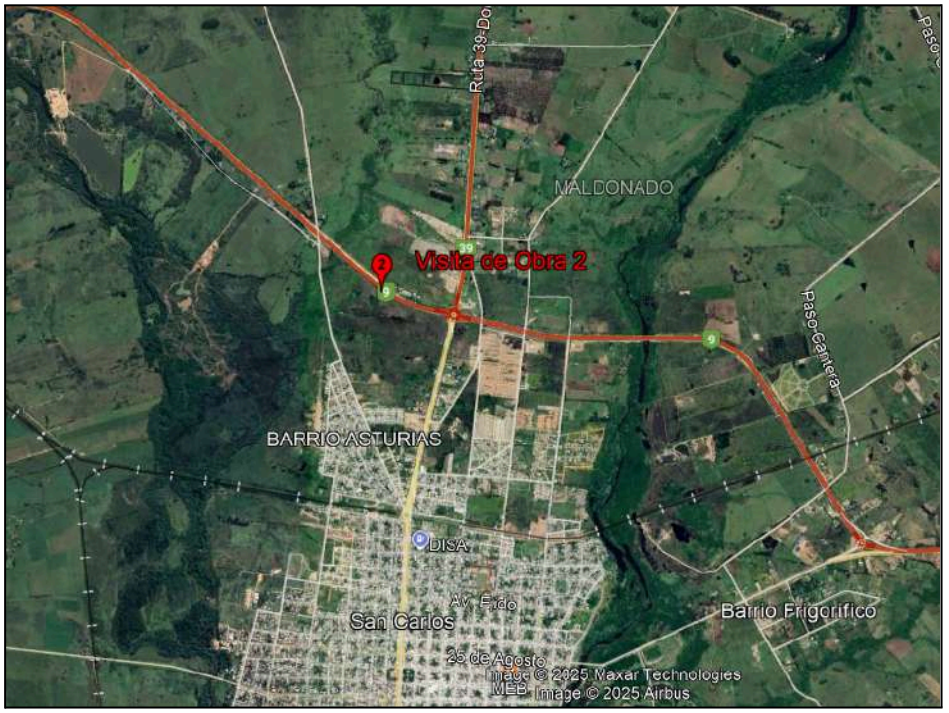

Imagen N°56 - Croquis de Ubicación 2 - Práctica 2

8.2.1. CONSIDERACIONES PREVIAS - SISTEMA DOBLE GNSS

Al igual que en el desarrollo de la primera práctica de campo, se analizan ciertos aspectos en relación a la situación ideal prevista.

8.2.1.1. Respecto a la "Cancha Tipo":

Se trabaja en un tramo de obra de 45 metros de longitud, si bien en la descripción de la "cancha tipo" se establece un tramo de 100 m de longitud, las condiciones fueron dadas por la situación en obra y el equipo no cuenta con los recursos para cambiar esta situación.

El tramo corresponde a una media calzada de ruta, por ende únicamente cuenta con una única pendiente transversal y el eje del proyecto se encuentra a un lado de la zona de trabajo. A diferencia de la práctica anterior, en la que el equipo, ante la necesidad de relevar más información, tomó la decisión de relevar datos a ambos lados del eje de ruta, en este caso la información fue tomada exclusivamente en ese tramo de 45.0 m ya que el otro lado del eje aún no se encontraba nivelado.
El eje del proyecto fue utilizado exclusivamente para trazar una línea auxiliar, como se explicará posteriormente.
Vale la pena detenerse a puntualizar algunos elementos importantes que son relevantes sobre la zona y el proyecto de trabajo:
Dadas las condiciones respecto a la longitud del tramo, el equipo opta por tomar la totalidad del ancho del mismo, se considera de esta manera un tramo de siete metros de ancho, a diferencia de los 5.0 metros establecidos como "tramo tipo".

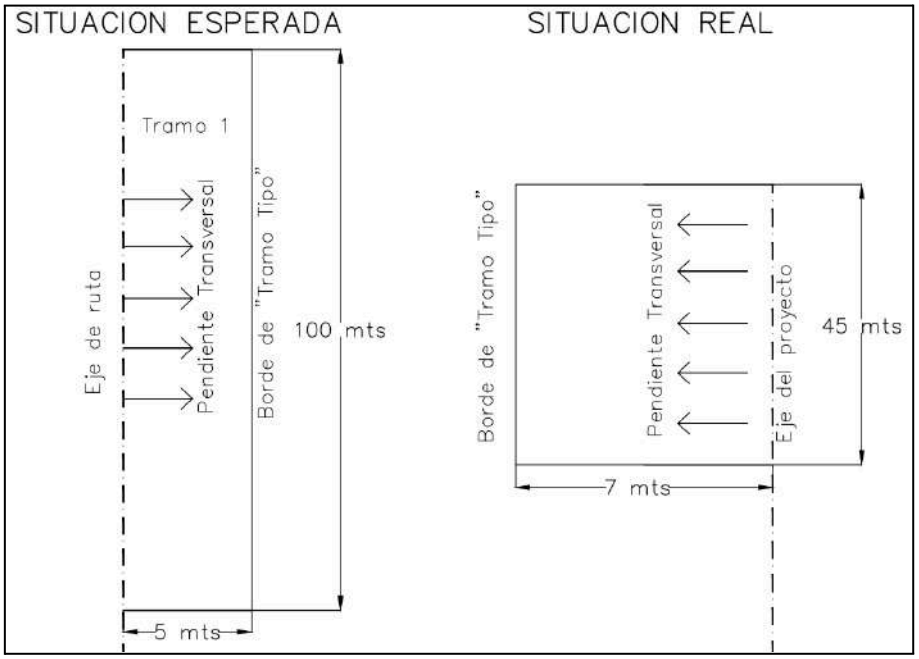

Imagen N°57 - Situación "Tramo tipo" - Práctica 3D Doble GNSS

8.2.1.2. Características del tramo:

- Longitud del tramo: 45 m. Mediciones realizadas a un solo lado.
- Pendiente longitudinal: 0.20%
- Ancho del tramo: 7.0 m
- Curvatura del tramo: Tramo recto.

8.2.1.3. Características de los elementos GNSS:

- Distancia a la base GNSS: Aproximadamente 350 m.
- Condiciones climáticas: Aproximadamente 29°C.
- Condiciones de la zona de trabajo: La zona cuenta con buena "visibilidad de cielo" sin árboles directamente sobre la base GNSS y los receptores (Móvil GNSS y antena receptora de la motoniveladora).
- Condiciones GNSS: Buena cobertura satelital (*Ver Imagen Nº59 - Cobertura satelital del sistema 3D Doble GNSS).*

Imagen Nº58 - Cobertura satelital del sistema 3D Doble GNSS.

- *Triángulo Azul: Satélite GLONASS.*
- *Circulo Blanco: Satélite GPS*

8.2.1.4. Sistema de referencia del proyecto:

- Datum Geodésico: WGS84
- Proyección Cartográfica: Universal Transversa Mercator - Zona 21S
- Elipsoide de Referencia: Elipsoide de GRS80 (WGS84)
- Sistema de Referencia Altimétrico: Al igual que en la obra visitada en la primera práctica, se trabaja con alturas locales derivadas de alturas ortométricas referidas al

geoide universal EGM 2008, de esta manera, las alturas tienen una variación constante de 25.0 cm por debajo de las alturas ortométricas.
- Sistema de Coordenadas: Sistema de coordenadas planas (E,N,h)

8.2.1.5. Tolerancias establecidas para el proyecto:

En este caso, y a diferencia de la otra visita a obra realizada por el equipo, la misma se visitó en su etapa final, y las tolerancias coinciden con las presentadas en el *"Pliego de condiciones para la construcción de puentes y carreteras"* de la Dirección Nacional de Vialidad del M.T.O.P. de vialidad.
De esta manera, se tiene que:

- Tolerancia vertical: ± 1.0 cm del espesor establecido por proyecto.
  Es decir, todos aquellos puntos que difieran en 1.0 cm de la cota establecida por proyecto serán considerados como defectuosos.

Con respecto al preanálisis de errores:
El instrumental seleccionado (Nivel Digital y Estación Total) cuentan con las características necesarias para alcanzar las precisiones establecidas por la tolerancia.

A continuación se desarrollan los aspectos relacionados a la motoniveladora, en relación a sus elementos de desgaste. Se hace hincapié en los mismos elementos considerados para la práctica anterior.

8.2.1.6. Estado de la motoniveladora - Elementos de desgaste

Se trabaja con una motoniveladora Caterpillar 140M del año 2024.
Los elementos de desgaste chequeados fueron los que hemos mencionado en situaciones previas y los cuales son presentados en las siguientes imágenes:

Imagen N°59 - Desgaste de bronces - Práctica 2

Imagen N°60 - Desgaste en los soportes de la mesa - Practica 2

Imagen N°61 - Desgaste de la bola de los cilindros - Práctica 2

Si se realiza una comparación punto a punto con la práctica anteriormente descrita se puede observar que se omitieron las imágenes respecto al desgaste de los tornillos del círculo de la cuchilla. Dicha fotografía no fue tomada ya que el procedimiento para detectar desgaste en el círculo de una motoniveladora Caterpillar de este modelo es completamente visual, no hay un elemento como tal que se pueda observar, se debe chequear el movimiento y eventualmente realizar mantenimiento. Si bien el equipo no tomó dichas fotografías, el estado de dicho elemento fue rigurosamente chequeado.
Repasar punto a punto cada uno de los aspectos no tiene sentido, ya que el procedimiento, más allá de ser una motoniveladora diferente, es completamente análogo.

Imagen N°62 - Desgaste de la cuchilla - Práctica 2

Finalmente se puede afirmar que todos los elementos de desgaste se encuentran en óptimas condiciones. Luego de realizar los chequeos, se procede a avanzar con la práctica de campo.

8.2.2. ACTIVIDAD DE CAMPO

El trabajo en campo consta de dos partes, si bien el mismo es prácticamente análogo al realizado en la práctica anterior, se presentan las actividades realizadas a efectos de puntualizar las diferencias relevantes en cuanto a procedimiento.
En la primera parte se realiza el chequeo de pendientes transversales utilizando un nivel digital, y en la segunda, el relevamiento planialtimétrico mediante el uso de una estación total, tal como fue previsto.
A continuación se desarrolla la puesta en estación, recordando la práctica anterior, el procedimiento es análogo.
La trisección se realiza mediante tres puntos (mojones de hierro) colocados por el equipo de topografía de la empresa, estos puntos no se encontraban previamente colocados, sino que fueron colocados en el momento. Los puntos se determinan mediante receptores GNSS, trabajando con RTK, conectados a la misma base con la que trabaja el sistema de motoniveladora, a unos 300 m de la misma, cada punto se ocupa por 30 minutos siguiendo las recomendaciones del equipo.

La ubicación de los puntos no es arbitraria, sino que se busca establecer una geometría adecuada buscando obtener buenos resultados tanto para la conformación de la trisección, como para la realización del relevamiento posterior.; los detalles de los puntos utilizados para llevar a cabo la trisección, así como la geometría de los elementos se pueden visualizar en el croquis de la *Imagen N°65.*

Trisección y factor de escala:

Al igual que se explicó en la práctica anterior, el equipo trabaja con estación total sobre un proyecto elaborado en la proyección UTM , por ende es necesario definir el factor de escala K para así ingresar dicho valor en la estación total y eliminar los errores provenientes de la deformación natural de la proyección. El procedimiento es análogo al realizado en la práctica anterior, en este caso los parámetros de la zona de trabajo son:

- $\lambda = 55°01'35"$
- $\varphi = 34°44'07"$

Finalmente:

K=1.00000

Imagen N°63 - Ocupación de puntos para Trisección - Práctica 2

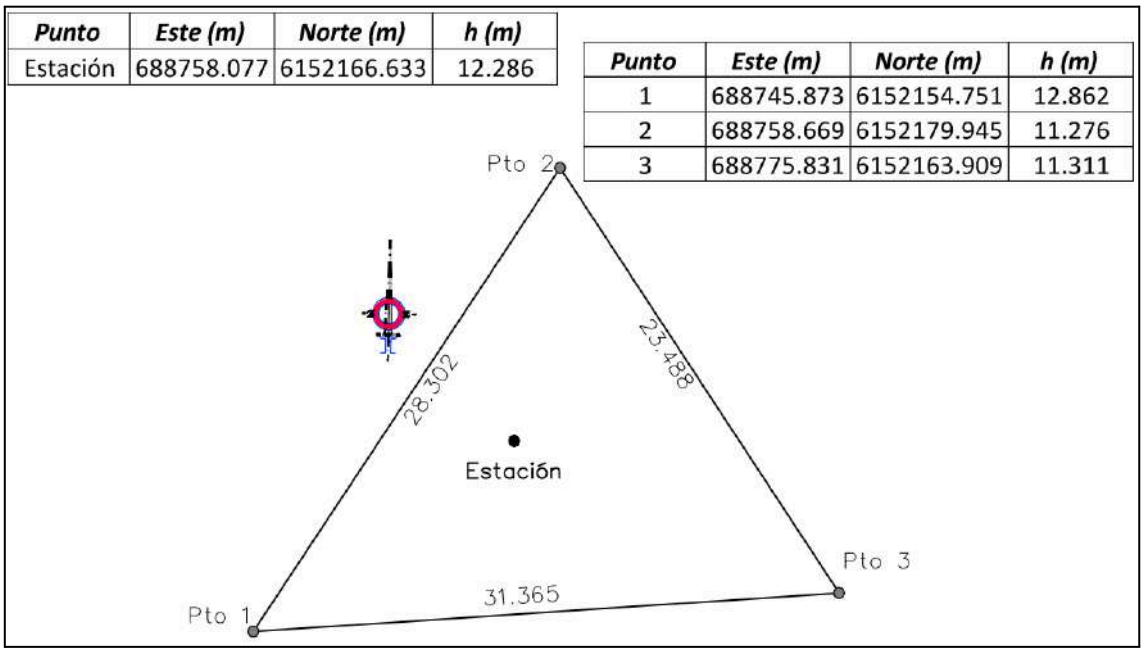

Imagen N°64 - Croquis de Trisección - Práctica 2

E (mts)	N (mts)	h (mts)
688758.077	6152166.633	12.286
σE (mts)	σN (mts)	σh (mts)
0.008	0.011	0.000

Imagen N°65 - Coordenadas y desviaciones asociadas a la trisección

Retomando la idea correspondiente a la materialización de un eje auxiliar; a diferencia de la práctica realizada con el sistema de nivelación "Single GNSS", en este caso se trabaja exclusivamente de un lado de la calzada, por lo que el eje del proyecto figura a un lado de la zona de trabajo, como de puede apreciar en la *Imagen N°58* antes presentada, visto esto, se materializa una paralela auxiliar al eje, en medio de la zona de trabajo, utilizando la estación total. Esta línea auxiliar paralela al eje resulta de gran utilidad para las actividades de relevamiento con Estación Total de perfiles transversales y para la realización de lecturas mediante el nivel óptico.

8.2.2.1. Análisis de pendiente transversal con nivel digital

A partir del eje auxiliar previamente materializado por el equipo, se miden las pendientes transversales del tramo. Para determinar la dirección transversal al eje se utiliza el método de la mediatriz[10]. Es decir, se opera de manera igual a la práctica anterior, con la diferencia de

[10] *Método que consiste en medir igual distancia desde los extremos de un segmento (base) hacia ambos lados, formando semicircunferencias con una cinta métrica. La intersección de estas semicircunferencias define un punto equidistante a ambos extremos, por lo que al unir este punto con el punto medio de la base se obtiene una línea perpendicular.*

que en este caso, en vez de utilizar el eje real del proyecto como guía de un tramo con caída a ambos lados. Se trabaja con una paralela al eje real de un tramo recto, la cual se materializa en la zona media del tramo seleccionado, de esta manera, se simula un eje y se trabaja tomando lecturas a ambos lados, a pesar de que en este caso la pendiente transversal tiene un solo sentido de caída.

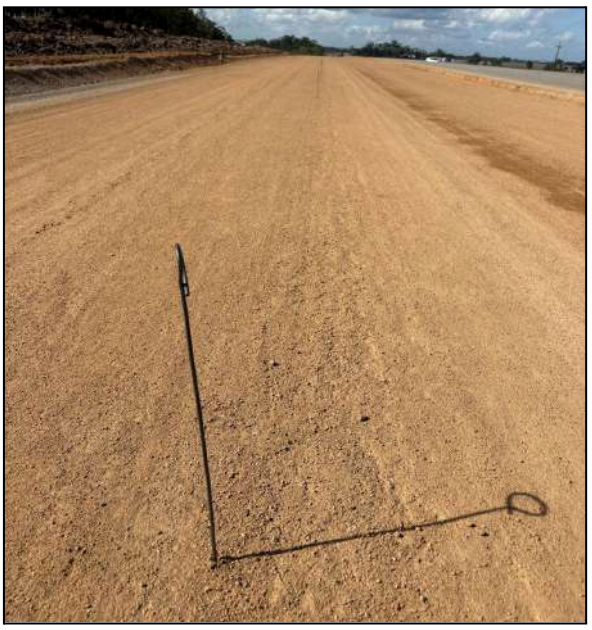

Imagen N°66 - Materialización del eje auxiliar - Práctica 2

Esta actividad no presentó mayor problema y se avanzó rápidamente a la segunda parte del trabajo.

8.2.2.2. Relevamiento Planialtimétrico con Estación Total.

Para la actividad con estación total se repite el procedimiento realizado para el sistema "Single GNSS" de la primera salida de campo. Se utiliza la misma estación determinada en la trisección para materializar el eje auxiliar. Posteriormente se realiza un relevamiento por perfiles. En total se relevan 62 puntos, con 5 puntos por perfil, siendo un total de 12 perfiles de relevamiento, con una separación entre perfiles de aproximadamente 4.0 metros.

Imagen N°67 - Estación Total estacionada previo a relevamiento a realizar - Práctica 2

A la hora de llevar a cabo el relevamiento con estación total se utiliza la ayuda auxiliar de la función de replanteo de MDT disponible en el equipo, de la misma manera que se realizó en la práctica anterior.

En la siguiente lámina adjunta en el anexo llamada *"Relevamiento planialtimétrico - 2da Práctica - Doble GNSS"* se puede visualizar la zona de relevamiento, los puntos relevados y la superficie de diseño proporcionada por la empresa constructora.

8.2.3. ACTIVIDAD DE GABINETE

Para realizar el análisis de los datos obtenidos en campo, se subdivide el procedimiento en dos secciones, cada una de ellas referidas a los diferentes instrumentos utilizados, con un resumen final en el que se analizan los resultados obtenidos en conjunto.
Como se mencionó al comienzo del desarrollo de la sección específica para este sistema, el procedimiento es prácticamente análogo, con algunas excepciones, al desarrollado en la práctica de campo anterior. En este caso y particularmente en lo que respecta a la actividad de gabinete, no se desarrolla el procedimiento analítico seguido ya que sería reiterativo, simplemente se introducen las diferentes planillas y resultados numéricos con breves comentarios a efectos de dar contexto al análisis de resultados obtenidos que se desarrollará posteriormente.

8.2.3.1. Análisis de Pendientes Transversales

Para el estudio de pendientes transversales se utilizaron los datos relevados mediante el uso del nivel digital.

Para el *proceso de depuración* se trabaja a raíz de la misma tolerancia de 1.00 mm establecida para la práctica anterior, de esta manera se identifican en color rojo los datos correspondientes a las referencias 1 y 3 que se depuran de la muestra.
En total se realizan 9 pares de lecturas, de las cuales, luego del proceso de depuración especificado , permanecen 7.

	PLANO COLIMADOR 1			PLANO COLIMADOR 2			DIFERENCIA DESNIVEL
Referencia	Lectura atras	Lectura adelante	Desnivel (m)	Lectura atras	Lectura adelante	Desnivel (m)	
1	1.004	1.050	0.046	1.076	1.150	0.074	**-0.028**
2	0.981	1.077	0.096	0.880	0.977	0.097	-0.001
3	0.976	1.107	0.131	0.985	1.101	0.116	**0.015**
4	1.001	1.111	0.110	1.133	1.243	0.11	0.000
5	1.013	1.096	0.083	2.026	2.108	0.082	0.001
6	1.009	1.092	0.083	1.249	1.332	0.083	0.000
7	1.020	1.115	0.095	1.520	1.615	0.095	0.000
8	1.037	1.126	0.089	0.717	0.805	0.088	0.001
9	1.039	1.149	0.110	0.738	0.848	0.11	0.000

Imagen N°68 - Depuración de la muestra - Practica 2

Para el siguiente análisis se opta trabajar nuevamente con la planilla de campo correspondiente a las lecturas referidas al “PLANO COLIMADOR 1”.
Como se puede observar, a diferencia de la práctica anterior, las distancias inclinadas no son constantes. Esto es debido al método para trazar perpendiculares seguido, en este caso se trabaja con el método de la mediatriz y no utilizando el método 3,4,5.
Al no utilizar el método de 3,4,5 no existe un “cateto” perpendicular al eje de distancia constante, sino que las distancias dependen de la longitud escogida para realizar el método de la mediatriz en cada caso.
A primera vista puede parecer que esto genere que ambas prácticas no sean comparativas, pero esto no es así, a efectos de la determinación de pendientes ambos métodos arrojan resultados comparables entre sí, fue una simple herramienta que el equipo utilizó en campo para poder proseguir con la práctica.
Esto es quizás un error del equipo en el proceso de búsqueda de resultados comparables en ambas prácticas, sin embargo, el procedimiento se sigue de manera rigurosa, por lo que el equipo confía en que los resultados son confiables.

Referencia	Distancia inclinada (m)	Lectura atras	Lectura adelante	Desnivel (m)
1	3.6	1.004	1.05	0.046
2	5.52	0.981	1.077	0.096
3	5.56	0.976	1.107	0.131
4	5.4	1.001	1.111	0.11
5	4.4	1.013	1.096	0.083
6	4.25	1.009	1.092	0.083
7	4.57	1.02	1.115	0.095
8	4.25	1.037	1.126	0.089
9	4.78	1.039	1.149	0.11

Imagen N°69 - Planilla de datos correspondiente a la nivelación - Práctica 2

Una vez se cuentan con las lecturas, en conjunto con la distancia inclinada entre ellas, podemos obtener la distancia horizontal y con ello la pendiente en cada perfil transversal a partir de las siguientes relaciones geométricas:

$$Desnivel = lectura\ adelante\ -\ lectura\ in\ atrás$$

$dh = \sqrt{di^2 - desnivel^2}$ siendo "di" la distancia inclinada y "dh" la distancia horizontal.

$$Pendiente\ (\%) = \frac{Desnivel}{dh} \times 100$$

Se opera con todos los datos menos aquellos que fueron depurados de la muestra, obteniendo así los primeros resultados principales:

Se obtienen diferentes valores a raíz de la muestra de datos:

- Pendiente (Expresado en % de pendiente)
- Error (Expresado en % de pendiente)
- Error absoluto (Expresado en % de pendiente)
- Error (Expresado en metros)
- Error absoluto (Expresado en metros)

Pendiente	Error (%)	Error abs (%)	Error abs (m)	Referencia
1.28%	0.722%			1
1.74%	0.261%	0.261%	0.014	2
2.36%	-0.357%			3
2.04%	-0.037%	0.037%	0.002	4
1.89%	0.113%	0.113%	0.005	5
1.95%	0.047%	0.047%	0.002	6
2.08%	-0.079%	0.079%	0.004	7
2.09%	-0.095%	0.095%	0.004	8
2.30%	-0.302%	0.302%	0.014	9
	Promedio	**0.133%**	**0.006**	
	Desviación Estándar	**0.105%**	**0.006**	

Imagen N°70 - Errores asociados a la nivelación - Práctica 2

Finalmente, se calculan los principales estadísticos que forman parte del análisis de resultados obtenidos, estos son el promedio y la desviación estándar de los errores absolutos; como ya se desarrolló anteriormente, la magnitud y significado de estos valores se discute posteriormente la sección dedicada a los mismos.

8.2.3.2. Análisis Altimétrico del sistema 3D Doble GNSS

No se profundiza en la actividad de gabinete relacionada al análisis altimétrico, este procedimiento es completamente análogo al presentado en la práctica anterior, donde se estudiaron los resultados del sistema *"3D Single GNSS"*.

Se opera con la siguiente tabla adjunta (*Imagen Nº72*) donde ΔZ es el error asociado a cada par de puntos, es decir, la diferencia de alturas de los puntos relevados con sus homólogos en la superficie de diseño (MDT), calculado como:

$$\Delta Z = Elevación\ de\ Proyecto - Elevación\ de\ Diseño.$$

Posteriormente se obtienen los valores absolutos de dichas diferencias para poder trabajar con valores comparables.

Nº Punto	E (mts)	N (mts)	h (mts)	Descripción	ΔZ (m)	Valor Absoluto
58	6152131.541	688775.760	12.952	Proyecto	-0.008	0.008
1063	6152131.541	688775.760	12.644	Terreno		
59	6152132.940	688777.011	12.914	Proyecto	-0.008	0.008
1064	6152132.940	688777.011	12.606	Terreno		
60	6152134.359	688778.643	12.871	Proyecto	-0.006	0.006
1065	6152134.359	688778.643	12.565	Terreno		
53	6152134.747	688772.765	12.954	Proyecto	0.003	0.003
1062	6152134.747	688772.765	12.657	Terreno		
54	6152135.741	688773.802	12.925	Proyecto	0.004	0.004
1061	6152135.741	688773.802	12.629	Terreno		
61	6152136.295	688780.559	12.816	Proyecto	-0.004	0.004

Imagen Nº71 - Vista reducida de la tabla de comparación de elevaciones - Práctica 2

Al igual que se explica en la práctica anterior, se realiza un análisis visual y altimétrico de los resultados obtenidos en un apartado específico, en primera instancia se puede observar que los valores correspondientes a las diferencias de altura son menores al centímetro y de menor magnitud que las diferencias observadas en la otra actividad.

8.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS EN AMBAS PRÁCTICAS

Este apartado tiene como objetivo profundizar en los resultados analíticos presentados en las actividades de gabinete de cada una de las respectivas prácticas.
A efectos de mantener un orden, se trabaja con cada una de las prácticas independientemente, para posteriormente, realizar una puesta en común en la que se comparan los resultados de las mismas, que en definitiva es el objeto de este proyecto.

8.3.1. SISTEMA DE NIVELACIÓN 3D SINGLE GNSS:

A continuación se presentan dos tablas de datos, la información de las mismas corresponde al conjunto de datos válidos luego del proceso de depuración. Se hace esta aclaración con el fin de evitar confusiones, ya que las mismas fueron presentadas anteriormente incluyendo la totalidad de los datos, es decir, también aquellos que posteriormente fueron descartados.

Referencia	Pendiente esperada	Pendiente Medida	Error Absoluto(%)	Error Absoluto (m)
1	2%	-2.267%	0.267%	0.008
2	2%	-2.000%	0.000%	0.000
3	2%	-1.867%	0.133%	0.004
4	2%	-2.200%	0.200%	0.006
5	2%	-2.133%	0.133%	0.004
6	2%	-2.234%	0.234%	0.007
8	2%	-2.133%	0.133%	0.004
9	2%	-2.234%	0.234%	0.007
10	2%	-1.933%	0.067%	0.002
11	2%	-1.800%	0.200%	0.006
		Promedio	**0.160%**	**0.005**
		Desviación Estandar	**0.083%**	**0.002**

Imagen N°72 - Tabla de datos de pendiente del sistema Single GNSS

Nº Punto	E (mts)	N (mts)	h (mts)	Descripción	ΔZ (m)	Valor Absoluto	Promedio	Desviacion Estandar
151	574550.694	6224674.827	64.539	Relevamiento	0.018	0.018	0.019	0.010
58	574550.694	6224674.827	64.557	Proyecto				
152	574550.17	6224671.777	64.588	Relevamiento	0.027	0.027		
59	574550.17	6224671.777	64.615	Proyecto				
153	574550.099	6224671.163	64.608	Relevamiento	0.020	0.020		
60	574550.099	6224671.163	64.628	Proyecto				
154	574549.896	6224669.944	64.632	Relevamiento	0.018	0.018		
61	574549.896	6224669.944	64.650	Proyecto				
155	574548.974	6224666.509	64.536	Relevamiento	0.018	0.018		
62	574548.974	6224666.509	64.554	Proyecto				
150	574543.215	6224675.626	64.068	Relevamiento	0.007	0.007		
57	574543.215	6224675.626	64.075	Proyecto				
147	574543.183	6224670.689	64.209	Relevamiento	0.019	0.019		
54	574543.183	6224670.689	64.228	Proyecto				
149	574543.181	6224673.005	64.143	Relevamiento	0.021	0.021		
56	574543.181	6224673.005	64.164	Proyecto				
148	574543.131	6224671.705	64.176	Relevamiento	0.024	0.024		
55	574543.131	6224671.705	64.200	Proyecto				
146	574542.815	6224666.087	64.138	Relevamiento	-0.042	0.042		
53	574542.815	6224666.087	64.096	Proyecto				
141	574537.958	6224676.439	63.735	Relevamiento	-0.009	0.009		

Imagen N°73 - Vista parcial de Tabla de datos altimétricos del sistema Single GNSS

Promedio del Error: 0.019 metros
Desviación Estándar: 0.010

Error esperado (Preanálisis de errores): $\boldsymbol{\sigma} h \;=\; 0.016\, m$

Un error de 0.019 m está por encima de lo esperado a raíz del preanálisis de errores previamente realizado. Esta diferencia materializa la situación de la que se habló al momento de realizar el preanálisis. Como se explicó, el preanalisis de errores se realiza sobre los elementos que corresponden al posicionamiento y a la apreciación de los sensores. El equipo no cuenta con los recursos para analizar cómo responde el sistema hidráulico de la máquina a las correcciones enviadas por el sistema.

De esta manera, se podría decir que de los 0.019 metros de error observados, 0.015 corresponden al sistema de nivelación y 0.004 a la eficiencia del sistema hidráulico para corregir la posición de la cuchilla de la motoniveladora.

Por otra parte, como se puede apreciar en la *Imagen N°73*, la pendiente transversal si bien presenta un error de 0.160%, el valor de la desviación estándar es sumamente bajo, lo que indica una homogeneidad en los datos. A continuación se desarrolla un resultado que ayuda a interpretar esta idea de mejor manera.

En total se relevaron 61 puntos con estación total sobre el proyecto en cuestión, de la comparación de estos puntos con sus correspondientes en el modelo digital surge que, de los

61 puntos, 49 se encuentran por encima del modelo de proyecto, es decir que presentan una cota mayor a la del modelo; 1 tiene exactamente la misma cota de proyecto y los otros 11 restantes se encuentran por debajo de la misma.

El siguiente gráfico circular permite visualizar esta relación de puntos:

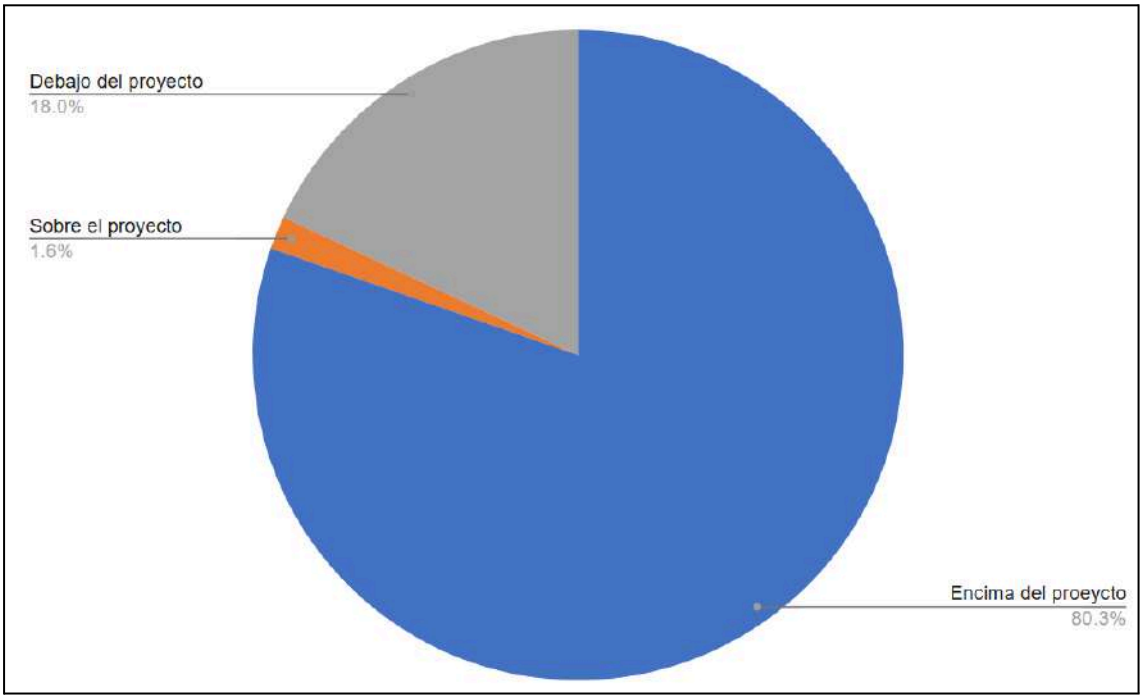

Imagen N°74 - Relación de puntos con respecto a la superficie de proyecto - Practica 1

Durante el desarrollo de las prácticas se mencionó que la densidad y posición de los puntos permite que el equipo genere un MDT a partir de los puntos relevados. Esto permite realizar una comparación mediante secciones transversales en un software de diseño CAD.
Si se observa la imagen del gráfico circular en conjunto con la presentada a continuación, se pueden sacar algunas conclusiones importantes.

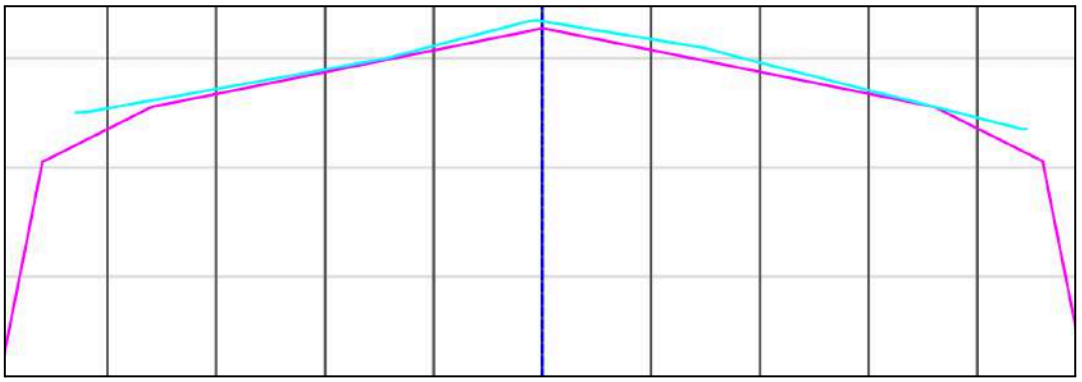

Imagen N°75 - Detalle de sección transversal de la lámina "Relevamiento planialtimetrico - 1era Practica - Single GNSS"

En la *Imagen Nº76*, se puede visualizar un detalle fuera de escala de la lámina "*Relevamiento planialtimétrico - 1era Práctica - Single GNSS", adjunta en el anexo,* en la misma se presentan dos modelos digitales y secciones transversales generadas.
Esta vista en particular corresponde a la progresiva 0+020.00 la cual se toma como muestra representativa de lo que sucede a lo largo de todo el proyecto.

La línea en color magenta corresponde al proyecto generado por la empresa en cuestión, mientras que la de color cian es el generado por el equipo a partir de los puntos relevados con estación total, la visualización se encuentra con una exageración en la escala vertical *(deformacion vertical de 10)* para poder apreciar mejor las diferencias.
Los comportamientos extraños en los extremos izquierdo y derecho de la superficie color cian, se deben a que el relevamiento estaba diseñado para compararse solamente hasta antes de la banquina, siendo coherente que la comparación pierda sentido hacia los lados de la superficie de diseño.

Volviendo a la idea, en la cual se presentan los puntos de relevamiento que quedaron por encima del proyecto, se ve que esto se corresponde con las superficies mostradas en la sección transversal.

En definitiva, el terreno nivelado por la máquina, respeta la pendiente con un error promedio del 0.160% y un error en elevación de 0.019 metros. Se tiene un valor de desviación estándar reducido, es decir, el error de pendiente se mantiene constante, la superficie no presenta cambios incoherentes de pendiente a lo largo de la "cancha" relevada y finalmente, *el terreno nivelado se presenta como una "copia" de la superficie de diseño elevada 0.019 metros sobre el proyecto.*

Al analizar este resultado en conjunto con los obtenidos en la práctica del sistema 3D de doble antena GNSS se entiende la importancia de estos valores.

De esta manera, se presentan los resultados finales obtenidos para el sistema de nivelación 3D Single GNSS:

SINGLE GNSS	Pendiente (%)	Pendiente (m)	Elevación (m)
Error Absoluto	0.160%	0.005	0.019
Desviación Estandar	0.083%	0.002	0.01

Puntos por encima	Puntos por debajo
49	11

Imagen Nº76 - Resultados Finales sistema 3D Single GNSS

8.3.2. SISTEMA DE NIVELACIÓN 3D DOBLE GNSS:

Continuando el razonamiento realizado en el desarrollo del sistema anterior, se analizan las tablas antes presentadas y concentrándose exclusivamente en los resultados a analizar.

Referencia	Pendiente esperada	Pendiente Medida	Error Absoluto(%)	Error Absoluto (m)
2	2.00%	1.74%	0.261%	0.014
4	2.00%	2.04%	0.037%	0.002
5	2.00%	1.89%	0.113%	0.005
6	2.00%	1.95%	0.047%	0.002
7	2.00%	2.08%	0.079%	0.004
8	2.00%	2.09%	0.095%	0.004
9	2.00%	2.30%	0.302%	0.014
		Promedio	**0.133%**	**0.006**
		Desviación Estandar	**0.105%**	**0.006**

Imagen N°77 - Tabla de datos de pendiente del sistema Doble GNSS

A primera vista se puede apreciar que el error en promedio es menor que el error de 0.160% obtenido en la práctica anterior. Sin embargo, los valores de desviación estándar son mayores; esto se interpreta como una mayor variabilidad en los datos a pesar de contar con un menor error en altimetría.

N° Punto	E (m)	N (m)	h (m)	Descripción	ΔZ (m)	Valor Absoluto	Promedio	Desviación Estandar
58	6152131.541	688775.760	12.952	Proyecto	-0.008	0.008	0.008	0.010
1063	6152131.541	688775.760	12.644	Terreno				
59	6152132.940	688777.011	12.914	Proyecto	-0.008	0.008		
1064	6152132.940	688777.011	12.606	Terreno				
60	6152134.359	688778.643	12.871	Proyecto	-0.006	0.006		
1065	6152134.359	688778.643	12.565	Terreno				
53	6152134.747	688772.765	12.954	Proyecto	0.003	0.003		
1062	6152134.747	688772.765	12.657	Terreno				
54	6152135.741	688773.802	12.925	Proyecto	0.004	0.004		
1061	6152135.741	688773.802	12.629	Terreno				
61	6152136.295	688780.559	12.816	Proyecto	-0.004	0.004		
1066	6152136.295	688780.559	12.512	Terreno				
55	6152136.844	688775.091	12.891	Proyecto	0.015	0.015		
1060	6152136.844	688775.091	12.606	Terreno				
62	6152137.468	688781.841	12.750	Proyecto	0.011	0.011		
1067	6152137.468	688781.841	12.461	Terreno				
52	6152137.621	688769.783	12.960	Proyecto	0.005	0.005		
1052	6152137.621	688769.783	12.665	Terreno				
56	6152137.775	688775.871	12.867	Proyecto	-0.005	0.005		
1059	6152137.775	688775.871	12.562	Terreno				
63	6152138.517	688783.360	12.478	Proyecto	0.268	0.268		

Imagen N°78 - Vista parcial de Tabla de datos altimétricos del sistema Doble GNSS

Promedio del Error: 0.008 metros

Desviación Estándar: 0.010

Error esperado (Preanálisis de errores): $\boldsymbol{\sigma}h = 0.015\ m$

Si se analiza la relación del resultado obtenido en campo con el esperado a raíz del preanalisis de errores se puede apreciar que el error es menor que el esperado.
Al momento de desarrollar el preanalisis para este tipo de sistemas se prevé que una situación así podría ser esperable. Esto apunta directamente a la simplicidad del preanálisis y a cómo interpreta el sistema las correcciones enviadas por las dos antenas receptoras. En este caso se puede decir que el preanálisis de errores realizado por el equipo no es representativo del funcionamiento del sistema.

Se sigue el mismo hilo de razonamiento que para el sistema de una antena GNSS, se observa la relación entre la cantidad de puntos por encima y por debajo del proyecto en conjunto con, siguiendo igual razonamiento.
En total se relevaron 62 puntos con estación total sobre el proyecto en cuestión, de la comparación de estos puntos con sus correspondientes en el modelo surge que, de los 62 puntos, 33 quedaron por encima del modelo de proyecto, es decir que presentan una altura mayor a la del modelo, y los otros 29 restantes quedaron por debajo de la misma.

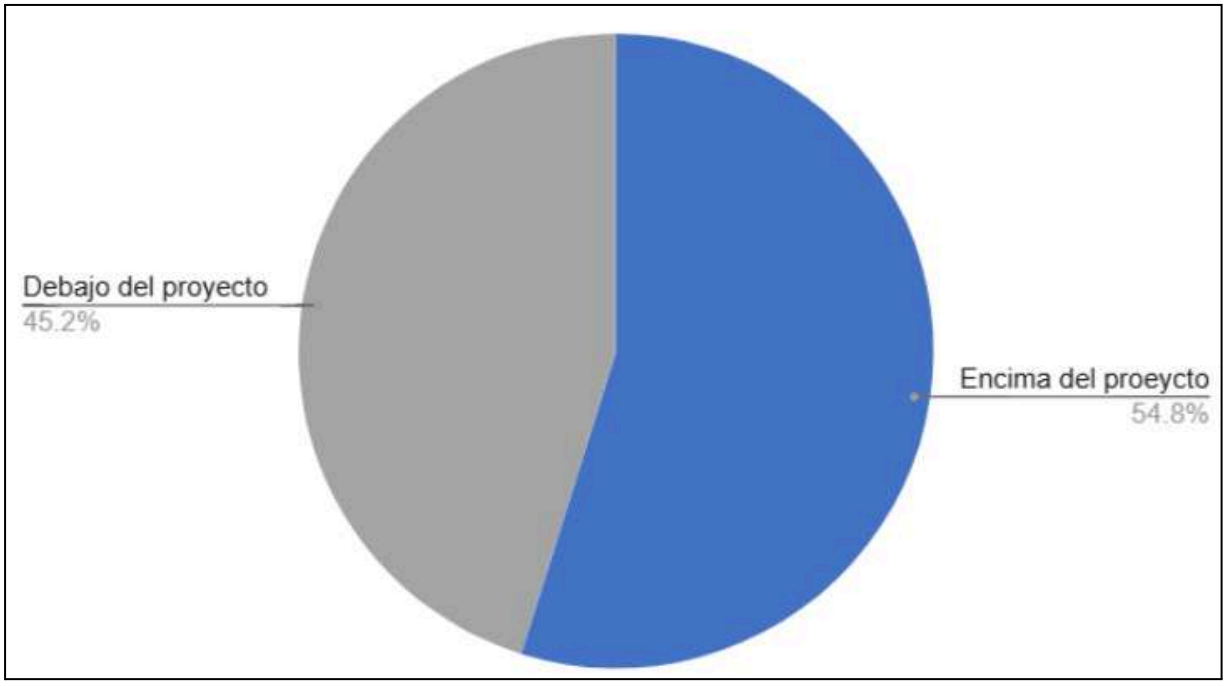

Imagen N°79 - Relación de puntos con respecto a la superficie de proyecto

Al igual que en el caso anterior, se genera un MDT utilizando los puntos relevados con estación total a efectos de poder realizar una comparativa visual mediante secciones transversales.

En este caso, a diferencia de la situación anterior, aproximadamente la mitad de los puntos se encuentran por encima de la superficie y la otra mitad por debajo.

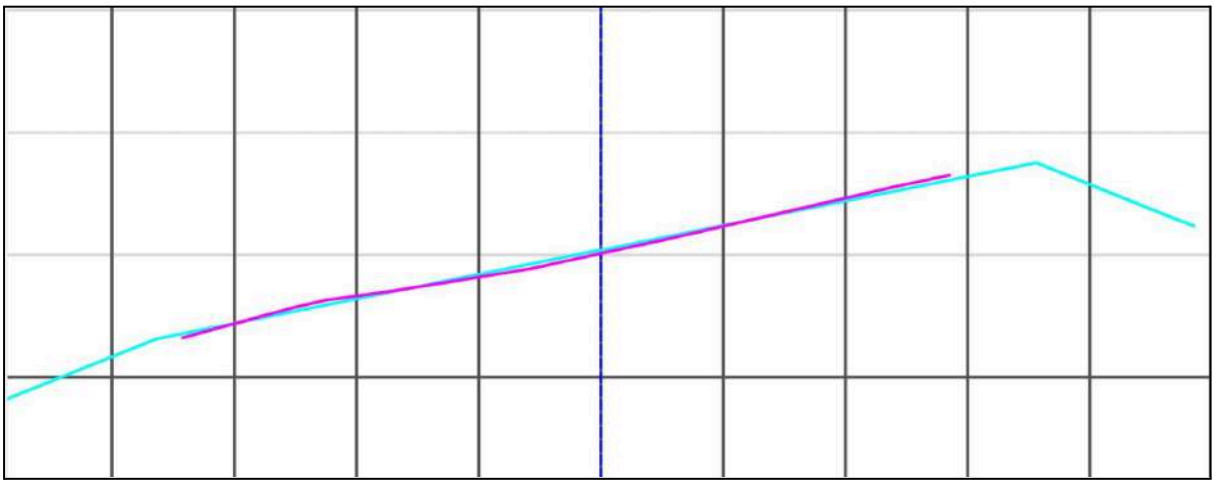

Imagen N°80 - Detalle de sección transversal de la lámina "Relevamiento planialtimétrico - 2da Práctica - Doble GNSS"

En la *Imagen N°81*, se puede visualizar un detalle fuera de escala de la lámina *"Relevamiento planialtimétrico - 2da Práctica - Doble GNSS" adjunta en el anexo.*
Esta vista en particular, corresponde a la progresiva 0+036.00 la cual se toma como muestra representativa de lo que sucede a lo largo de todo el proyecto.
La línea en color cian corresponde al proyecto generado por la empresa en cuestión, mientras que el de color magenta es el generado por el equipo a partir de los puntos relevados con estación total, la visualización se encuentra con una exageración en la escala vertical (deformacion vertical de 10) para poder apreciar mejor las diferencias.

Visualizando en conjunto la magnitud de los errores presentados, el gráfico circular y la vista transversal de la sección, se aprecia como la superficie generada a partir de los puntos de relevamiento "oscila" por encima y por debajo del proyecto.

Se tienen valores de desviación mayores que los obtenidos para el sistema Single GNSS, es decir, el error de pendiente si bien es de menor magnitud, tiene una mayor variación con respecto a la media, de esta manera, se infiere que el terreno relevado, si bien presenta un error de magnitud baja, presenta oscilaciones respecto a la superficie de diseño y no se muestra como una "copia" del proyecto como en el caso anterior, si no que en este caso el terreno relevado se presenta como una superficie con diferentes oscilaciones por encima y por debajo de la superficie pero que no se "aleja" en gran magnitud.

En el desarrollo anterior fue explicado que los resultados correspondientes tendrían mayor sentido al estudiar los dos sistemas en conjunto, particularmente se hacía referencia a esta idea, el entender por qué el sistema Single GNSS generó una "copia" de la superficie con un error de elevación (mayor que este) y por que el sistema de doble antena GNSS devolvió el resultado que se está analizando es parte importante de este análisis.

De esta manera, se presentan los resultados finales obtenidos para el sistema de nivelación 3D Doble GNSS:

Doble GNSS	Pendiente (%)	Pendiente (m)	Elevación (m)
Error Absoluto	0.130%	0.006	0.008
Desviación Estandar	0.105%	0.006	0.01

Puntos por encima	Puntos por debajo
49	11

Imagen N°81 - Resultados Finales Sistema Doble GNSS

A continuación, en la sección dedicada a las conclusiones se realiza una puesta en común entre los resultados obtenidos en ambas prácticas.

9.CONCLUSIONES

El objetivo principal de esta tesis es comparar las precisiones de ambos sistemas, una vez analizados ambos independientemente, se presentan los resultados obtenidos en ambas prácticas en una única tabla:

SINGLE GNSS	Pendiente (%)	Pendiente (m)	Elevación (m)
Error Absoluto	0.160%	0.005	0.019
Desviación Estándar	0.083%	0.002	0.010
DOBLE GNSS			
Error Absoluto	0.130%	0.006	0.008
Desviación Estándar	0.105%	0.006	0.010

Imagen N°82 - Resultados Finales - Ambas Prácticas

Con respecto a las tolerancias verticales definidas para los Proyectos

El análisis a realizar corresponde a la relación entre los resultados obtenidos y las tolerancias definidas para cada uno de los proyectos visitados.

Repasando lo visto en el desarrollo de las prácticas correspondientes a ambos sistemas, para el Sistema 3D Single GNSS se trabaja con una tolerancia vertical interna establecida por la empresa de: ± 2.0 cm del espesor establecido por proyecto, lo que implica trabajar con equipos que manejen precisiones del orden de 0.666 cm.
Por otra parte, para el sistema 3D Dual GNSS se trabaja con una tolerancia vertical: ± 1.0 cm del espesor establecido por proyecto, lo que implica trabajar con equipos que alcanzan precisiones de 0.333 cm.
Este fue un punto fundamental al momento de desarrollar los preanalisis de errores, a raíz de los cuales aparentemente no se contaba con las precisiones necesarias para cumplir con las tolerancias. Este conflicto entre resultados recae sobre diferentes aspectos ya analizados en el desarrollo de este informe pero que vale la pena volver a mencionar:

Simplificación del funcionamiento de los sistemas:

- Sistema 3D Single GNSS: Para modelar los errores de este tipo de sistemas, se considera que los mismos están conformados por dos componentes principales: La antena receptora GNSS y el conjunto de sensores electromecánicos. Finalmente, a raíz de los datos obtenidos de las diferentes hojas técnicas, se desarrolla un preanalisis de errores.
  Este procedimiento asume una gran simplificación, ya que no tiene en cuenta el manejo hidráulico del sistema con respecto a las correcciones recibidas por el sistema.

Es decir, se modelan exclusivamente los errores que el equipo tiene la capacidad de modelar. Esto, si bien acelera el proceso de preanalisis, puede traer diferencias con respecto a las precisiones reales.

- Sistema 3D Doble GNSS: En este caso, la situación es similar a la anterior. Los errores tenidos en cuenta para este preanalisis corresponden exclusivamente a los obtenidos de la hoja de datos de las antenas receptoras en cuestión.
  Estas hojas de datos están dirigidas a la antena como elemento de posicionamiento y no al conjunto de elementos que conforman el sistema.
  Si bien el distribuidor ya había previsto una mejora en el funcionamiento con respecto a los sistemas Single GNSS a raíz de una multitud de factores (eliminación de los sensores de rotación y pendiente, posicionamiento en tiempo real enfocado en la cuchilla y no en la máquina, conocimiento del heading en todo momento, entre otros), el equipo no contaba con los conocimientos para realizar un preanálisis 100% representativo del funcionamiento del sistema.

Finalmente, ambos sistemas cumplieron con los resultados esperados, dejando en claro que, el preanalisis de errores no fue completamente representativo y adjudicando las diferencias a la respuesta hidráulica de la máquina frente a las correcciones enviadas por los sistemas.

<u>Con respecto a los resultados obtenidos</u>

El resultado de la práctica referente al sistema 3D single GNSS arroja valores que se pueden entender como una "copia" de la superficie de proyecto (MDT) con un error de elevación de 0.019 m en promedio con una desviación estándar de la pendiente de 0.083%.

Por otra parte, el sistema 3D de Doble GNSS presentó un error en altura de 0.008 m con una desviación estándar de la pendiente de 0.105%m, es decir, a pesar de que el error disminuye ampliamente, la desviación estándar se presenta elevada en relación al mismo.
Esto se traduce en que los resultados obtenidos oscilan por encima y por debajo la media, pero en menor magnitud que el sistema de un receptor GNSS ya que, el valor absoluto del error de pendiente sigue siendo menor para el sistema de Doble antena GNSS.
El sistema de Doble GNSS presenta errores de menor magnitud en elevación y pendiente, pero con una mayor variabilidad de datos.

El sistema de una antena receptora realiza esta "copia" de la superficie de diseño con un error en elevación debido a los componentes con los que trabaja. Se debe pensar que los errores de mayor magnitud de este sistema están asociados a la determinación de la posición del extremo de la cuchilla sobre el que se encuentra la antena GNSS a partir del posicionamiento RTK, finalmente el error aportado por la apreciación de los sensores es ínfima en relación a esta, como se ve en el preanalisis de errores.

Es por esto que, el sistema respeta la pendiente de proyecto en gran medida, ya que no cuenta con insumos de correcciones del otro lado de la cuchilla.

En cambio el sistema que cuenta con dos receptores GNSS, calcula independientemente la posición de ambos extremos de la cuchilla, no estando relacionadas unas lecturas con otras, de esta manera, si bien no se puede mantener una pendiente constante calculada a partir de un sensor, cada uno de los extremos de la cuchilla puede corregirse para intentar "llegar a cota", generando esa superficie con oscilaciones que ya mencionamos.

Un aspecto a recalcar respecto a los resultados estadísticos aquí presentados corresponde a las magnitudes de la desviación estándar, como se puede apreciar el valor de la misma en el estudio de alturas del sistema doble GNSS es mayor que el valor del promedio del error, esto es un caso particular que se da cuando los datos tienen mucha variabilidad y el promedio de la muestra (en este caso, el promedio de los errores) es cercano a cero; este resultado acompaña nuevamente a la conclusión antes mencionada.

Este resultado está asociado a diferentes factores, como se ha mencionado reiteradas veces, la principal diferencia recae en el funcionamiento de ambos sistemas, mientras que el sistema de un solo receptor trabaja calculando la posición de uno de los extremos de la cuchilla a partir de las lecturas de diferentes sensores, el otro sistema utiliza la posición "real" de ambos extremos en un sistema de referencia. El sistema de una antena receptoras sigue el mismo flujo de trabajo que con los antes presentados "Sistemas 2D", se trabaja con un lado de la cuchilla por referencia de elevación y el otro por pendiente, mientras que el sistema de dos antenas receptoras, independiza ambos extremos de la cuchilla y evita el uso de sensores.

Uno de los aspectos que se menciona como relevante cuando se presentó el funcionamiento de ambos sistemas es que mientras que el sistema de un receptor GNSS debe calcular el rumbo a partir de un historial de posiciones de la máquina, el sistema de doble receptor GNSS tiene la ventaja de poder calcular el rumbo y la inclinación de la hoja de la motoniveladora con mayor exactitud en todo momento, ya que utiliza dos puntos espaciales distintos para determinar la orientación. Esto permite mejorar el cálculo de la posición relativa y por ende generar superficies de trabajo más precisas. Este aspecto es quizás uno de los más importantes a la hora de profundizar en diferencias entre ambas metodologías de trabajo, y es sin embargo, difícil de traducir esta característica a resultados numéricos, por lo que la actividad de campo es fundamental para determinar si este aspecto es o no beneficioso.

De esta manera, se observó que el sistema de doble GNSS presentó mejores precisiones en las mediciones, sin embargo, este sistema también evidenció una mayor variabilidad en los datos obtenidos, lo que podría estar relacionado con factores como la complejidad del procesamiento de señales de dos antenas o la sensibilidad a interferencias del entorno.

Por otro lado, el sistema de un solo receptor GNSS mostró un comportamiento más estable, con menor dispersión de datos a lo largo del tiempo, aunque con una precisión ligeramente inferior. Esta característica lo posiciona como una alternativa confiable para tareas donde la repetibilidad de la información es más crítica que la precisión máxima.

10.RESUMEN EJECUTIVO

Este proyecto de grado se centra en el estudio técnico y comparativo de las decisiones obtenidas a partir de dos sistemas de nivelación y control automatizados para motoniveladoras, mediante tecnología GNSS: un sistema 3D mediante un único receptor GNSS (Topcon) y un sistema 3D de doble receptores GNSS (Trimble). Ambos tienen el objetivo final de automatizar el control de la cuchilla de la motoniveladora, aumentando la precisión y eficiencia en todas las tareas que se realicen con la máquina.

El objetivo principal es evaluar el desempeño de ambos sistemas en condiciones reales de obra, analizando sus precisiones, ventajas y limitaciones según las limitaciones propias de las obras viales. En conjunto, estudiar la relación y participación del Ingeniero Agrimensor con este tipo de tecnologías y la importancia del conocimiento de las mismas.

Se realiza un estudio de campo donde se relevan y comparan datos de nivelación obtenidos con ambos sistemas, también se realiza un análisis desde la perspectiva profesional dentro del contexto de la actividad del Ing. Agrimensor en conjunto con entrevistas a expertos que vivieron la transición de la nivelación tradicional al control 3D.

Entre los resultados obtenidos, se destaca que el sistema de doble GNSS mostró mejores precisiones altimétricas, aunque con mayor variabilidad en los datos. En cambio, el sistema de un solo receptor demostró mayor estabilidad en los resultados, aunque con menores precisiones.

Este trabajo busca aportar herramientas y fundamentos claros que permitan a profesionales idóneos d e la materia para la elección de la solución tecnológica más adecuado según las condiciones particulares del proyecto, reafirmando el rol del Ingeniero Agrimensor en el ámbito de las obras viales y su relación con con el constante avance tecnológico que exigente en el mundo de la ingeniería

Además, este trabajo busca ampliar el abanico de posibilidades de intervención del Ingeniero Agrimensor, abordando aspectos en los que, a simple vista, su participación podría parecer secundaria o inexistente, como en el control automatizado de maquinaria.

11.ANEXO

Este apartado está destinado a incorporar algunos recursos que fueron utilizados durante el desarrollo del informe, las fotografías que se tomaron durante las prácticas de campo y el conjunto de láminas y planillas completas que se mencionaron en los diferentes apartados.

El orden de las siguientes son:

- Hoja de datos receptor GNSS Trimble MS995
- Hoja de datos Estación Total Trimble S5 de 2”
- Planilla de campo - Práctica 1
- Planilla de campo - Práctica 2
- Relevamiento Planialtimetrico 1er Práctica "Single GNSS”
- Relevamiento Planialtimetrico 2da Práctica "Doble GNSS"
- Secciones Transversales 1er Práctica "Single GNSS”
- Secciones Transversales 2da Practica "Doble GNSS”

12. BIBLIOGRAFIA Y WEBGRAFIA

(1) *"MANUAL DE PROCEDIMIENTOS PARA EL CONTROL DE OBRAS PÚBLICAS VIALES".*
https://www.sitioftp.com/CVU/usr/data/application/source/2014-06-30_30188175.pdf

(2) *"DISEÑO GEOMÉTRICO DE VÍAS".*
https://sjnavarro.wordpress.com/wp-content/uploads/2011/08/disec3b1o-geomc3a9trico-de-vc3adas-john-jairo-agudelo.pdf

(3) *"Capas y Sub Bases granulares de un Pavimento".*
https://www.ingecivil.net/2018/01/24/capa-base-y-subbase-granular-de-un-paviment

(4) *"GNSS. GPS: fundamentos y aplicaciones en Geomática" - José Luis Berné Valero - Ana Belén Anquela Julián - Natalia Garrido Villén. EDITORIAL UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA.*

(5) *Proyecto de grado de la universidad de Ingeniería y Agrimensura de Queensland Sur, "Testing of Robotic Total Stations For Dynamic Tracking" - Dennis Garget, Octubre del 2005.*

(6) *Tratado de topografía, Teoría de errores e instrumentación – Manuel Chueca Pazos, José Herráez Boquera, José Luis Berné Valero – Paraninfo, ISBN 84-283-2308-9 Aparatos Topográficos – Francisco Valdés Doménech – CEAC, ISBN 84-329-2403-2 Manual práctico para ajuste de aparatos topográficos – Jesús Llamas Z.- Limusa.*

(7) *"Leica Geosystems Machine Control System".*
https://leica-geosystems.com/es-mx/products/machine-control-systems

(8) *"EVALUACIÓN DE INSTRUMENTAL TOPOGRÁFICO Nivel Digital – Norma UNIT ISO 17123-2:2001." Realizado por los Ing. Agrim. Fabian Barbato – Ing. Agrim. Martin Wainstein - Ing. Agrim. Hebenor Bermudez Ing. Agrim. Jose Luis Fernandez.*

(9) *"Motoniveladoras 3D para nivelaciones, extendidos y compactaciones"*
https://www.maciasflores.com/motoniveladoras/tecnologia.html