



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



FACULTAD DE
INGENIERÍA
UDELAR

Anteproyecto obra lineal: Tranvía por Av. Italia

Lucas Padilla
Juan José Zanatta

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

Agrimensor.

Tutor:
Ing. Agrim. Luis Alberto Calderón

Tribunal:
Ing. Agrim. Hebenor Bermúdez
Ing. Agrim. Bruno Silveira
Ing. Agrim. Martín Wainstein

Montevideo, Uruguay.
Diciembre de 2025

Página de Aprobación

FACULTAD DE INGENIERÍA - UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

El tribunal docente integrado por los abajo firmantes aprueba el Proyecto de grado:

Título

Autor/s

.....

Tutor

Carrera

Puntaje

Tribunal

Profesor.....(Nombre y firma)

Profesor.....(Nombre y firma)

Profesor.....(Nombre y firma)

Fecha

1. Agradecimientos

A lo largo de la carrera fueron muchas las personas que contribuyeron directa o indirectamente a nuestra formación académica y personal. En primer lugar, queremos expresar nuestro agradecimiento a los profesores y docentes del Instituto de Agrimensura de la Facultad de Ingeniería, quienes con su dedicación, conocimiento y compromiso fueron fundamentales en la construcción de las bases técnicas y éticas de esta profesión. Su orientación y exigencia académica marcaron profundamente nuestra forma de pensar y solucionar las problemáticas propias de la carrera. Especialmente, le agradecemos a nuestro profesor y tutor del presente proyecto de grado, Prof. Ing. Agrim. Luis Alberto Calderón Ruiz, quien nos ha acompañado durante todo el proceso de éste, dedicando generosamente su tiempo para guiarnos, corregirnos y brindarnos recomendaciones en cada instancia, lo cual nos fue de suma importancia para resolver ciertos inconvenientes y aplicar adecuadamente las consideraciones necesarias. Agradecemos también al Prof. Ing. Agrim. Esteban Striewe Dieste, quién nos brindó su apoyo y conocimientos en un tema específico del presente informe, contribuyendo de manera significativa al desarrollo del mismo.

A nuestros familiares, por su apoyo incondicional, comprensión y paciencia a lo largo de estos años de estudio. Su confianza, aliento y acompañamiento constante hicieron posible alcanzar esta instancia. En particular le agradecemos al Ing. Agrim. Marcelo Zanatta Silvera, familiar de uno de nosotros, por acompañarnos y facilitarnos sus herramientas de trabajo, para la realización de la mensura requerida.

A nuestros compañeros de generación, con quienes compartimos clases, trabajos, jornadas de campo y momentos de aprendizaje que fortalecen no solo nuestros conocimientos, sino también los lazos humanos que hacen más valiosa la experiencia universitaria.

Finalmente, agradecer a todas las personas que, de una forma u otra, colaboraron en este proceso, aportando su tiempo, experiencia o motivación para que este proyecto pudiera concretarse. A todos ellos, muchas gracias.

Deseamos recordar y agradecer de forma especial a nuestra profesora, quién no solo nos dictó varios cursos, sino que además nos recibió y acompañó en nuestra primera experiencia laboral vinculada a la carrera, durante nuestra pasantía elaborada en el Servicio de Catastro y Avalúo de la Intendencia de Montevideo. Su disposición, tolerancia y flexibilidad fueron vitales para el desarrollo y avance de nuestra carrera universitaria. La recordamos con gran afecto y agradecemos su permanente disposición hacia nosotros. Por todo ello, muchas gracias, Prof.

Ing. Agrim. Martha Siniacoff Del Pino.

2. Índice

| | | |
|--------|--|----|
| 1. | Agradecimientos..... | 2 |
| 2. | Índice | 4 |
| 3. | Resumen | 6 |
| 4. | Acrónimos | 7 |
| 5. | Índice de Tablas..... | 8 |
| 6. | Índice de Figuras | 9 |
| 7. | Introducción..... | 13 |
| 8. | Fundamentación del Tema..... | 15 |
| 9. | Objetivos..... | 17 |
| 10. | Marco Teórico..... | 19 |
| 10.1. | Estación total..... | 20 |
| 10.2. | GNSS | 21 |
| 10.3. | Sistemas de Información Geográfica..... | 23 |
| 10.4. | Datos Espaciales | 23 |
| 10.5. | Información Geográfica | 24 |
| 10.6. | Modelo Ráster..... | 25 |
| 10.7. | Modelo Vectorial | 26 |
| 10.8. | Modelos Digitales de Elevación (MDE)..... | 28 |
| 10.9. | Software CAD..... | 29 |
| 10.10. | Fotogrametría..... | 30 |
| 10.11. | LiDAR..... | 32 |
| 10.12. | Proyecciones Cartográficas..... | 34 |
| 10.13. | Postulado de Gauss | 34 |
| 10.14. | Clasificación de Proyecciones Cartográficas..... | 35 |
| 10.15. | Proyecciones más conocidas..... | 36 |
| 11. | Repaso Histórico..... | 43 |
| 11.1. | Historia del ferrocarril el Uruguay..... | 43 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 11.2. | El Transporte Público en Montevideo | 45 |
| 11.3. | El Tranvía como solución estructural para Montevideo | 47 |
| 12. | Marco Metodológico..... | 50 |
| 12.1. | Zona de estudio | 50 |
| 12.2. | Insumos para el trabajo | 51 |
| 12.2.1. | Imágenes Georreferenciadas..... | 51 |
| 12.2.2. | Relevamiento aéreo con sensor LiDAR de la Intendencia de Montevideo | 54 |
| 12.2.3. | Software | 55 |
| 12.2.4. | Parámetros de trazado | 56 |
| 12.3. | Trazado Planimétrico | 64 |
| 12.4. | Trazado Altimétrico | 67 |
| 12.4.1. | Procesamiento de superficie | 68 |
| 12.4.2. | Trazado de acordamientos verticales | 83 |
| 13. | Implementación de obra..... | 110 |
| 13.1. | Elección de Proyección Cartográfica..... | 110 |
| 13.2. | Universal Transversa Mercator..... | 111 |
| 13.2.1. | Convergencia plana meridiana..... | 111 |
| 13.2.2. | Coeficiente de deformación lineal para elementos infinitesimales..... | 114 |
| 13.3. | Proyección Local | 117 |
| 13.4. | Otras consideraciones en obras lineales..... | 120 |
| 14. | Conclusiones | 122 |
| 15. | Bibliografía | 125 |
| 16. | Anexo | 127 |

3. Resumen

El presente informe desarrolla un anteproyecto técnico para la implementación de un tranvía sobre Avenida Italia, en Montevideo, en el marco del proyecto de grado para la obtención del título de Ingeniero Agrimensor. El trabajo integra conocimientos de topografía, geodesia, cartografía y sistemas de información geográfica, aplicados al diseño geométrico de una obra lineal urbana de alta complejidad.

El proyecto aborda la formulación de un anteproyecto geométrico, que incluye el relevamiento topográfico del área, la generación y análisis de modelos digitales del terreno, y la selección de sistemas de referencia cartográficos adecuados para garantizar la coherencia espacial del diseño. Se detallan los insumos empleados, los cuales difieren parcialmente de los previstos en la idea inicial, lo que implicó la adaptación metodológica y la resolución de dificultades prácticas vinculadas tanto a la disponibilidad de datos como a su procesamiento.

En el diseño geométrico se exponen los criterios planimétricos y altimétricos adoptados, junto con el procesamiento y control de los modelos digitales para asegurar un trazado preciso y continuo. Además, se abordan aspectos vinculados a la implementación en terreno, tales como el control geométrico, la proyección cartográfica y los desafíos propios de trasladar el diseño al espacio físico.

Finalmente, el informe destaca el rol del Ingeniero Agrimensor y su capacidad para articular diversas competencias técnicas en el diseño de infraestructuras urbanas, aportando una base sólida para futuros estudios y proyectos relacionados.

4. Acrónimos

CAD: Computer-Aided Design

EGM08: Earth Gravitational Model 2008

GNSS: Global Navigation Satellite System

GPS: Global Positioning System

IGM: Instituto Geográfico Militar

IM: Intendencia de Montevideo

LiDAR: Light Detection and Ranging

MDE: Modelo digital de elevación

MDS: Modelo digital de superficie

MDT: Modelo digital de terreno

NTRIP: Networked Transport of RTCM via Internet Protocol

REGNA-ROU: Red Geodésica Nacional Activa de la República Oriental del Uruguay

RTK: Real Time Kinematic

SIG: Sistema de Información Geográfica

UTM: Universal Transversa de Mercator

WGS84: World Geodetic System 84

5. Índice de Tablas

| | |
|--|-----|
| Tabla N° 1. Códigos de imágenes en zona de estudio | 52 |
| Tabla N° 2. Longitudes mínimas posibles de cada acordamiento acoplado | 86 |
| Tabla N° 3. Longitudes mínimas posibles de cada acordamiento de viaducto..... | 91 |
| Tabla N° 4. Coordenadas de puntos a replantar..... | 97 |
| Tabla N° 5. Coordenadas de puntos a replantar con sus alturas relevadas..... | 101 |
| Tabla N° 6. Coordenadas de puntos a replantar con sus alturas relevadas ajustadas..... | 103 |
| Tabla N° 7. Coordenadas de puntos extras relevados con sus alturas tanto en terreno como MDT..... | 104 |
| Tabla N° 8. Estadísticos básicos de las diferencias de altura entre el MDT y el relevamiento GNSS..... | 106 |
| Tabla N° 9. Resultados cálculos de la convergencia plana meridana para cada punto..... | 112 |
| Tabla N° 10. Resultados cálculos de coeficiente k para cada punto..... | 114 |

6. Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura N° 1. “Proyecto Tren-Tram”..... | 14 |
| Figura N° 2. Estación total con sus ejes..... | 20 |
| Figura N° 3. Representación gráfica de triangulación espacial..... | 22 |
| Figura N° 4. Celdas con su valor temático asociado..... | 25 |
| Figura N° 5. Distintos tipos de resolución espacial..... | 26 |
| Figura N° 6. Entidades espaciales y su representación..... | 27 |
| Figura N° 7. Representación Gráfica de MDS y MDT..... | 29 |
| Figura N° 8. Ortoimagen (izquierda) y MDS (derecha), resultado de fotogrametría..... | 31 |
| Figura N° 9. Esquema básico de sistema LiDAR..... | 32 |
| Figura N° 10. Nube de puntos LiDAR sin filtrar (izquierda) y misma nube de puntos LiDAR filtrada por suelo (derecha)..... | 33 |
| Figura N° 11. Proyección Mercator..... | 36 |
| Figura N° 12. Proyección Mercator Transversa..... | 37 |
| Figura N° 13. Mapa de Uruguay con curvas de isoconvergencia γ de los meridianos para la proyección UTM..... | 39 |
| Figura N° 14. Mapa de Uruguay con curvas de isodeformación lineal k para la proyección UTM. | 41 |
| Figura N° 15. La primera locomotora llegada al Uruguay..... | 44 |
| Figura N° 16. Tranvía a caballo de la Asociación Nacional de Tranvías y Ferrocarriles del Norte. Década de 1910..... | 45 |
| Figura N° 17. Tranvía eléctrico Línea 6. Año 1926..... | 46 |

| | |
|--|----|
| Figura N° 18. Zona de estudio..... | 50 |
| Figura N° 19. Grilla de ortofotos en visualizador MonteviMap..... | 51 |
| Figura N° 20. Interfaz de software ArcMap..... | 54 |
| Figura N° 21. Interfaz de software Civil 3D..... | 55 |
| Figura N° 22. Corte transversal de vía..... | 57 |
| Figura N° 23. Corte transversal de faja tipo de 7 metros con tranvía modelo..... | 62 |
| Figura N° 24. Ortofotos en software Civil 3D..... | 63 |
| Figura N° 25. Intersección de tramos rectos en software Civil 3D..... | 64 |
| Figura N° 26. Intersección de tramos rectos en software Civil 3D..... | 65 |
| Figura N° 27. Trazado planimétrico en zona de arroyo malvin..... | 66 |
| Figura N° 28. Avenida Italia sobre arroyo malvin..... | 67 |
| Figura N° 29. Nube de puntos de la zona “LIDAR_MVD_2024_J-29-C-4-N-6” en software ArcScene..... | 68 |
| Figura N° 30. Nube de puntos filtrada resultado de extracción de puntos en faja de 75 metros..... | 70 |
| Figura N° 31. MDT en formato ráster..... | 71 |
| Figura N° 32. Superficie generada a partir del ráster en software Civil 3D..... | 71 |
| Figura N° 33. Capa vectorial de aceras sobre superficie en software Civil 3D..... | 73 |
| Figura N° 34. Polígono delimitado zona de estudio sobre superficie en software Civil 3D..... | 74 |
| Figura N° 35. Elementos urbanos sobre superficie en software Civil 3D..... | 74 |
| Figura N° 36. Ejemplo superficie de modelo ráster sin aplicar líneas de ruptura (celeste, verde y amarillo), en software Civil 3D..... | 76 |
| Figura N° 37. Ejemplo superficie de modelo ráster aplicando líneas de ruptura (celeste, verde y amarillo), en software Civil 3D..... | 76 |

| | |
|--|----|
| Figura N° 38. Ejemplo superficie de modelo nube de puntos sin aplicar líneas de ruptura (celeste, verde y amarillo), en software Civil 3D..... | 77 |
| Figura N° 39. Ejemplo superficie de modelo nube de puntos aplicando líneas de ruptura (celeste, verde y amarillo), en software Civil 3D..... | 77 |
| Figura N° 40. Perfil longitudinal del terreno a partir del modelo ráster, en software Civil 3D..... | 78 |
| Figura N° 41. Perfil longitudinal del terreno a partir del modelo nube de puntos en software Civil 3D..... | 78 |
| Figura N° 42. Diferencia máxima (0,053m) entre ambos perfiles longitudinales, en software Civil 3D..... | 79 |
| Figura N° 43. Diferencia máxima (0,096m) entre ambos perfiles longitudinales, en software Civil 3D..... | 80 |
| Figura N° 44. Diferencia máxima (0,068m) entre ambos perfiles longitudinales, en software Civil 3D..... | 80 |
| Figura N° 45. Cruces de calle por cantero central sobre ortoimagen. Fuente: Elaboración propia..... | 84 |
| Figura N° 46. Perfil longitudinal con condiciones base..... | 85 |
| Figura N° 47. Perfil longitudinal con longitudes mínimas posibles de cada acordamiento..... | 87 |
| Figura N° 48. Perfil longitudinal de trazado acoplado al terreno..... | 88 |
| Figura N° 49. Perfil longitudinal con condiciones base de viaducto..... | 90 |
| Figura N° 50. Perfil longitudinal con longitudes mínimas posibles de cada acordamiento en viaducto..... | 92 |
| Figura N° 51. Perfil longitudinal con trazado final y viaducto proyectado..... | 93 |
| Figura N° 52. Perfil longitudinal viaducto proyectado..... | 94 |

| | |
|---|-----|
| Figura N° 53. Perfil longitudinal de viaducto con puntos a replantear..... | 96 |
| Figura N° 54. Planimetría de puntos a replantear..... | 96 |
| Figura N° 55. Antena i73+ (izquierda) y i76 (derecha) en campo..... | 98 |
| Figura N° 56. Punto N°2 de replanteo en terreno (izquierda) y proyectado sobre ortoimagen (derecha)..... | 100 |
| Figura N° 57. Distribución de puntos para cálculos..... | 112 |
| Figura N° 58. Ejemplo esquemático de proyección local Transversa Mercator..... | 118 |
| Figura N° 59. Ejemplo de archivo prj para proyección local..... | 118 |

7. Introducción

En los últimos años ha resurgido, en Montevideo y su área metropolitana, el debate en torno a la incorporación de sistemas de transporte urbano más eficientes, sostenibles y estructuradores. Este interés se explica, en gran medida, por el notable proceso de urbanización y el incremento poblacional registrado en las zonas periféricas de la capital, particularmente en Ciudad de la Costa, departamento de Canelones. En este contexto, la implementación de un sistema de transporte que permita una conexión rápida y eficaz entre estas áreas y el núcleo urbano de Montevideo resulta de vital importancia. Tal es el caso que, en 2023, el Gobierno aprobó una iniciativa la cual propone el desarrollo de un sistema de tranvía que recorrerá aproximadamente 35 kilómetros, atravesando las principales arterias de la ciudad, como 18 de Julio, Avenida Italia y Avenida Giannattasio. Este proyecto, denominado “*Tren Tram*”, aún bajo evaluación técnica y de factibilidad, cuenta con un sitio web oficial donde se describen brevemente sus objetivos y alcances. (trentram.uy)

En este contexto, resulta pertinente explorar las implicancias técnicas que conlleva la implementación de un sistema tranviario urbano, desde una perspectiva profesional vinculada al campo de la Agrimensura.

El Ingeniero Agrimensor desempeña un rol fundamental en obras de infraestructura en todas las etapas de estas, no solo en el relevamiento inicial y el replanteo de elementos proyectados, sino también en el control geométrico de la ejecución. En obras lineales urbanas, este rol se ve ampliado por la necesidad de integrar información geoespacial precisa, establecer sistemas de referencia consistentes y garantizar que el proyecto se adapte a las condiciones reales del terreno y del entorno construido.

En este trabajo se propone el diseño de un anteproyecto geométrico de vía tranviaria sobre Avenida Italia, contemplando tanto el trazado en planta como el perfil longitudinal. Para ello, se genera un

modelo digital del terreno a partir de datos LiDAR provistos por la Intendencia de Montevideo, se evalúa su coherencia y se realizan las adaptaciones necesarias para transformarlo en una superficie de trabajo confiable.

Asimismo, se abordan aspectos cartográficos y geodésicos asociados a la extensión del proyecto, tales como la selección de una proyección cartográfica adecuada y otros aspectos a considerar a lo largo de la obra. Este enfoque integral permite reflejar de manera concreta las competencias adquiridas a lo largo de la formación en Agrimensura, y subraya el potencial de la profesión para participar activamente en el diseño de soluciones urbanas complejas.



Figura N° 1. “Proyecto Tren-Tram”. Fuente: trentram.uy

8. Fundamentación del Tema

El tema de estudio en este proyecto reviste especial relevancia por la posibilidad de aplicar, en un contexto real, los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera de Ingeniería en Agrimensura, enmarcados dentro de una obra lineal en un entorno urbano.

A través del desarrollo de este anteproyecto, se integran y ponen en práctica competencias específicas de la disciplina, como el relevamiento topográfico, la generación y análisis de modelos digitales del terreno, el procesamiento de datos espaciales mediante sistemas de información geográfica (SIG) y el trazado de caminos. En esta etapa, el anteproyecto constituye el nivel preliminar del diseño geométrico, donde se define la traza general y los parámetros básicos con información de precisión moderada, suficiente para evaluar la viabilidad técnica sin alcanzar aún el detalle propio de un proyecto ejecutivo.

Del mismo modo, el proyecto permite abordar aspectos cartográficos y geodésicos fundamentales para cualquier obra de esta naturaleza, tales como la selección del sistema de proyección y las consideraciones necesarias para llevar a la realidad los elementos proyectados.

Por otra parte, el análisis de una infraestructura lineal urbana de este tipo abre la posibilidad de incorporar otros campos de estudio propios de la Agrimensura, como la posible necesidad de expropiaciones en caso de que el trazado supere los límites del espacio público, o el estudio del impacto territorial y urbanístico que una obra similar podría generar. Estas consideraciones vinculan el rol técnico del Ingeniero Agrimensor con el ámbito del ordenamiento territorial y la planificación urbana, reforzando la visión integral que caracteriza la profesión.

En síntesis, la elección de este tema no busca generar una solución de transporte moderna, sino reflejar la amplitud de competencias técnicas y analíticas que el Ingeniero Agrimensor debe asumir frente a obras lineales y urbanas de gran envergadura, integrando su

conocimiento en topografía, geodesia, cartografía y gestión territorial al servicio del desarrollo urbano sostenible.

9. Objetivos

Para llevar a cabo el presente trabajo se plantearon diversos objetivos, de los cuales el más general y principal del mismo consiste en formular un anteproyecto técnico del trazado y obra de una vía de tranvía, a través del uso de herramientas y conocimientos aplicados a obras lineales urbanas adquiridos a lo largo de la carrera Ingeniería en Agrimensura, brindada por la Universidad de la República.

De manera más específica, se plantea generar un trazado geométrico de una vía de tranvía sobre la zona de estudio, calle Avenida Italia, limitado al nivel de definición propio de un anteproyecto. Esto involucra la realización de un relevamiento detallado sobre una zona crítica del recorrido, tal como son los alrededores del arroyo Malvín sobre la calle de interés, caracterizada por presentar pendientes contrarias pronunciadas. A partir de dicho relevamiento se espera contar con un modelo digital del terreno preciso para realizar diversos análisis planialtimétricos y proyectar lo deseado de manera correcta. Para ello, el método de relevamiento optado para efectuar el modelo corresponde a un vuelo de dron sujeto a sensor LiDAR y técnicas de fotogrametría.

Por otro lado, al ser un proyecto de obra lineal el cual conlleva una gran extensión sobre el territorio, surgen diversas cuestiones o problemáticas las cuales se deben considerar para trabajar de manera adecuada. Algunas de las principales se corresponden a la hora de realizar la obra y definir un sistema de referencia, del cual se implemente un marco de referencia, y así todos los profesionales involucrados puedan realizar sus labores en sincronía.

Para ello se espera responder las siguientes preguntas:

- ¿Qué inconvenientes se pueden afrontar al ejecutar una obra lineal?

- ¿Qué sistema de proyección cartográfica resulta el más adecuado para llevar a cabo un trabajo correspondiente a una obra de infraestructura lineal de gran extensión en sentido Este-Oeste?

10. Marco Teórico

A modo de repaso de conocimientos adquiridos durante el transcurso de la carrera, y plantear los conceptos que se utilizan para realizar la tarea propuesta en el presente documento, se definen aquellos conceptos teóricos de elementos y palabras que posteriormente se mencionan, y así eliminar la necesidad de brindar significados en cada caso. Algunos de ellos tratan de los instrumentos utilizados para adquirir las características del terreno, como Estación Total, GNSS o Tecnología LiDAR, los conocimientos necesarios acerca de estos resultados, como modelos de superficie, fotogrametría, entre otros, e información acerca del posicionamiento y proyección, etc.

El Ingeniero Agrimensor es un profesional universitario cuya formación está orientada a “*todo lo concerniente a la medición, determinación y control de emplazamientos geométricos espaciales, ya sea en el aspecto de su realización, como en el diseño ingenioso de su aplicación y utilización*” (Plan de Estudios de la carrera de Agrimensura, 1997). Esta definición resalta su capacidad técnica para intervenir en una amplia variedad de campos vinculados al territorio, integrando conocimientos científicos, tecnológicos y legales. Asimismo, su formación lo habilita a actuar de manera coordinada con otras disciplinas, aportando a procesos que van desde el relevamiento topográfico hasta la planificación territorial y el control geométrico de obras.

Para llevar a cabo dichas tareas se emplean diversas técnicas e instrumentos que han evolucionado de forma constante a partir de los avances tecnológicos. En el presente trabajo se contemplan y describen dos de los equipos más utilizados en la actualidad para la determinación precisa de la posición de puntos en el terreno: la estación total y el receptor GNSS.

10.1. Estación total

La estación total se define como un instrumento utilizado para medir ángulos y distancias. “*Total station is an instrument used to measure angles and distances. It is a combination of two types of instrument, a theodolite and an EDM (Electronic Distance Meter). The EDM measures the distance and the theodolite measures horizontal and vertical angles, in total that are three observations.*” (Bergkvist, J., 2015)¹.

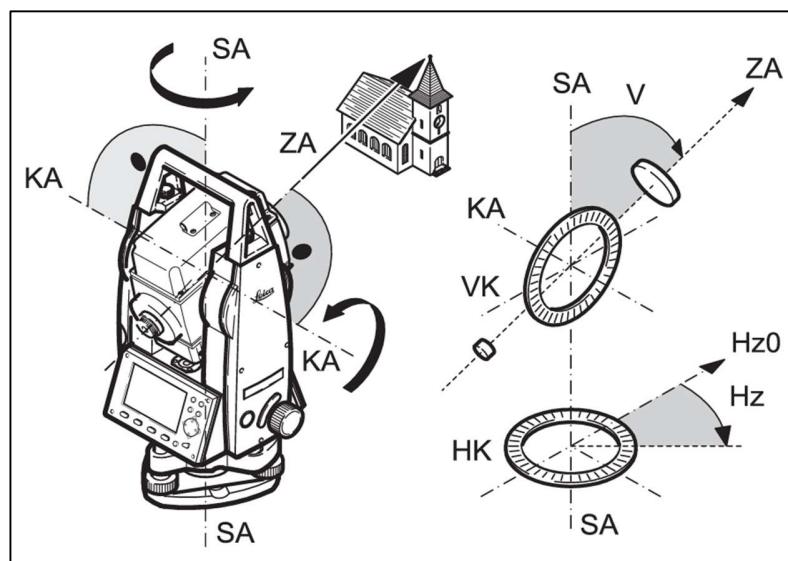


Figura N° 2. Estación total con sus ejes. Fuente: Leica Geosystems.

Dicho instrumento total permite realizar mediciones angulares en dos ejes, el eje principal (SA en Figura N°2), en el que se determina el ángulo horizontal (Hz en Figura N°2); y el eje de puntería o de colimación (ZA en Figura N°2), en el que se obtiene la pendiente de los elementos observados

¹ Traducción propia: La estación total es un instrumento utilizado para medir ángulos y distancias. Es una combinación de dos tipos de instrumentos: un teodolito y un distanciómetro electrónico (EDM). El EDM mide la distancia y el teodolito mide los ángulos horizontales y verticales; en conjunto se obtienen tres observaciones.

mediante el ángulo vertical o cenital (V en Figura N°2). Además, el distanciómetro integrado calcula la distancia mediante métodos electrónicos, habitualmente por medio de señales de luz modulada o láser.

Estos ángulos y distancias son registrados en la memoria interna del equipo, asignándole determinadas coordenadas cartesianas tridimensionales (X, Y, Z) a cada elemento registrado, según el sistema local establecido.

10.2. GNSS

Los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS, por sus siglas en inglés) es una tecnología que permite determinar la posición de un receptor en cualquier parte del mundo, mediante el uso de señales transmitidas por satélites artificiales. Esta tecnología ha revolucionado las tareas vinculadas a la georreferenciación, el posicionamiento y la navegación, y su uso se ha expandido ampliamente en áreas como la agrimensura, la ingeniería civil, el transporte y la agricultura de precisión. Así como introducen Berné [et al] en su texto “GNSS. GPS: fundamentos y aplicaciones en Geomática” (2014), el GNSS es la evolución de sistemas anteriores como el GPS estadounidense, incluyendo ahora múltiples constelaciones globales y regionales como GLONASS, Galileo, BeiDou, entre otras, lo que amplía la disponibilidad, cobertura y precisión del posicionamiento.

Cada constelación GNSS está compuesta por tres segmentos:

- **Segmento espacial:** Constituido por los satélites orbitando la Tierra y transmitiendo señales con información precisa de tiempo y posición.
- **Segmento de control:** Incluye estaciones en tierra responsables de monitorear y corregir las órbitas y relojes de los satélites.

- **Segmento del usuario:** Comprende los receptores GNSS encargados de captar las señales satelitales para determinar su posición en el espacio.

El funcionamiento del GNSS se basa en un principio de triangulación espacial. Cada satélite transmite una señal con la hora exacta de emisión y su posición orbital. El receptor, al captar señales de al menos cuatro satélites, puede resolver un sistema de ecuaciones basado en las distancias relativas calculadas a partir del tiempo que tarda la señal en llegar, logrando así estimar su ubicación y la sincronización de su reloj interno.

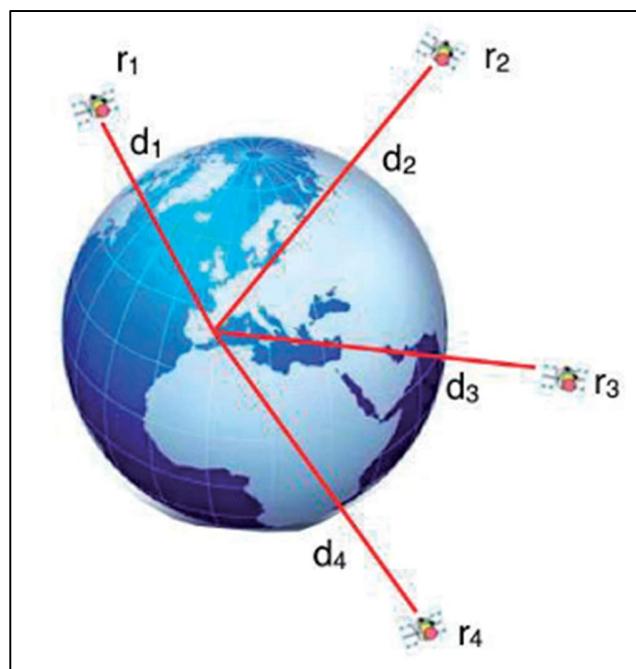


Figura N° 3. Representación gráfica de triangulación espacial. Fuente: Berné [et al] (2014).

El GNSS determina la distancia entre el receptor y los satélites midiendo el tiempo que tarda en llegar la señal (pseudodistancia), considerando que la señal viaja a la velocidad de la luz. Este cálculo se ve influido por diversos errores que deben ser corregidos: errores atmosféricos, relojes,

multitrayectoria, entre otros. Para una determinación precisa, el receptor necesita recibir señales limpias y simultáneas de múltiples satélites bien distribuidos en el cielo.

10.3. Sistemas de Información Geográfica

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son herramientas concebidas para la captura, almacenamiento, análisis y visualización de datos espaciales, permitiendo representar digitalmente la realidad geográfica mediante información georreferenciada (Olaya, 2020). Estas tecnologías posibilitan el procesamiento y la generación de productos cartográficos a partir de datos espaciales. Los datos dentro de un SIG son considerados el pilar fundamental que alimenta a todos los demás subsistemas, ya que sin ellos el sistema carecería de sentido o funcionalidad. Son necesarios para la visualización, el análisis y la representación espacial, actuando como el “combustible” que pone en marcha la totalidad del sistema.

En el marco del presente proyecto, se extrae información, de gran relevancia para el mismo, a partir del Sistema de Información Geográfica de la Intendencia de Montevideo, por como también se hace uso de diferentes softwares para poder visualizar los datos espaciales extraídos. La comprensión y la buena manipulación de los SIG resultan fundamentales para recabar, procesar y obtener resultados en el contexto de este proyecto.

10.4. Datos Espaciales

Los datos espaciales son un tipo particular de dato que contiene información sobre la posición de los objetos en el espacio, representada mediante coordenadas dentro de un sistema de referencia definido. Esta propiedad hace que el dato espacial no pueda tratarse como un dato convencional,

ya que la posición influye directamente en su interpretación y en los resultados de cualquier análisis.

10.5. *Información Geográfica*

La información geográfica, en cambio, se define como aquella que incluye una referencia espacial explícita, es decir, que puede ubicarse dentro de un sistema de coordenadas y estar asociada a un fenómeno o entidad del mundo real (Olaya, 2020). Está compuesta por dos componentes fundamentales:

Componente espacial: determina la posición de los elementos dentro de un marco de referencia geográfico, respondiendo a la pregunta “*¿dónde?*”

Componente temática: describe las propiedades o características de los fenómenos representados, respondiendo a la pregunta “*¿qué?*”

Ambas componentes son inseparables, ya que la información geográfica sólo adquiere significado cuando se asocia un atributo temático a una localización espacial determinada. La relación entre los datos espaciales y la información geográfica es jerárquica: los datos representan la base empírica, mientras que la información resulta del procesamiento e interpretación de esos datos dentro de un contexto analítico. Así, los datos espaciales pueden considerarse la forma estructurada mediante la cual se almacena y manipula la información geográfica en un SIG (Olaya, 2020).

Comprender esta relación es esencial para el trabajo del ingeniero agrimensor, quien debe asegurar que los datos espaciales utilizados en la modelización del territorio sean precisos, consistentes y

adecuadamente georreferenciados, garantizando así la confiabilidad de los productos derivados, como modelos digitales del terreno o planos de mensura.

Esta información geográfica ha de representarse mediante capas temáticas, las cuales se suelen incorporar por medio de dos tipos de modelos principales, el modelo vectorial y el modelo ráster.

10.6. *Modelo Ráster*

El modelo ráster es una forma de representar datos espaciales mediante una matriz regular de celdas (también llamadas píxeles), donde cada celda contiene un valor que representa una característica geográfica o temática del territorio.

| | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 80 | 74 | 62 | 45 | 45 | 34 | 39 | 56 |
| 80 | 74 | 74 | 62 | 45 | 34 | 39 | 56 |
| 74 | 74 | 62 | 62 | 45 | 34 | 39 | 39 |
| 62 | 62 | 45 | 45 | 34 | 34 | 34 | 39 |
| 45 | 45 | 45 | 34 | 34 | 30 | 34 | 39 |

Figura N° 4. Celdas con su valor temático asociado. Fuente: ESRI.

En este sentido, las ortofotos georreferenciadas constituyen una aplicación práctica del modelo ráster, ya que cada píxel contiene información espacial asociada a coordenadas reales del terreno. Estas imágenes pueden utilizarse directamente para el trabajo analítico y la generación de productos georreferenciados, como la digitalización de elementos, o generar un trazado vial planimétrico.

Como explica Olaya (2020), este modelo también es especialmente útil para representar variables continuas, como la altitud, la temperatura, la humedad o la cobertura del suelo, ya que permite

describir cambios graduales en el espacio con una resolución determinada por el tamaño de las celdas.

El nivel de detalle de entidades o fenómenos que representa un modelo ráster depende, en general, del tamaño de la celda, o la resolución espacial, del ráster.

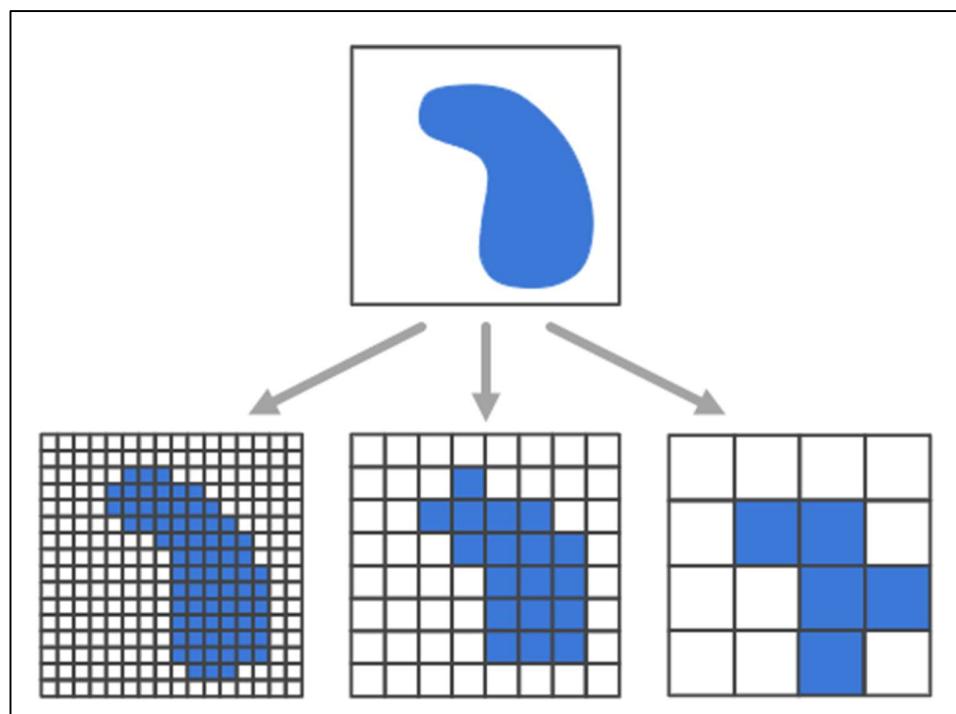


Figura N° 5. Distintos tipos de resolución espacial. Fuente: ESRI.

En el presente trabajo se hace uso de un modelo ráster el cual representa la altimetría del terreno, y así realizar diversos estudios sobre el mismo.

10.7. Modelo Vectorial

En este modelo, no existen unidades fundamentales que dividen la zona recogida, es decir, las celdas o píxeles de un modelo ráster, sino que se recoge la variabilidad y características de esta

mediante entidades geométricas, para cada una de las cuales dichas características son constantes.

El modelo vectorial se basa en entidades discretas, ya que modela el espacio geográfico mediante una serie de primitivas geométricas que son de tres tipos:

Puntos: Elementos del mundo real que se asocian a una sola localización (pozo, torre, núcleo urbano, etc.)

Líneas: Elementos que requieren de una secuencia de coordenadas espaciales (camino, límite, etc.)

Polígonos: Elementos que son representados por una secuencia de coordenadas que se encierran en un punto. (zonas urbanas, departamentos, manzanas, etc.)

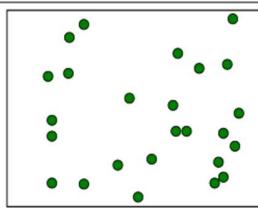
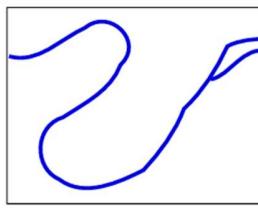
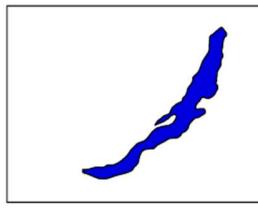
| Primitiva | Entidad espacial | Representación | Atributos | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|---|--|--|------------------------------|--------------------|-----------------|------|------|----|-----|-----|------|---|----|------|---|------|------|---|---|---|---|---|---|
| Puntos |  |  | <table border="1"> <thead> <tr> <th>ID</th><th>Altura</th><th>Diámetro Normal</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>17.5</td><td>35</td></tr> <tr><td>2</td><td>22</td><td>45.6</td></tr> <tr><td>3</td><td>15</td><td>27.2</td></tr> <tr><td>4</td><td>19.7</td><td>36.1</td></tr> <tr><td>.</td><td>.</td><td>.</td></tr> <tr><td>.</td><td>.</td><td>.</td></tr> </tbody> </table> | ID | Altura | Diámetro Normal | 1 | 17.5 | 35 | 2 | 22 | 45.6 | 3 | 15 | 27.2 | 4 | 19.7 | 36.1 | . | . | . | . | . | . |
| ID | Altura | Diámetro Normal | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 17.5 | 35 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 22 | 45.6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 15 | 27.2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 19.7 | 36.1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| . | . | . | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| . | . | . | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Líneas |  |  | <table border="1"> <thead> <tr> <th>Ancho máx(m)</th><th>Calado máx(m)</th><th>Longitud(km)</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>15</td><td>4.3</td><td>35</td></tr> <tr><td>6.3</td><td>3.9</td><td>5.2</td></tr> </tbody> </table> | Ancho máx(m) | Calado máx(m) | Longitud(km) | 15 | 4.3 | 35 | 6.3 | 3.9 | 5.2 | | | | | | | | | | | | |
| Ancho máx(m) | Calado máx(m) | Longitud(km) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | 4.3 | 35 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6.3 | 3.9 | 5.2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Polígonos |  |  | <table border="1"> <thead> <tr> <th>Superficie(km)²</th><th>Profundidad máx(m)</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>31494</td><td>1637</td></tr> </tbody> </table> | Superficie(km) ² | Profundidad máx(m) | 31494 | 1637 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Superficie(km) ² | Profundidad máx(m) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 31494 | 1637 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Figura N° 6. Entidades espaciales y su representación. Fuente: Olaya, V., “Sistemas de Información Geográfica”, (2020).

Dentro de un SIG, una capa vectorial puede contener un único tipo de primitiva, así, se tienen capas vectoriales de puntos, de líneas y de polígonos, respectivamente.

Para elaborar los estudios correspondientes en el presente proyecto se extraen capas vectoriales del Sistema de Información Geográfica de la Intendencia como puntos obtenidos del vuelo LiDAR, delimitación de canteros y veredas sobre la calle de interés, entre otros.

10.8. Modelos Digitales de Elevación (MDE)

Un modelo digital de elevación (MDE) se define como una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno (Felicísimo, A., M., s.f.). Estos MDE en el contexto del presente informe pueden diferenciarse en dos tipos, los modelos digitales de terreno (MDT) y los modelos digitales de superficie (MDS).

El MDT representa la topografía del terreno desnudo, es decir, sin considerar elementos superficiales como edificaciones, vegetación o infraestructuras. Este modelo refleja la morfología real del suelo y resulta esencial para el análisis altimétrico, el cálculo de pendientes, escorrentimientos y la planificación de obras civiles.

En cambio, el MDS incluye todas las elevaciones presentes en la superficie, incorporando tanto el terreno como los objetos que se encuentran sobre él, tales como árboles, construcciones o vehículos. Este modelo permite analizar el relieve aparente y es de utilidad para estudios urbanos, de visibilidad, sombreado y modelado tridimensional del entorno.

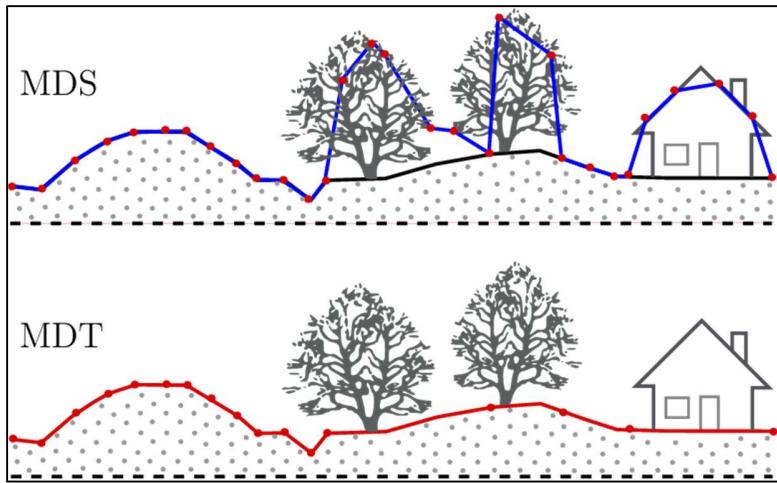


Figura N° 7. Representación Gráfica de MDS y MDT. Fuente: Carrilho, A., “Aplicação de técnicas de processamento e análise de imagens para detecção de edificações e vegetação a partir de dados LiDAR”, (2016).

10.9. Software CAD

Según Autodesk, el software de diseño CAD (Computer-Aided Design) es una tecnología orientada a facilitar la creación, el dibujo y la documentación técnica mediante medios digitales, reemplazando los métodos tradicionales de dibujo a mano por herramientas que priorizan la precisión y eficiencia en entornos digitales. Estos programas permiten a profesionales del diseño, la arquitectura y la ingeniería conceptualizar, visualizar mediante renderizados fotorrealistas, y simular el comportamiento real de sus proyectos (Autodesk, s.f.).

Esta herramienta es de vital importancia para el estudio y proyección que se contempla en el presente informe, ya que a partir de ella se permite manipular los datos base obtenidos y con ellos

diseñar lo estipulado. Específicamente se hace uso del software Civil CAD a lo largo de todo el proyecto.

10.10. Fotogrametría

Las siguientes instituciones reconocidas a nivel mundial definen la Fotogrametría de la siguiente manera. Según la Sociedad Americana de Fotografía y Teledetección (ASPRS), la Fotogrametría es el arte, la ciencia y la tecnología de obtener información cuantitativa y fiable sobre objetos físicos y el medio ambiente, mediante procesos de registro, medición e interpretación de imágenes y patrones de energía radiante electromagnética y otros fenómenos (ASPRS, s.f.). Por otro lado, la Sociedad Internacional de Fotogrametría y Sensores Remotos (ISPRS) define la Fotogrametría como “la ciencia encargada de realizar mediciones confiables por medio de fotografías para obtener características métricas y geométricas (dimensión, forma y posición) del objeto fotografiado” (ISPRS, s.f.).

Existen diversos criterios de clasificación de la fotogrametría, siendo los más conocidos la clasificación según la posición del sensor, donde se diferencia la fotogrametría aérea, la fotogrametría terrestre y la fotogrametría satelital; y la clasificación según el tipo de procesamiento, distinguiendo entre la fotogrametría analógica, fotogrametría analítica y la fotogrametría digital.

En el ámbito de la topografía, la fotogrametría aérea con drones se entiende como un procedimiento que permite obtener mediciones relacionadas con el tamaño, la forma y la ubicación de distintos elementos en el espacio. Mediante la captura y superposición de múltiples imágenes,

es posible generar representaciones tridimensionales que facilitan la elaboración de planos y modelos digitales de terreno de gran exactitud.

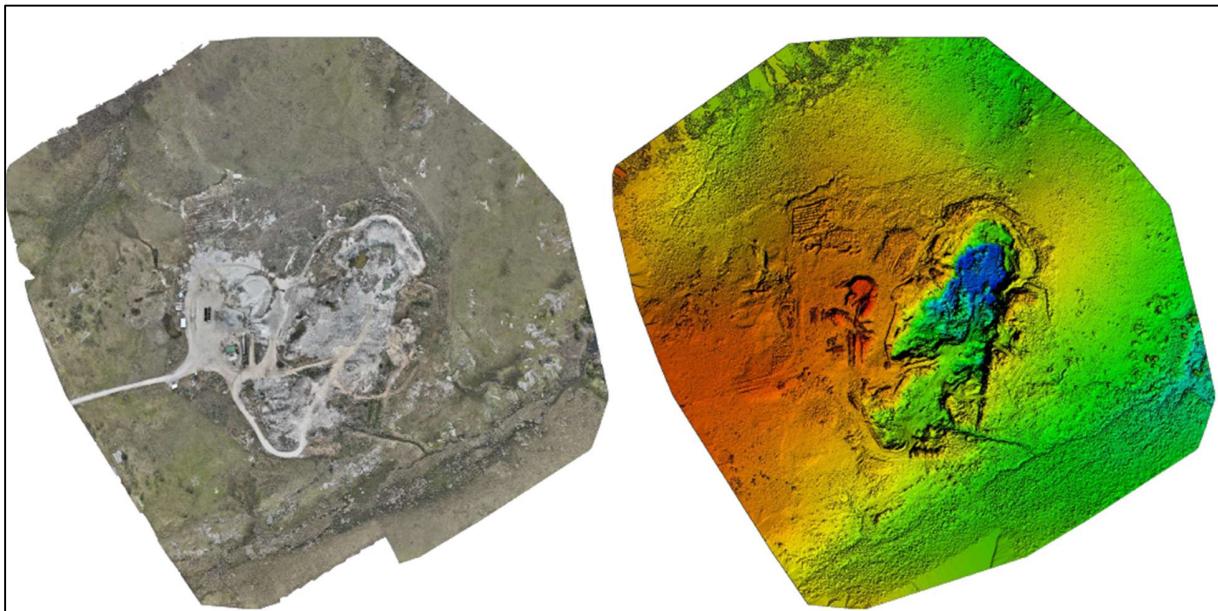


Figura N° 8. Ortoimagen (izquierda) y MDS (derecha), resultado de fotogrametría. Fuente:
Elaboración propia.

Uno de los principales productos resultantes del proceso fotogramétrico son las ortofotos. Estas se definen como “*Fotografía aérea digitalizada que se ha corregido geométricamente para eliminar las distorsiones, como la orientación de la cámara o las diferencias de elevación. Las ortofotos presentan la misma escala en toda la superficie y pueden usarse como mapa.*” (ESRI, s.f.). Las ortofotos constituyen un insumo fundamental en el desarrollo del proyecto, ya que proporcionan mapas base de alta precisión sobre los cuales se realiza el trazado de la vía tranviaria, garantizando una adecuada representación planimétrica del corredor y su entorno inmediato.

10.11. LiDAR

El término LiDAR proviene de la expresión en inglés Light Detection and Ranging, y designa una tecnología de teledetección activa que permite medir distancias mediante la emisión de pulsos láser hacia una superficie y el registro del tiempo que tarda cada pulso en regresar al sensor. Esta tecnología combina un escáner láser, un sistema de posicionamiento GNSS y una unidad de medición inercial (IMU), lo que le permite registrar millones de puntos con precisión en tres dimensiones (NOAA, 2012).

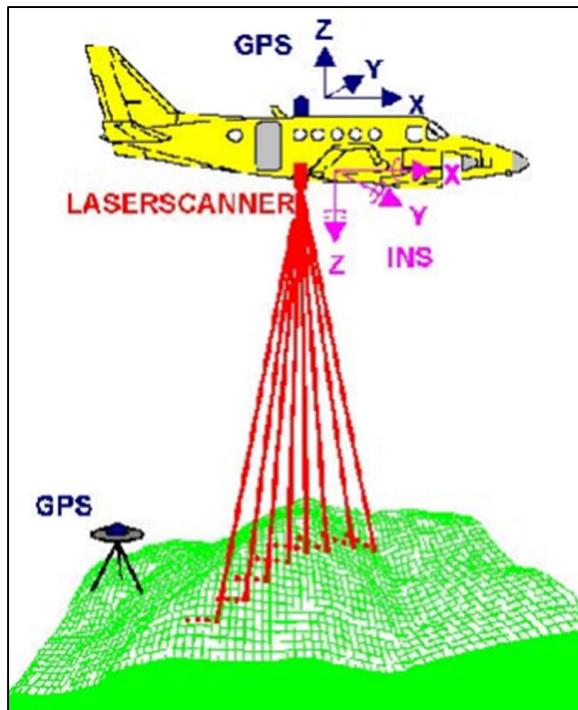


Figura N° 9. Esquema básico de sistema LiDAR. Fuente: NOAA, “Lidar 101: An Introduction to Lidar Technology, Data, and Applications”, (2012).

A diferencia de otros métodos topográficos convencionales o fotogramétricos, LiDAR tiene la capacidad de penetrar parcialmente la vegetación, permitiendo captar tanto la copa de los árboles como el suelo subyacente. Esta característica lo convierte en una herramienta particularmente valiosa para generar Modelos Digitales del Terreno (MDT) de alta resolución, incluso en áreas densamente forestadas o urbanas complejas.

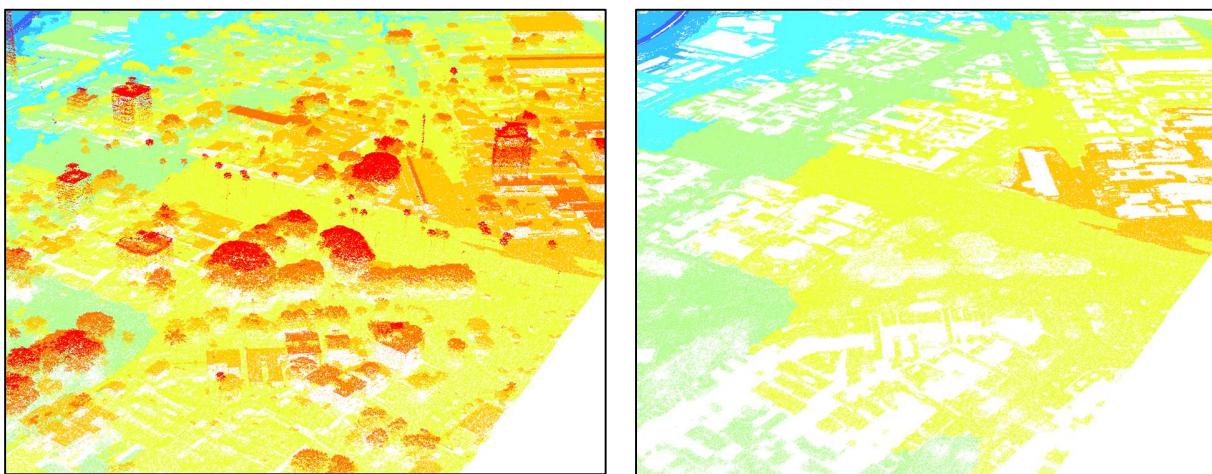


Figura N° 10. Nube de puntos LiDAR sin filtrar (izquierda) y misma nube de puntos LiDAR filtrada por suelo (derecha). Fuente: Elaboración propia.

Entre sus aplicaciones más relevantes se destacan el modelado topográfico de precisión, la planificación urbana, el monitoreo de costas y riberas, la ingeniería civil, la arqueología y la gestión de recursos naturales. Además, como señalan los autores, la tecnología LiDAR “*LiDAR data provides a consistent, high-resolution view of the landscape, which can be used to enhance or replace traditional mapping and surveying techniques*” (NOAA, 2012)².

² Traducción propia: Los datos LiDAR proporcionan una visión coherente y de alta resolución del terreno, que puede utilizarse para mejorar o sustituir las técnicas tradicionales de cartografía y topografía.

En el caso de este proyecto se utiliza una nube de puntos obtenidos con tecnología LiDAR para generar una superficie, procesándola y proyectando sobre esta, parte del trazado altímetro del anteproyecto.

10.12. Proyecciones Cartográficas

En “Apuntes de Cartografía Matemática” Ricardo Martínez en su introducción a la Cartografía Matemática, menciona que las proyecciones cartográficas constituyen una correspondencia biunívoca entre los puntos de dos superficies, de modo que, a cada punto de una, llamada “superficie objetiva”, le corresponde uno y solo uno de la otra, llamada “superficie subjetiva”, y viceversa. A los puntos correspondientes entre ambas se los denomina puntos homólogos. En general esta correspondencia se expresa por una relación matemática denominada Ley de la Proyección, que vincula las coordenadas de los puntos homólogos de ambas superficies.

10.13. Postulado de Gauss

El Postulado de Gauss expresa: “*Dos superficies son aplicables o desarrollables una sobre la otra cuando la curvatura total (CT) en cada uno de los puntos homólogos es la misma*”.

De forma más o menos intuitiva podemos decir que dos superficies son desarrollables o aplicables una sobre la otra cuando, considerando a una de ellas como flexible, se puede envolver con ella totalmente a la otra sin que se produzcan desgarros, estiramientos o pliegues.

Cuando no es posible desarrollar o aplicar una superficie sobre otra, se producen alteraciones o anamorfosis en las distancias, los ángulos y las áreas. Las proyecciones cartográficas pueden

condicionarse para que conserven alguna de las características geométricas mencionadas, pero sólo pueden conservar sin deformación, una de ellas a la vez. (Martínez, R., 2012).

10.14. Clasificación de Proyecciones Cartográficas

Las proyecciones cartográficas se pueden clasificar en función de diversos criterios. Según la naturaleza de la superficie subjetiva: proyecciones planas, proyecciones cilíndricas, proyecciones cónicas, proyecciones poliédricas. Según la naturaleza de la Ley de la proyección: proyecciones geométricas o propiamente proyecciones (si existe una construcción geométrica o proyectividad que vincula los puntos homólogos), proyecciones analíticas (si la Ley de la proyección sólo tiene expresión analítica y no geométrica). Según la posición de la superficie subjetiva respecto de la objetiva: polares en el caso de las planas o directas en el caso de las cilíndricas y de las cónicas (cuando el plano es tangente en el polo, o el eje del cilindro o del cono coincide con el eje polar terrestre respectivamente), ecuatoriales en el caso de las planas o transversas en el caso de las cónicas o cilíndricas (cuando el plano es tangente en el ecuador, o el eje del cilindro o del cono pertenece al plano del ecuador respectivamente), acimutales u oblicuas (cuando el plano es tangente a la superficie objetiva en un punto de latitud intermedia, o el eje del cilindro o del cono forma un ángulo de latitud intermedia, respectivamente). Según se intersecten o no las superficies subjetiva y objetiva: externas (si la superficie subjetiva es externa a la objetiva), tangentes (si la superficie subjetiva es tangente a la objetiva), secantes (si la superficie subjetiva es secante a la objetiva). Según la naturaleza de la característica geométrica que se conserva: equidistantes o automecoicas (cuando conservan las distancias), conformes (cuando conservan los ángulos), equivalentes (cuando conservan las áreas), afilácticas (cuando no conservan ninguna de las características) (Martínez, R., 2012).

10.15. Proyecciones más conocidas

Proyección Mercator:

Es una proyección cilíndrica conforme, que utiliza un cilindro tangente al elipsoide en el ecuador como superficie intermedia entre el elipsoide y el plano. El eje de revolución del cilindro coincide con el eje de la Tierra, por lo cual se dice que la proyección es directa. (Casanova, R., et al, 2012)

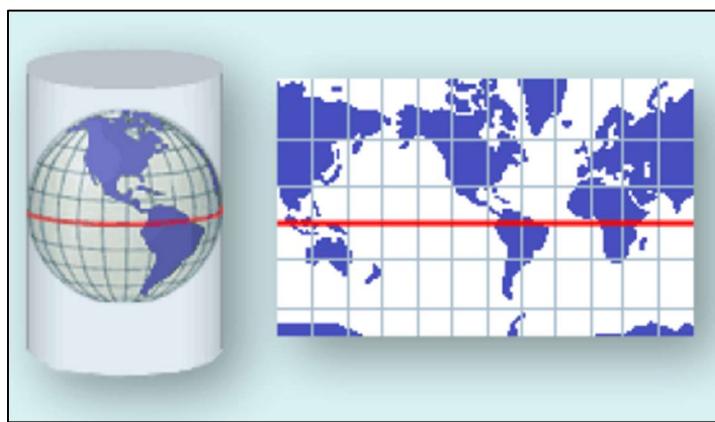


Figura N° 11. Proyección Mercator. Fuente:

http://nationalatlas.gov/articles/mapping/a_projections.html.

Proyección Mercator Transversa:

Es una variante de la proyección Mercator. En esta proyección el cilindro se ubica en forma transversal al elipsoide, donde el eje de revolución del cilindro es perpendicular al eje de la Tierra. (Casanova, R., et al, 2012)

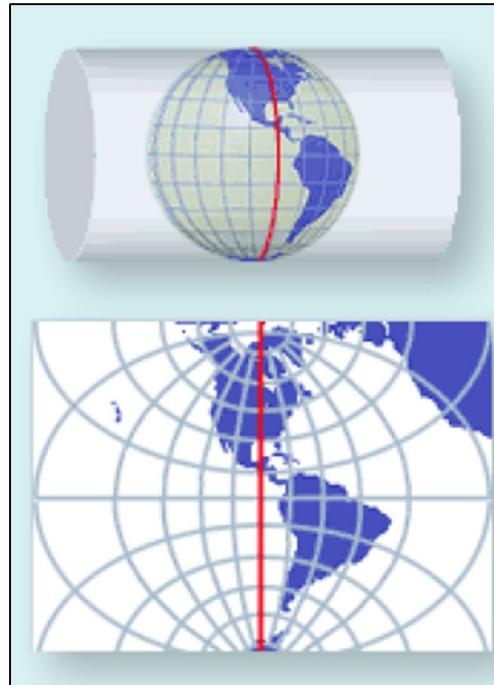


Figura N° 12. Proyección Mercator Transversa. Fuente:
http://nationalatlas.gov/articles/mapping/a_projections.html.

Proyección UTM:

La proyección Transversa de Mercator Universal es una proyección conforme, que utiliza un cilindro transversal como superficie intermedia entre el elipsoide y el plano. Es la proyección adoptada por la mayoría de los países del mundo. Permite representar sin deformaciones importantes la zona comprendida entre los paralelos 80°S y 84°N, quedando las zonas polares excluidas. Esta proyección es compuesta, ya que por cada huso se considera un cilindro tangente al meridiano central del huso, abarcando cada porción de la proyección 3° para cada lado del meridiano de contacto. De esta forma, la proyección UTM proporciona la ventaja de que ningún

punto se encuentra muy alejado del meridiano de contacto de su zona lo cual hace que las distorsiones sean menores. (Casanova, R., et al, 2012)

En la Proyección UTM, como en toda proyección cartográfica, el pasaje de una superficie terrestre a un plano implica necesariamente la introducción de deformaciones, tal como se mencionó anteriormente, debido al Postulado de Gauss. La magnitud y naturaleza de las deformaciones dependen de la proyección utilizada y de la posición geográfica del punto representado. Las deformaciones más relevantes al tratar con la proyección UTM son la convergencia plana de los meridianos y el coeficiente de deformación lineal para elementos infinitesimales.

Convergencia plana de los meridianos (γ)

La convergencia plana de los meridianos es el ángulo γ que forma la paralela al meridiano de contacto con la tangente transformada del meridiano en un punto considerado. También se puede definir como el ángulo entre la tangente a la transformada del paralelo que pasa por el punto considerado y la perpendicular al meridiano de contacto. (Martínes. R., 2010)

Para calcular la convergencia existe una fórmula la cual se detalla a continuación:

$$\gamma = \Delta\lambda * \operatorname{sen}(\varphi) + (\Delta\lambda^3/3) * \operatorname{sen}(\varphi) * \cos^2(\varphi) * (1 + 3n^2 + 2n^4)$$

Siendo n calculado de la siguiente manera:

$$n = \sqrt{\frac{e^2}{1-e^2}} * \cos(\varphi) \quad \text{tal que } e^2 = \frac{a^2-b^2}{a^2} \text{ es la excentricidad del elipsoide de referencia y "a"}$$

y "b" el semi eje mayor y semieje menor, respectivamente.

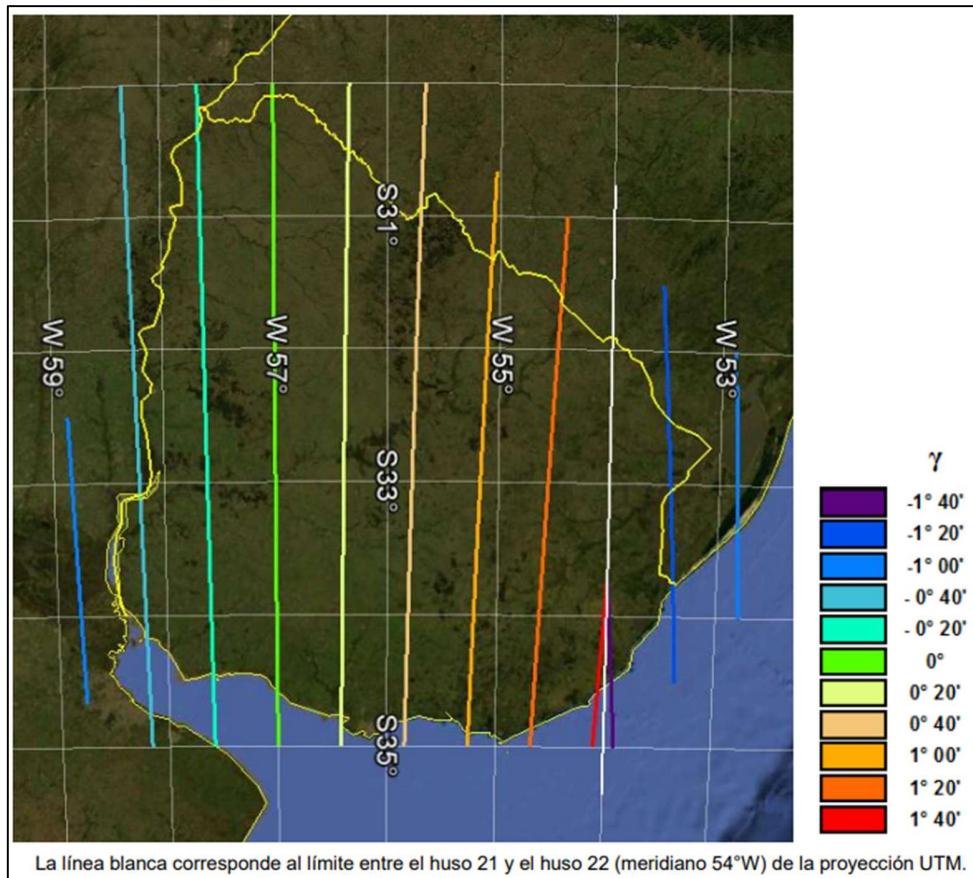


Figura N° 13. Mapa de Uruguay con curvas de isoconvergencia γ de los meridianos para la proyección UTM. Fuente: Striewe, E., Lopez, R. 2011.

En cuanto a la aplicación de este factor de deformación, una vez calculado el valor de la convergencia plana meridiana y conocido o medido el acimut de una línea, basta con hacer la suma de estas dos magnitudes para conocer el acimut de la línea en el plano de la proyección. Si el valor de la convergencia meridiana es positivo, el acimut transformado aumentará, y si el valor es negativo, el acimut transformado disminuirá.

Coeficiente de deformación lineal para elementos infinitesimales (k)

El coeficiente de deformación lineal k es la relación entre la longitud de la representación de un elemento de geodésica en el plano de Gauss, sobre la longitud de dicho elemento de geodésica en el elipsoide. (Martínez. R., 2010)

Para la proyección Gauss - Krüger se define la fórmula para calcular el mismo de la siguiente manera:

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

Donde “ n ” se calcula:

$$n = \sqrt{\frac{e^2}{1-e^2}} * \cos(\varphi)$$

Tal que $e^2 = \frac{a^2-b^2}{a^2}$ es la excentricidad del elipsoide de referencia y a y b los semi ejes mayor y semieje menor, respectivamente.

Analizando la fórmula se puede apreciar que k siempre es mayor o igual a 1, por lo que se puede afirmar que es un módulo de ampliación. Esto transmite que, las distancias medidas sobre el plano de proyección serán mayores que las medidas sobre la superficie original sin proyectar. (Martínez. R., 2010)

En cuanto al coeficiente de deformación lineal para la proyección UTM, el mismo se calcula igual que en el caso anterior, pero se debe tener en cuenta el factor de escala en el meridiano central, el cual es de 0.9996, multiplicando el miembro derecho de la fórmula por dicho valor. Esto se debe a que, al igual que la proyección Gauss Krüger, la proyección UTM es cilíndrica, transversa y

conforme, con la diferencia de que el cilindro en lugar de ser tangente al elipsoide es secante. Por lo tanto, el vínculo entre ambas proyecciones es una relación de homotecia, de modo que para pasar de la Gauss - Krüger a la UTM es necesario afectarla por un factor de homotecia de 0.9996.

Para la proyección UTM, la fórmula del coeficiente de deformación lineal k es la siguiente:

$$k = 0,9996 \times [1 + \frac{\Delta\lambda^2}{2} \times \cos^2(\varphi) \times (1 + n^2)]$$

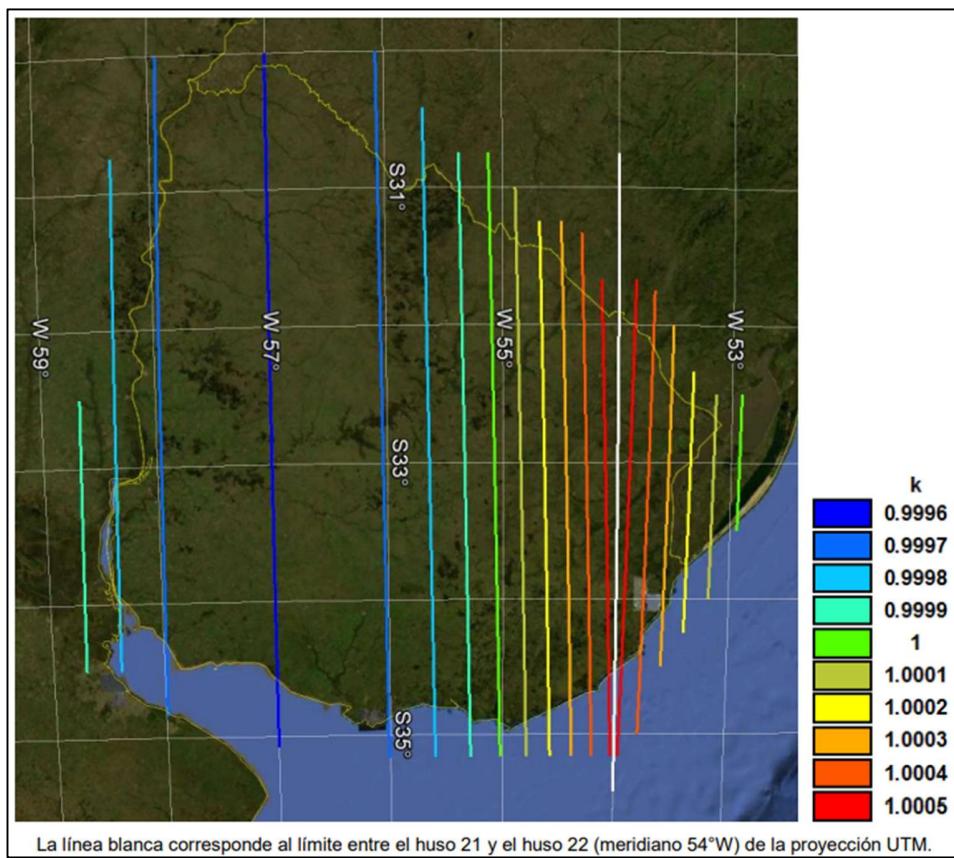


Figura N° 14. Mapa de Uruguay con curvas de isodeformación lineal k para la proyección UTM. Fuente: Striewe, E., Lopez, R. 2011.

La aplicación del factor de deformación lineal que sufre una línea geodésica del elipsoide al proyectarla en el plano se puede calcular de tres maneras, conociendo el largo de la línea geodésica

a proyectar. Una de ellas es simplemente multiplicando el largo de la línea por el valor promedio de k de los puntos extremos de la línea. Otra manera es multiplicar el largo de la línea por un valor de k calculado para el punto medio de la línea, diferenciándose del caso anterior ya que la variación del coeficiente no es lineal al apartarse del meridiano de contacto. Por último, se puede multiplicar el largo de la línea por un valor de k calculado de la siguiente manera:

$$k = (k_1 + 4 * k_m + k_2) / 6$$

Siendo k_1 y k_2 los valores de k para los puntos extremos, y el valor k_m es el k para el punto medio de la línea.

La elección de una proyección cartográfica adecuada depende de los objetivos del proyecto, del ámbito espacial a representar y del tipo de análisis a realizar. En el desarrollo del presente proyecto, se considera fundamental definir qué proyección utilizar para garantizar la correcta compatibilidad y transferencia de información entre los distintos profesionales involucrados, minimizando así posibles errores o inconsistencias en la interpretación de los datos geoespaciales.

11. Repaso Histórico

Desde los inicios de la Revolución Industrial, los sistemas ferroviarios y tranviarios se han establecido como uno de los avances tecnológicos más determinantes para la transformación económica, social y territorial del mundo moderno, marcando con su evolución la transición de tecnologías rudimentarias a sistemas complejos y globales. Sus orígenes pueden rastrearse hasta los sistemas mineros de Europa del siglo XVIII, donde ya se empleaban rieles de madera o hierro para facilitar el transporte de minerales en carros tirados por caballos.

11.1. Historia del ferrocarril el Uruguay

El surgimiento de la industria ferroviaria en Uruguay se da en el año 1866 a partir de la fundación de la sociedad anónima llamada “Ferrocarril Central del Uruguay”, alcanzando en el año 1869 la inauguración del primer tramo del mismo, con una extensión de 17 kilómetros que abarcaba desde Bella Vista (Montevideo) hasta Las Piedras (Canelones). A lo largo de los años siguientes se da continuación a dicha vía férrea, hasta conectar el sur y el norte del país en el año 1913. A su vez de la construcción del ferrocarril central, otras compañías llevaron a cabo diversas extensiones a partir de concesiones o cesiones, donde algunas de ellas empalman con la vía de ferrocarril central.

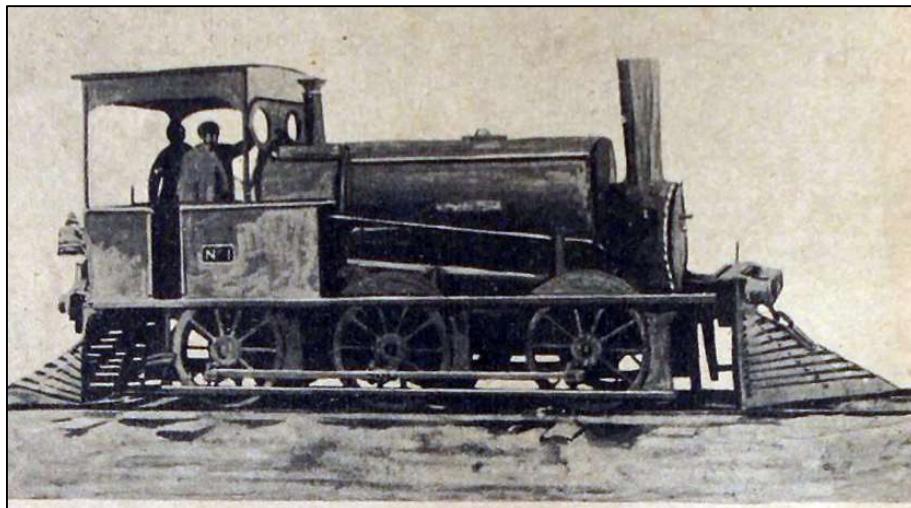


Figura N° 15. La primera locomotora llegada al Uruguay. Fuente:

<https://www.afe.com.uy/historia/>

Con el transcurso de los años se aprecia un declive del sistema ferroviario ya que el mismo competía con el transporte de carretera, además de otras problemáticas como el envejecimiento de la infraestructura de este y el mal mantenimiento, la mala gestión y desinversión, entre otros. Desde la década del 1960 se reducen las frecuencias, se anulan ciertos tramos de la red y se eliminan servicios de transporte de pasajeros en muchas regiones.

Cercano a la actualidad, en el 2020 con la llegada de UPM 2 se inicia el proyecto de Ferrocarril Central, rehabilitando 273 kilómetros entre Montevideo y Paso de los Toros para el transporte de carga.

Hoy en día, el uso del ferrocarril en Uruguay está centrado en la carga, especialmente en la mencionada red central diseñada para UPM 2, mientras que el transporte de pasajeros es casi inexistente, donde el único servicio vigente es el de Tacuarembó - Rivera.

11.2. El Transporte Público en Montevideo

El desarrollo del transporte público en Montevideo ha estado estrechamente vinculado al crecimiento urbano y a los cambios tecnológicos, sociales y económicos que atravesó la ciudad desde la época colonial hasta la actualidad.

Durante el periodo colonial y buena parte del siglo XIX, la movilidad se basaba en medios de tracción animal, principalmente carretas tiradas por bueyes o mulas y carrozillas a caballo. Este sistema respondía a una estructura urbana incipiente y a una demanda de transporte limitada (Frega, A.,2024).

La modernización del transporte urbano comienza con la llegada del tranvía a caballo en 1868, operado por la empresa Tramway de Montevideo. Este nuevo medio permite conectar distintos puntos de la ciudad con mayor regularidad y capacidad que los carrozillas particulares.



Figura N° 16. Tranvía a caballo de la Asociación Nacional de Tranvías y Ferrocarriles del Norte. Década de 1910. (Foto: 178FMHB.CMDF.IMM.UY - Autor: S.d./IM)

En 1906 se produjo un hito tecnológico con la electrificación de la red, lo que representó un gran avance en términos de velocidad, autonomía y eficiencia operativa. Durante las décadas de 1920 y 1930, el tranvía eléctrico se consolidó como el principal medio de transporte urbano, acompañando el crecimiento de la ciudad hacia nuevos barrios y periferias (Intendencia de Montevideo, s.f.).



Figura N° 17. Tranvía eléctrico Línea 6. Año 1926. (Foto: 4278FMHG.CMDF.IMM.UY - Autor: S.d./IM)

A partir de mediados del siglo XX, el sistema tranviario comenzó a declinar debido a la introducción del ómnibus a gasolina y diésel, que ofrecía mayor flexibilidad y menores costos de infraestructura y operación. La falta de inversión y el envejecimiento del parque tranviario aceleraron su desaparición, circulando el último tranvía el 14 de abril de 1957, lo que marcó el fin

de una etapa. Desde entonces, la red de transporte público se sustentó exclusivamente en ómnibus, consolidando una estructura radial centrada en la terminal de Tres Cruces (Frega, A., 2002).

Desde fines del siglo XX, Montevideo ha impulsado diversas reformas del transporte urbano, tales como la renovación de la flota, la implementación del pago electrónico, la incorporación de GPS y la creación de corredores exclusivos. Sin embargo, persisten problemas estructurales como la congestión vehicular, la saturación de líneas troncales y la escasa diversificación modal.

En este contexto, el tranvía ha vuelto a considerarse una alternativa viable frente a los desafíos de movilidad sostenible. Inspiradas en experiencias internacionales, han resurgido propuestas locales que plantean su implementación en corredores estratégicos como Avenida Italia, buscando mejorar la eficiencia del sistema, reducir el impacto ambiental y revalorizar la movilidad sobre rieles como opción moderna y sustentable (Frega, A., 2024).

11.3. El Tranvía como solución estructural para Montevideo

En el contexto del progresivo deterioro del transporte público en Montevideo y su área metropolitana, el tranvía emerge como una alternativa concreta, eficiente y sostenible para revertir tendencias negativas y reestructurar la movilidad urbana. Desde mediados de los años 90, el sistema de transporte público ha experimentado un marcado descenso en la cantidad de usuarios: en 1995 se vendían 350 millones de boletos urbanos al año, cifra que cayó a 210 millones en 2022. Este retroceso no responde únicamente a la pandemia de COVID-19, sino que constituye un fenómeno estructural, influido por el aumento sostenido del parque automotor privado, la falta de eficiencia del sistema de transporte colectivo, y la ausencia de jerarquización modal en la circulación urbana (CINVE, 2023).

En ese marco, el tranvía eléctrico se presenta como una opción adecuada para Montevideo por múltiples razones técnicas y sociales. En primer lugar, responde al rango de demanda existente en los corredores principales —en torno a 3.000 pasajeros por hora por sentido en zonas urbanas y 1.000 en zonas suburbanas—, que supera las capacidades del sistema de ómnibus convencional pero no justifica infraestructuras de metro pesado. Además, el tranvía puede operar con vehículos de gran capacidad y alta frecuencia, mejorando los tiempos de viaje, reduciendo el hacinamiento y elevando la calidad percibida del servicio.

A diferencia del sistema actual, cuya velocidad operativa promedio ronda los 15–16 km/h, el tranvía puede alcanzar velocidades significativamente superiores en entornos urbanos, especialmente cuando circula por plataformas segregadas con prioridad semafórica. Esto lo convierte en una alternativa competitiva frente al automóvil particular, ayudando a revertir el avance de la movilidad individual, que hoy representa más del 50% de los viajes motorizados en Montevideo. Desde el punto de vista ambiental, el tranvía opera con propulsión eléctrica y cero emisiones locales, alineándose con los objetivos climáticos y de calidad del aire de la ciudad.

Entre los corredores analizados, el eje Avenida Italia destaca como el más apto para la implementación de un primer tramo de tranvía. Esta franja concentra una alta demanda de viajes, posee un perfil urbano con capacidad para albergar doble vía con interferencia reducida, y conecta áreas residenciales, comerciales y de servicios clave. Su intervención permitiría estructurar un eje central de movilidad, integrable con otros modos mediante sistemas alimentadores, bicicletas y transporte activo, generando un efecto red a nivel metropolitano.

Por sus características, el tranvía no solo ofrece ventajas operativas, ambientales y sociales, sino que permite transformar estructuralmente el espacio urbano, jerarquizando el transporte público y generando incentivos para la movilidad sostenible. En suma, representa una solución moderna y

eficiente que, con la debida planificación y compromiso institucional, puede convertirse en pilar fundamental del nuevo paradigma de movilidad que Montevideo necesita.

12. Marco Metodológico

12.1. Zona de estudio

La zona de estudio propuesta para el desarrollo del presente anteproyecto corresponde al corredor de Avenida Italia. En su concepción original, el trazado se plantea desde las inmediaciones del supermercado Géant sobre Avenida Giannattasio (departamento de Canelones) hasta la Terminal Tres Cruces, en el centro de la capital. Sin embargo, por motivos técnicos y de alcance del anteproyecto, se definen límites operativos más restringidos.

El tramo final en sentido al centro se delimita en el entorno del Hospital de Clínicas, justamente frente al hospital. Esta decisión responde a la complejidad técnica que implicaría atravesar el túnel de Avenida Italia, tanto por su estructura soterrada como por las interferencias con otras infraestructuras existentes.

En el otro extremo, en dirección este, el trazado se limita hasta la calle Lido, en las cercanías del Arroyo Carrasco. A partir de ese punto, la avenida presenta nuevas dificultades técnicas, como el cruce por el puente del arroyo Carrasco y el puente de las Américas, estructuras que demandan estudios estructurales de mayor profundidad, ajenos al alcance del presente trabajo.

Si bien el anteproyecto se concentra dentro de estos límites, se considera relevante abrir la discusión hacia posibles extensiones del trazado en etapas futuras, así como la exploración de ramales secundarios en sectores estratégicos. Estas alternativas podrían complementar la cobertura del sistema y mejorar la conectividad transversal en otras zonas de la ciudad.

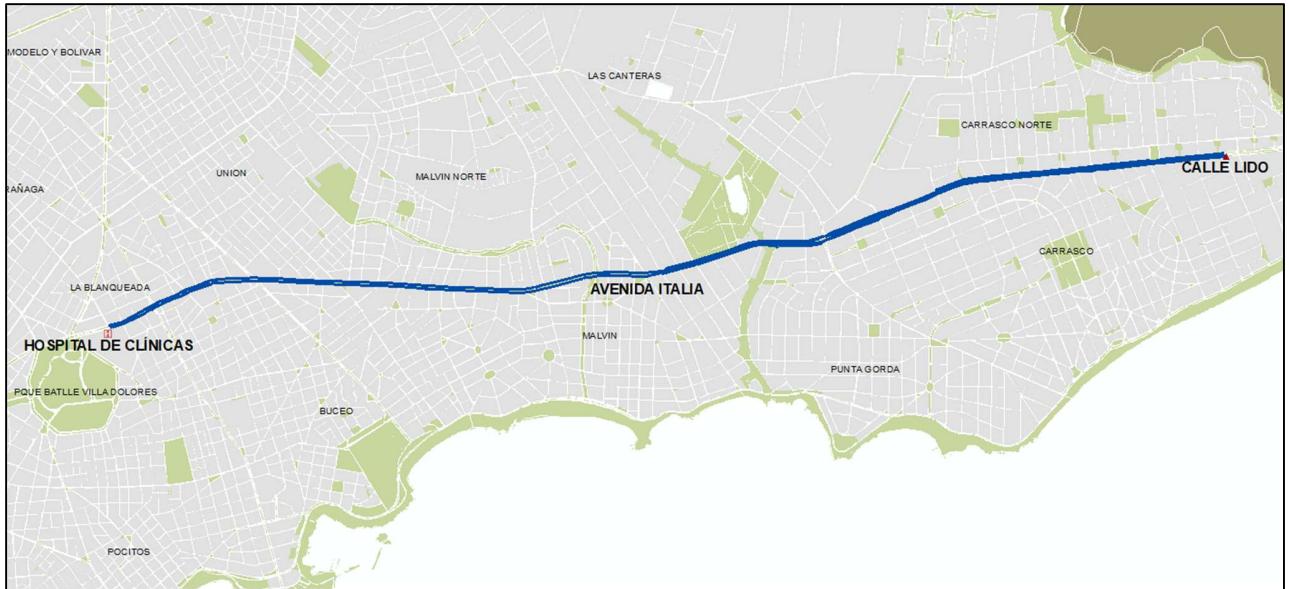


Figura N° 18. Zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.

12.2. *Insumos para el trabajo*

Para la ejecución del presente trabajo resulta necesario implementar ciertas herramientas destinadas al estudio y análisis de la obra de infraestructura a desarrollar. Las mismas se destacan a continuación.

12.2.1. *Imágenes Georreferenciadas*

Para el desarrollo del presente trabajo es necesario contar con datos geoespaciales actualizados y de libre acceso, principalmente imágenes aéreas de alta resolución de la Intendencia de Montevideo, que proporciona datos actualizados y detallados para el departamento de Montevideo. Particularmente, dispone de un mosaico de ortofotos generado a partir de un vuelo fotogramétrico

realizado en el año 2021, con una resolución de 10 centímetros por píxel. Este insumo representa un recurso de gran resolución, clave para el análisis urbano requerido en este proyecto.



Figura N° 19. Grilla de ortofotos en visualizador MonteviMap. Fuente: Elaboración propia.

Las imágenes aéreas georreferenciadas de uso libre según resolución 640/10 de la Intendencia Municipal de Montevideo de fecha 22/02/2010, deben ser solicitadas al correo electrónico del Servicio de Geomática de la Intendencia de Montevideo (sig@imm.gub.uy), indicando los códigos de imagen previamente identificados. Para solicitar estas imágenes se procede a identificar los códigos de las imágenes que abarcan la zona de estudio, mediante el visualizador MonteviMap, teniendo como resultado la siguiente tabla:

| <i>ID GRILLA</i> |
|-------------------------|
| <i>J-29-C-3-O-8</i> |
| <i>J-29-C-4-M-4</i> |
| <i>J-29-C-4-M-5</i> |
| <i>J-29-C-4-M-6</i> |
| <i>J-29-C-4-M-7</i> |
| <i>J-29-C-4-M-8</i> |
| <i>J-29-C-4-N-4</i> |
| <i>J-29-C-4-N-5</i> |
| <i>J-29-C-4-N-6</i> |
| <i>J-29-C-5-M-2</i> |
| <i>J-29-C-5-M-3</i> |
| <i>J-29-C-5-M-4</i> |
| <i>J-29-C-5-M-5</i> |
| <i>J-29-C-5-N-1</i> |
| <i>J-29-C-5-N-2</i> |
| <i>J-29-C-5-N-3</i> |
| <i>J-29-C-6-M-1</i> |
| <i>K-29-D-6-N-9</i> |

Tabla N° 1. Códigos de imágenes en zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Las imágenes que se obtienen en el vuelo fotogramétrico que realiza la Intendencia de Montevideo en el año 2021 se utilizan como base para el trazado planimétrico del anteproyecto. Al momento de desarrollar esta etapa, a comienzos de 2025, no se encuentran disponibles imágenes más recientes correspondientes al vuelo efectuado en 2024. No obstante, esta situación no representa una limitación significativa, dado que en el corredor de Avenida Italia no se registran modificaciones estructurales que afectan el trazado previsto para la vía tranviaria.

12.2.2. Vuelo fotogramétrico y LiDAR de la Intendencia de Montevideo

En octubre y noviembre del año 2024 la Intendencia de Montevideo realiza un vuelo fotogramétrico con el cual relevó más de 600 kilómetros cuadrados con una tecnología que permite contar con datos de alta densidad y precisión, tecnología LiDAR.³

De este relevamiento se obtiene, por un lado, las ortofotos con resolución de 5 centímetros por píxel gracias a la cámara PhaseOne, y, por otro lado, se obtiene una nube de puntos la cual proporciona datos tridimensionales precisos, gracias al sensor LiDAR. Esta información brindada por la IM para todo público es de mucha utilidad para diversos motivos, permitiendo realizar diversos estudios y análisis como por ejemplo visualizar perfiles urbanos precisos, identificar formas y características de edificios, analizar vegetación e infraestructura urbana, entre otros.

³ Dicho relevamiento se elaboró con una cámara PhaseOne de 100 megapíxeles y un sensor LiDAR Trimble capaz de emitir 400.000 puntos láser por segundo. (Intendencia de Montevideo, 2025)

En el caso del presente trabajo, estos datos proporcionados por la IM son de gran ayuda, ya que se utilizarán para planificar y proyectar sobre la zona de estudio, conociendo la topografía existente a partir del modelo digital de superficie.

12.2.3. *Software*

El software de sistema de información geográfica que se opta por emplear para la elaboración de la propuesta, corresponde al ArcMap, perteneciente a la plataforma ArcGIS de ESRI, como entorno principal de trabajo para el tratamiento y análisis de la información geográfica.

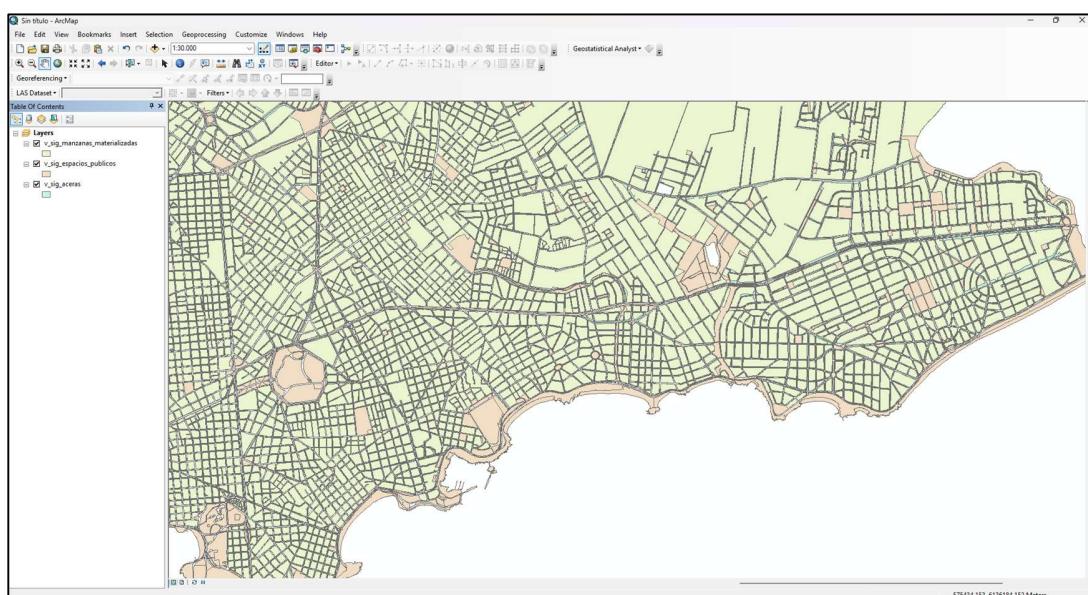


Figura N° 20. Interfaz de software ArcMap. Fuente: Elaboración propia.

Así mismo, en también se emplea el software de diseño CAD Civil 3D, el cual es una solución especializada de Autodesk que permite trabajar con modelos digitales del terreno, así como

integrar ortofotos y capas vectoriales georreferenciadas. Este sistema resulta especialmente útil en la etapa de anteproyecto, ya que posibilita proyectar las obras directamente sobre los mencionados insumos.

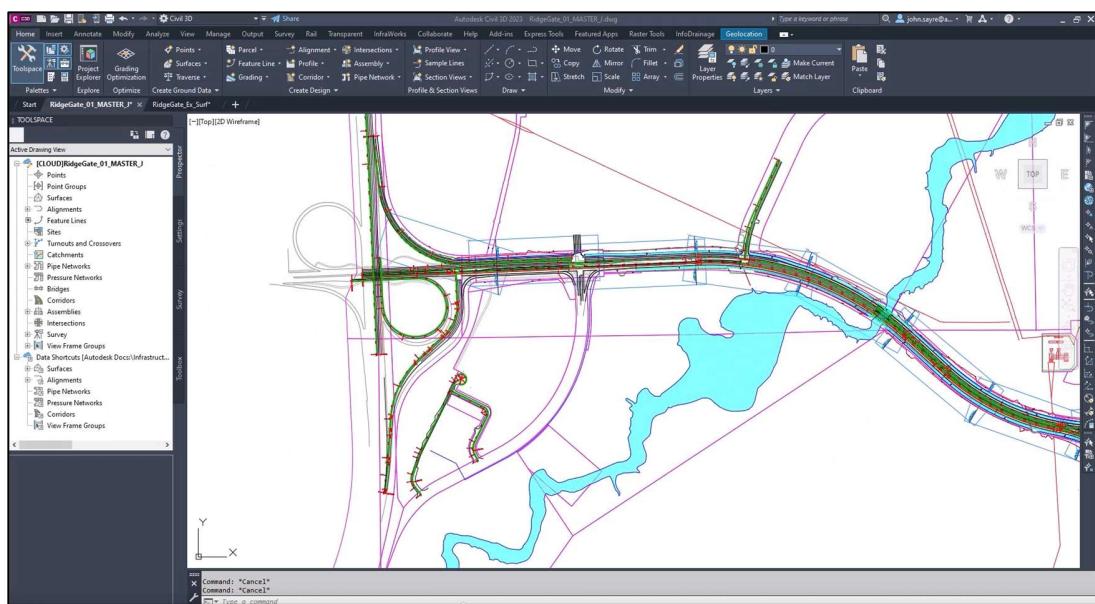


Figura N° 21. Interfaz de software Civil 3D. Fuente: Autodesk.

12.3. Parámetros de trazado

La definición de los parámetros geométricos adoptados para el diseño preliminar de la vía tranviaria se fundamenta en el estudio de documentación técnica internacional y antecedentes nacionales relevantes. Como fuente principal se utiliza el *Track Design Handbook for Light Rail Transit* publicado por la *Transportation Research Board* (TRB), el cual establece criterios normativos y recomendaciones para sistemas de tren ligero en contextos urbanos (Transportation Research Board, 2012).

Asimismo, se analizan estudios técnicos y memorias de diseño correspondientes a proyectos de tranvías en funcionamiento en distintos países, tales como Australia, España, Finlandia, Francia y Suiza. A nivel nacional, también se tienen en cuenta parámetros utilizados en el Proyecto Ferroviario Central, cuyas obras concluyeron en diciembre de 2023. Se consideran archivos técnicos disponibles y experiencias acumuladas durante la ejecución de dicho corredor ferroviario, particularmente en lo referente a secciones de vía en entornos urbanos y transiciones geométricas.

Para dimensionar las características del material rodante que circularía sobre la vía propuesta, se toma como referencia el modelo Citadis X05 (305), de la empresa francesa Alstom, ampliamente utilizado en ciudades como Barcelona y otras con redes de tranvía moderno.

Cabe aclarar que los parámetros geométricos que se adoptan en esta instancia responden a un trazado básico y preliminar, propio de un anteproyecto de carácter académico. Las definiciones aquí presentadas no contemplan la totalidad de los recaudos técnicos, constructivos y normativos requeridos para el diseño definitivo de una vía tranviaria. (Los parámetros empleados, así como sus descripciones conceptuales y el desarrollo técnico ampliado, se encuentran disponibles en el Anexo 16.1).

12.3.1. *Planimetría*

Ancho de vía

Al tratarse de un caso en el que no existe una red de vías en operación, con un ancho de vía determinado, se opta como ancho de vía, o trocha, el estándar internacional, el cual es de 1.435 metros.

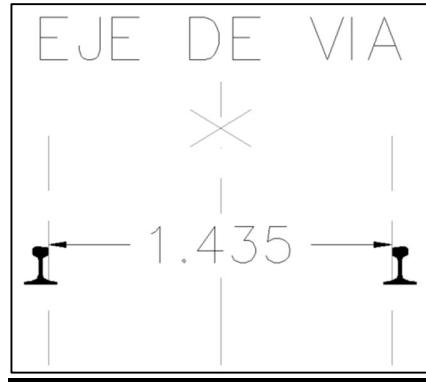


Figura N° 22. Corte transversal de vía. Fuente: Elaboración propia.

Velocidad de diseño o máxima

El vehículo que se adopta como ejemplo para implementar en la vía tiene como característica una velocidad máxima de 80 km/h (Alstom S.A., 2020). A su vez, la velocidad máxima permitida en varios tramos de Avenida Italia para el resto de los vehículos es de 75 km/h. Por lo tanto, resulta adecuado definir como velocidad máxima de diseño los 60 km/h, lo cual no quiere decir que el tranvía siquiera llegue a esas velocidades en la práctica, simplemente la vía estará diseñada de tal forma para que sea posible circular a esta velocidad de diseño.

$$v = 60 \text{ km/h}$$

Longitud mínima de tramo recto entre curvas horizontales

La longitud mínima de recta entre curvas con sentido opuesto debe ser, al menos, igual a la longitud del vehículo más largo que circulará por el sistema. En este caso se implementa un vehículo de 37 metros.

$$L_i = 37 \text{ m}$$

Radio y longitud de curvas circulares

El radio mínimo de diseño para vías principales en sistemas de tren ligero, según la literatura técnica, se establece en torno a 25 metros (Transportation Research Board, 2012), el cual coincide con las prestaciones técnicas del vehículo utilizado como ejemplo de aplicación (Alstom S.A., 2020).

$$R = 25 \text{ m}$$

Para asegurar una transición adecuada y evitar giros abruptos, la longitud mínima recomendada para una curva circular sin peralte con esta velocidad de diseño es:

$$L_c = 34,2 \text{ m}$$

12.3.2. Altimetría

El alineamiento vertical en un sistema de tren ligero se compone de segmentos con pendiente constante, los cuales están conectados entre sí mediante curvas parabólicas verticales.

Longitud mínima de tramo recto entre curvas verticales

Según las recomendaciones de diseño, la longitud deseada de estos tramos rectos debe ser de al menos 30 metros. Alternativamente, puede calcularse al igual que en los tramos rectos entre curvas horizontales.

$$L = 34,2 \text{ m}$$

Pendientes máximas

Para garantizar un funcionamiento seguro y eficiente del tren ligero, las pendientes en las vías deben mantenerse dentro de ciertos límites, según la longitud del tramo:

- En tramos largos sin límite de extensión, la pendiente no debe superar el 4 %.
- Si la distancia entre los puntos de cambio de pendiente es de hasta 750 metros, se permite una pendiente de hasta 6 %.
- En tramos cortos, con no más de 150 metros entre curvas verticales, puede aceptarse una pendiente de hasta 8 %.
- Además, para asegurar un buen drenaje en vías con fijación directa, se recomienda una pendiente mínima de 0,2 %.

Acordamientos verticales

Al ser curvas parabólicas permiten una transición suave en el cambio de pendiente entre dos tramos rectos, contribuyendo así tanto a la seguridad operacional como al confort de los pasajeros. Las curvas verticales que se utilizan en este tipo de alineamientos presentan una tasa constante de cambio de pendiente, lo que permite un diseño predecible y eficiente desde el punto de vista constructivo y operativo. Este enfoque facilita la adaptación del trazado a las variaciones del terreno y evita cambios bruscos en la inclinación del vehículo, que podrían resultar incómodos o inseguros.

Para definir su longitud, se recomiendan los siguientes criterios:

- **Longitud deseada:**

$$LVC = 60 * A$$

- **Longitud mínima recomendada:**

$$LVC = 30 * A$$

- **Longitud mínima absoluta:**

- Para crestas:

$$LVC = A * V^2 / 215$$

- Para valles:

$$LVC = A * V^2 / 387$$

Donde:

- LVC : es la longitud de la curva vertical en metros.
- $A = G_2 - G_1$: es la diferencia entre pendientes de entrada y salida.
- V : es la velocidad de diseño en km/h.
- G_1 y G_2 son las pendientes de entrada y salida, respectivamente.

Corte transversal de las vías

En el caso de este anteproyecto, se toma como referencia la configuración de sistemas tranviarios ya implementados en ciudades europeas con características operativas similares. En particular, se analiza el proyecto del Tranvía de Barcelona, que utiliza unidades Citadis X05 (305), de la empresa francesa Alstom, uno de los modelos considerados como ejemplo técnico en este trabajo. En tramos comparables a la configuración propuesta para transcurrir en el cantero central de Avenida Italia, la faja de vía doble se define con un ancho aproximado de 7 metros, incluyendo la separación entre vías y los márgenes laterales de seguridad (Ajuntament de Barcelona, 2016).

En este anteproyecto se opta por simplificar el diseño y trabajar con una única faja tipo de 7 metros de ancho para todo el corredor propuesto, dejando planteada la necesidad de evaluar variantes de separación de vías, ramales independientes o ajustes de sección transversal en una etapa de proyecto avanzado más detallado.

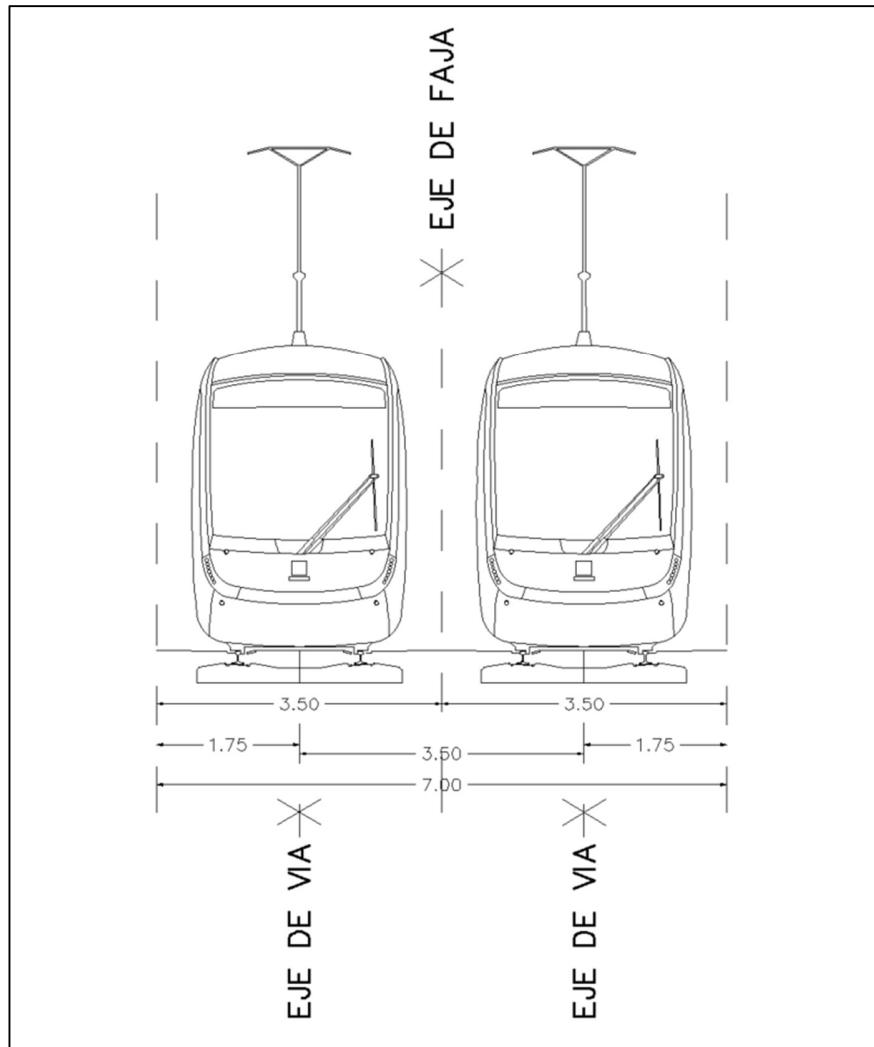


Figura N° 23. Corte transversal de faja tipo de 7 metros con tranvía modelo. Fuente:

Elaboración propia.

12.4. Trazado Planimétrico

Comenzando con el desarrollo del trazado de las vías del tranvía, se sigue una metodología apoyada en herramientas de diseño asistido por computadora, particularmente utilizando el software Civil 3D de Autodesk. En primer lugar, se importan al programa las imágenes aéreas correspondientes a la zona de estudio, descargadas previamente, las cuales, en este caso, abarcan el tramo de Avenida Italia, desde el hospital de clínicas hasta las cercanías del arroyo Carrasco. Las imágenes incorporadas se encuentran georreferenciadas en el sistema de proyección UTM 21 Sur con datum SIRGAS-ROU98, lo que permite que, al ser cargadas en el software ya configurado en dicho sistema, se ubiquen en las coordenadas correctas automáticamente. De esta manera, se garantiza la coherencia espacial con los demás elementos del proyecto, los cuales se representan en el mismo sistema de referencia.

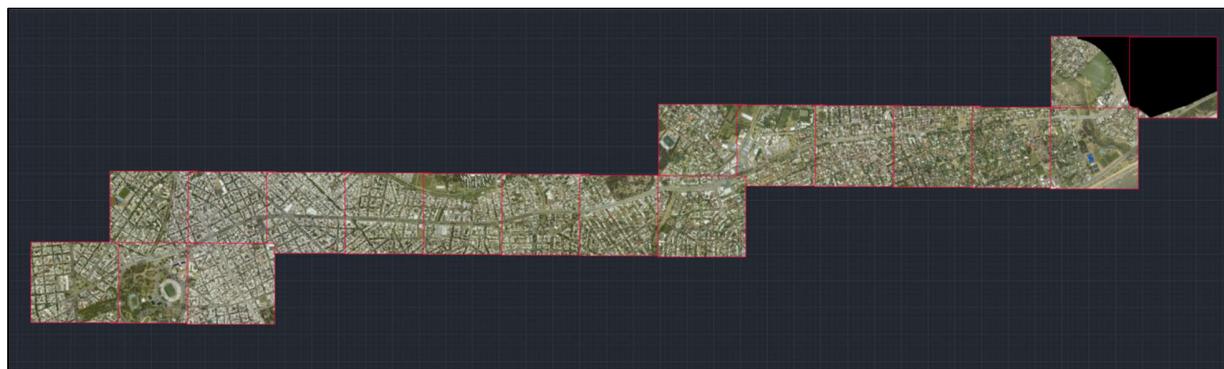


Figura N° 24. Ortofotos en software Civil 3D. Fuente: Elaboración propia.

A partir de dichas imágenes, se identifica el cantero central de la avenida como el corredor por

donde se dispondría el eje de la faja de circulación de ambas vías. Sobre este sector se trazan líneas rectas de gran longitud en aquellos tramos donde no existen curvas, siguiendo la geometría del corredor vial existente. Seguido de esto se prolongan dichas rectas, obteniendo los puntos de intersección entre estas.



Figura N° 25. Intersección de tramos rectos en software Civil 3D. Fuente: Elaboración propia.

Se procede a conectar cada par de líneas mediante arcos de transición circulares, siguiendo el criterio técnico de mantener un radio mínimo de 25 metros. En cada caso particular, se prueban diferentes radios hasta encontrar el que mejor se adapte a la geometría existente, asegurando la continuidad y fluidez del trazado.



Figura N° 26. Intersección de tramos rectos en software Civil 3D. Fuente: Elaboración propia.

Del mismo modo que se respetó el radio mínimo de curvatura establecido, el cual fue ampliamente superado por la geometría existente de Avenida Italia, se consideran también las longitudes mínimas de los tramos rectos entre curvas, garantizando la adecuada transición y seguridad del trazado. En este sentido, las mediciones efectuadas demostraron que dichas longitudes superan con holgura el valor mínimo recomendado de 37 metros, según los parámetros preestablecidos.

Una vez definido el eje completo de la faja, se aplica un desplazamiento lateral (offset) a lo largo de todo el recorrido, con el objetivo de representar el ancho total de la faja de circulación, la cual contiene las dos vías que circulan en sentidos contrarios. De esta manera, se obtiene una representación planimétrica precisa del corredor tranviario.

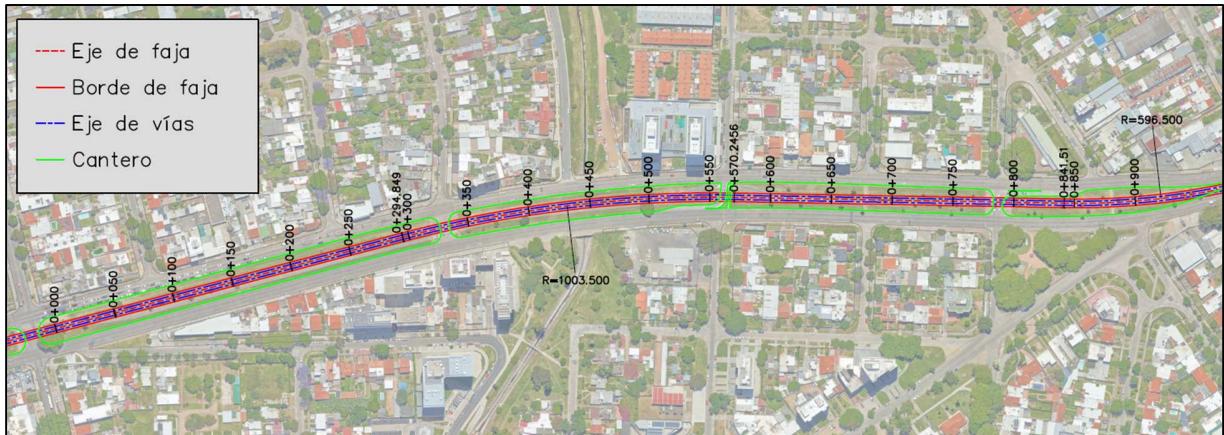


Figura N° 27. Trazado planimétrico en zona de arroyo malvin. Fuente: Elaboración propia.

12.5. Trazado Altimétrico

En el presente trabajo, el diseño altimétrico del trazado se aborda únicamente en un sector puntual del recorrido, caracterizado por una marcada diferencia de pendientes longitudinales. Esta zona, ubicada sobre Avenida Italia, entre las calles Hipólito Yrigoyen y Dr. Alejandro Gallinal, se encuentra en las inmediaciones del Arroyo Malvín y se identifica preliminarmente como un área crítica que podría requerir la implementación de una obra de infraestructura de mayor complejidad, como un viaducto o puente, en etapas posteriores del proyecto.

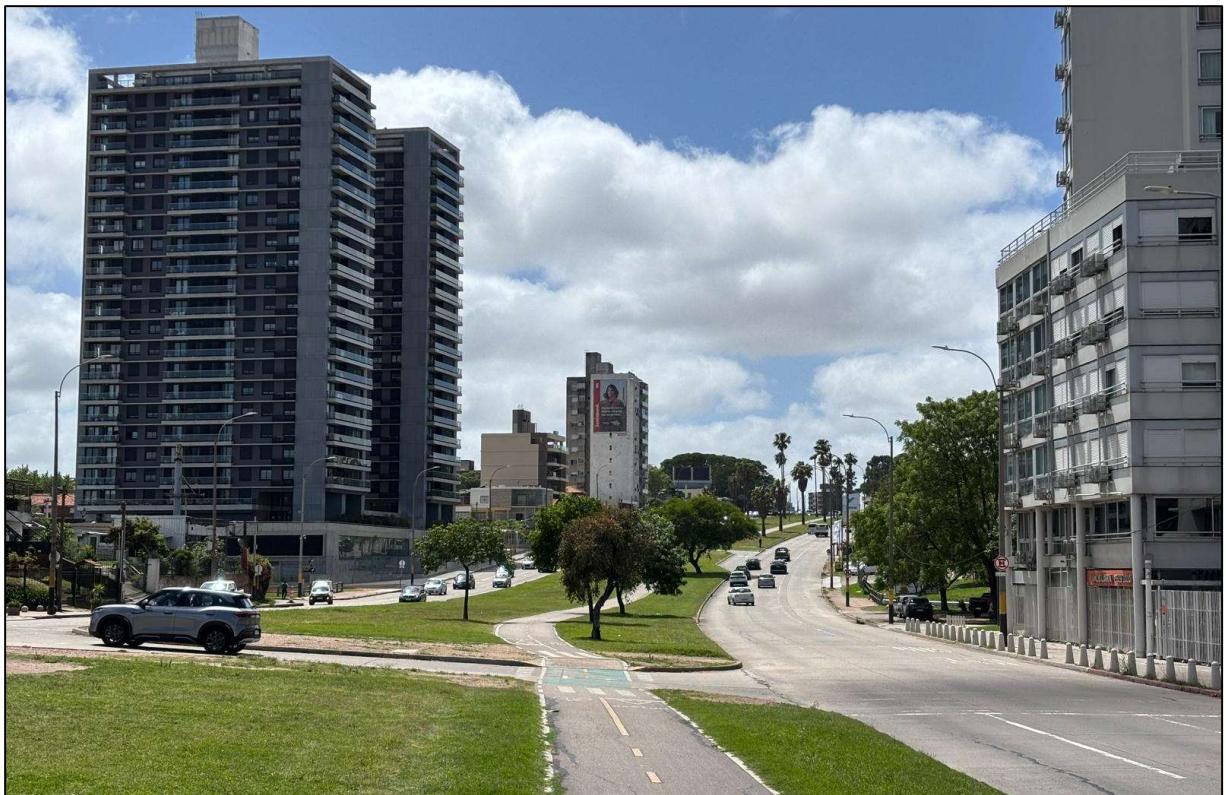


Figura N° 28. Avenida Italia sobre arroyo malvin. Fuente: Elaboración propia.

12.5.1. Procesamiento de superficie

Inicialmente, se proyecta la realización de un vuelo con tecnología LiDAR sobre la zona antes mencionada, con el fin de obtener un modelo del terreno más depurado que el disponible hasta ese momento. La alternativa previa es el modelo digital de superficie (MDS) generado a partir del vuelo fotogramétrico realizado por la Intendencia de Montevideo en el año 2021. Si bien ese producto presenta buena calidad general, su uso resulta limitado en esta zona debido a la presencia de obstáculos como vegetación alta en el cantero central de Avenida Italia, que dificultan la correcta interpretación de la geometría del terreno. No obstante, por razones vinculadas a permisos

aéreos requeridos por la DINACIA, no fue posible concretar el vuelo con LiDAR. En simultáneo al surgimiento de esta limitación, la Intendencia de Montevideo publica un nuevo relevamiento LiDAR urbano de alta densidad correspondiente al año 2024, el cual se menciona anteriormente en el capítulo 12.2.2. Esta nueva información, de libre acceso, permite continuar con el análisis altimétrico utilizando la nube de puntos en formato *LAS*⁴, las ortofotos asociadas y las capas vectoriales del SIG MonteviMap, incluyendo datos detallados de aceras, canteros centrales y líneas de propiedad, que suplantan la necesidad de realizar un relevamiento en dicha zona.

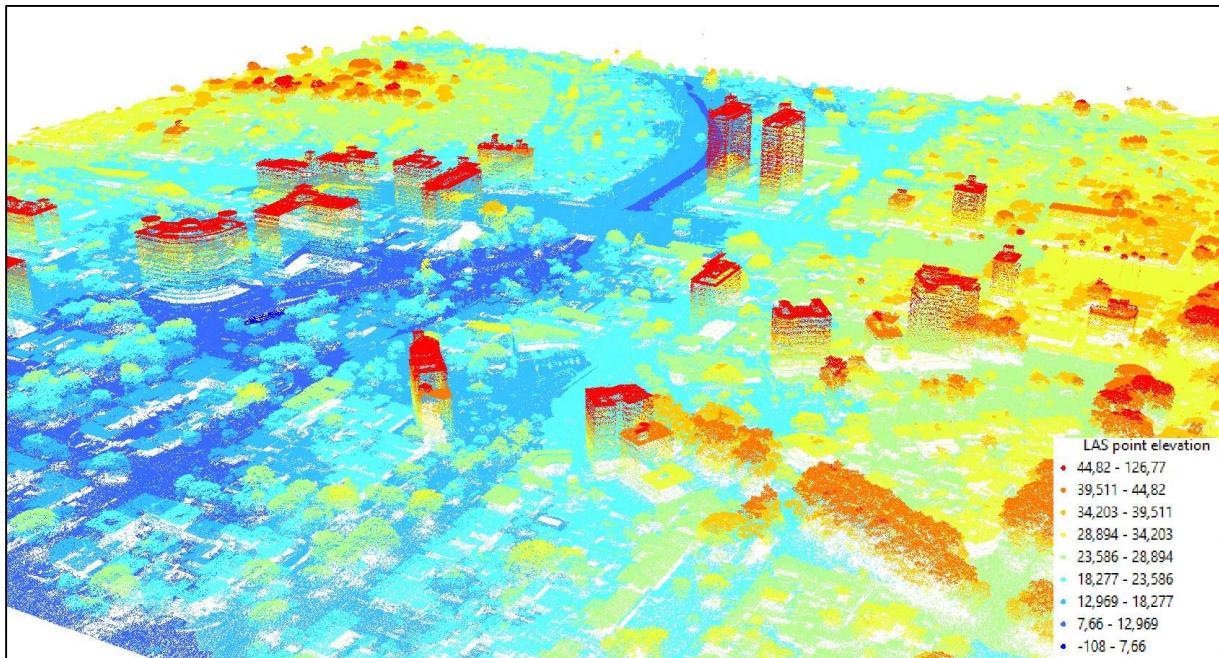


Figura N° 29. Nube de puntos de la zona “LIDAR_MVD_2024_J-29-C-4-N-6” en software ArcScene. Fuente: Elaboración propia.

⁴ El formato LAS es un estándar abierto desarrollado por la ASPRS para almacenar datos de nubes de puntos provenientes de sensores LiDAR, incluyendo la posición tridimensional de cada punto y atributos asociados (intensidad, clasificación, retorno, entre otros)

Si bien este anteproyecto contempla aspectos del diseño altimétrico del trazado, desde el rol profesional del agrimensor, en etapas iniciales de un proyecto como el trabajado en este informe, resulta fundamental generar un producto representativo de la topografía y condiciones reales del terreno, el cual sirva de base para que los profesionales competentes puedan proyectar sobre este. En este caso, aunque la base de trabajo se conforma a partir de los datos públicos antes mencionados, generados por el vuelo de la Intendencia de Montevideo, igualmente se requiere de un procesamiento especializado para transformarse en un modelo operativo válido para tareas de diseño y proyección.

El primer paso en este procesamiento consiste en la depuración de la nube de puntos, eliminando objetos no deseados como edificios, vegetación, vehículos u otras interferencias. Esta tarea es posible gracias a que el relevamiento LiDAR incorpora una clasificación automática de los puntos, permitiendo filtrar aquellos identificados como “*ground*” o puntos de suelo, facilitando así la generación de un modelo del terreno más limpio. En contraste, este tipo de clasificación suele ser más limitada en productos obtenidos mediante vuelos fotogramétricos convencionales, donde la eliminación de estructuras implica procesos manuales o semiautomáticos más complejos.

A partir del eje planimétrico de la faja previamente definido en el diseño de la vía, se genera una zona de trabajo de 75 metros de ancho alrededor de dicho eje, utilizando herramientas de análisis espacial pertenecientes al software ArcMap. Esta faja tiene como objetivo restringir el área del modelo altimétrico a un entorno cercano al trazado, optimizando el procesamiento y la gestión de datos. De igual manera, con el uso de herramientas propias del programa, se aplica un recorte de la nube de puntos, para así conservar únicamente aquellos ubicados dentro de la mencionada faja,

obteniendo una nube de puntos depurada y menos densa, apta para su uso en etapas posteriores del proyecto de manera fluida.

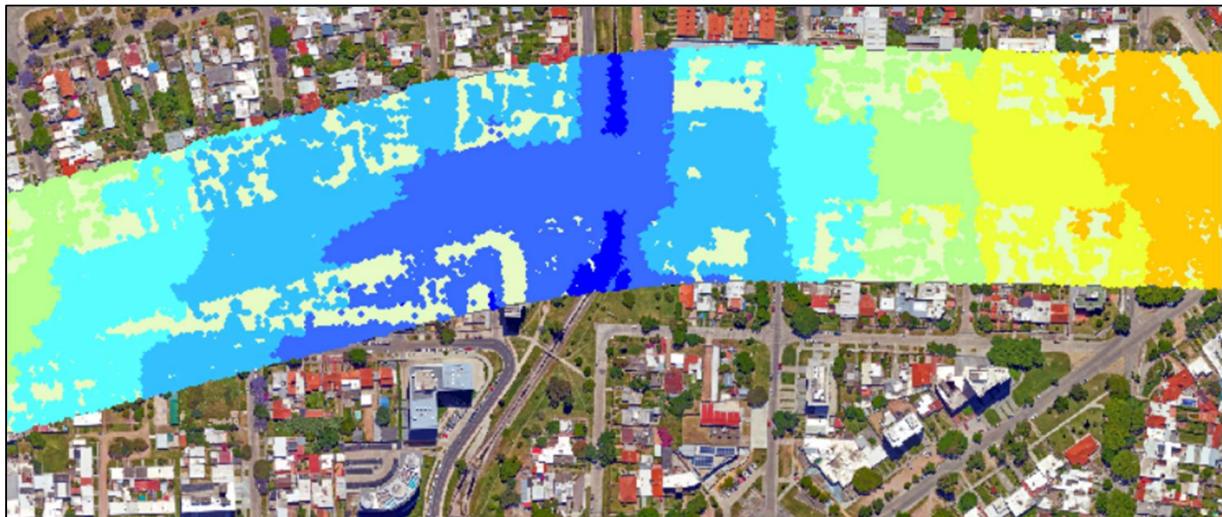


Figura N° 30. Nube de puntos filtrada resultado de extracción de puntos en faja de 75 metros.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez obtenida y depurada la nube de puntos LiDAR, es necesario realizar un procesamiento adicional para adaptarla a un entorno de trabajo compatible con el software utilizado en este caso para el diseño geométrico de la vía. En una primera ocasión, se busca generar un modelo digital del terreno (MDT) que pueda ser importado y manipulado dentro de Civil 3D, software que no admite insertar al área de trabajo archivos de nube de puntos en formato *LAS*.

En una primera instancia, se opta por generar un archivo en formato ráster, un MDT interpolado a partir de la nube de puntos clasificada, utilizando las herramientas propias del software ArcMap. Este proceso consiste en transformar la nube de puntos en una grilla regular con valores altimétricos, aplicando una interpolación lineal y definiendo un tamaño de celda (píxel) de 1 metro por 1 metro. Esta resolución implica un compromiso entre precisión y manejabilidad. Si bien se

pierde parte del detalle que aporta la alta densidad de la nube de puntos original, la cual tiene una separación promedio de 0,188 m entre puntos, el resultado permite generar una superficie optimizada para su integración y fácil manejo al software Civil 3D.



Figura N° 31. MDT en formato ráster. Fuente: Elaboración propia.

Una vez generado el MDT ráster en ArcMap, este se importa al entorno de Civil 3D para su utilización en el diseño del perfil longitudinal. Para ello, se crea una superficie dentro del proyecto a partir del archivo ráster, incorporando éste como una capa de modelo digital de elevación (DEM). Esta operación permite visualizar la topografía del terreno de diversas maneras y utilizar la superficie como base para la generación de perfiles, secciones transversales y análisis altimétricos del trazado proyectado.

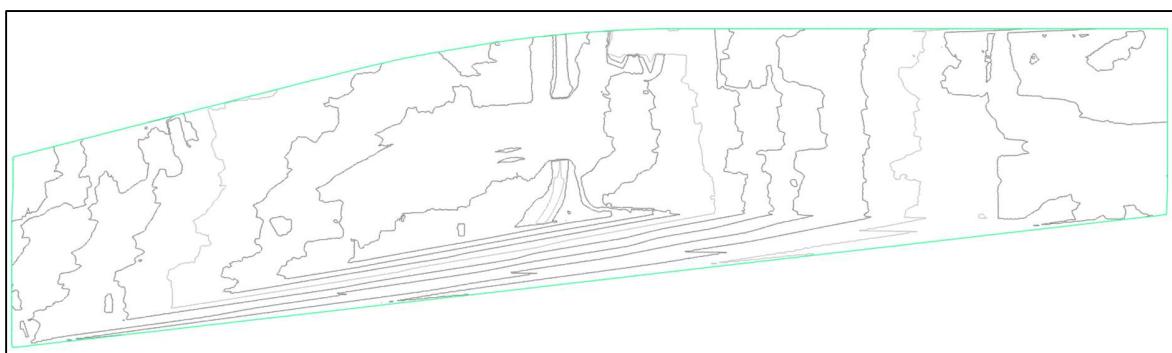


Figura N° 32. Superficie generada a partir del ráster en software Civil 3D. Fuente: Elaboración propia.

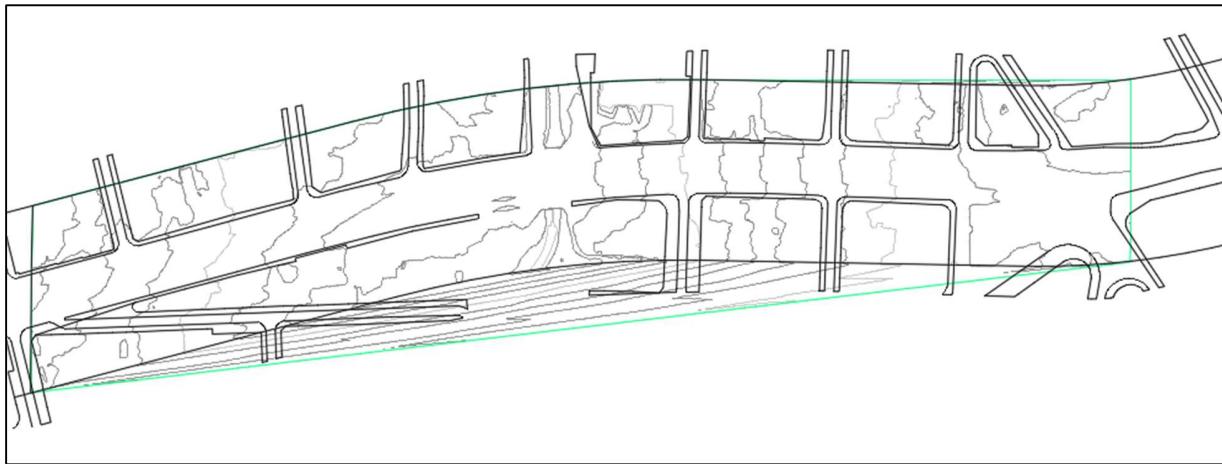
En paralelo, se plantea la generación de una segunda superficie directamente desde la nube de puntos clasificada, con el fin de comparar la fidelidad del modelo interpolado frente al conjunto original. Esta comparación permitirá evaluar si la reducción de resolución del ráster tiene un impacto significativo en el diseño del perfil longitudinal, especialmente en zonas de pendiente crítica o con posibles interferencias morfológicas como cordones. Para ello, el archivo *LAS* debe ser convertido a un archivo de puntos con coordenadas X, Y, Z (formato ASCII, TXT o CSV)⁵, lo cual permite su importación directa en el software Civil 3D como conjunto de puntos. A partir de este archivo procesado, es posible generar una superficie altimétrica más representativa, dado que se realiza una interpolación directa entre los puntos generados con el vuelo LiDAR, lo que resulta útil para realizar contrastes y validar la precisión del modelo empleado en el diseño.

A los efectos de mejorar la precisión y el contexto geométrico de ambas superficies generadas, se incorporaron las capas vectoriales en formato *Shapefile*⁶, disponibles de forma pública y gratuita a través del Catálogo de datos geográficos de la Intendencia de Montevideo. Las capas utilizadas corresponden a los límites de aceras y manzanas catastrales. En una instancia inicial del proyecto, se preveía realizar el relevamiento de estos elementos en campo mediante tecnología GNSS en conjunto con el vuelo LiDAR planificado. Sin embargo, ante la imposibilidad de ejecutar dicha práctica de campo, se optó por utilizar los datos disponibles de la Intendencia para mantener una

⁵ Los formatos ASCII, TXT y CSV corresponden a archivos de texto estructurados que almacenan datos en columnas (generalmente separadas por espacios, tabulaciones o comas), permitiendo representar listas de puntos con sus coordenadas y atributos de manera sencilla y ampliamente compatible entre distintos softwares.

⁶ El formato Shapefile es un estándar desarrollado por ESRI para el almacenamiento de datos vectoriales en SIG, compuesto por un conjunto de archivos que representan geometrías (puntos, líneas o polígonos) junto con sus atributos asociados.

única fuente oficial y coherente de información geoespacial para trabajar en esta etapa del anteproyecto.



*Figura N° 33. Capa vectorial de aceras sobre superficie en software Civil 3D. Fuente:
Elaboración propia.*

Con el fin de delimitar con mayor precisión el área de trabajo y evitar interferencias externas en la superficie, se genera un polígono que representa el contorno del espacio público de la zona. Este polígono es definido a partir de las alineaciones aparentes de las manzanas adyacentes al corredor de la vía proyectada. El objetivo principal es recortar la superficie generada a esa área, dado que el modelo interpolado inicial genera curvas y valores altimétricos fuera de la zona de interés, afectando la interpretación del terreno.

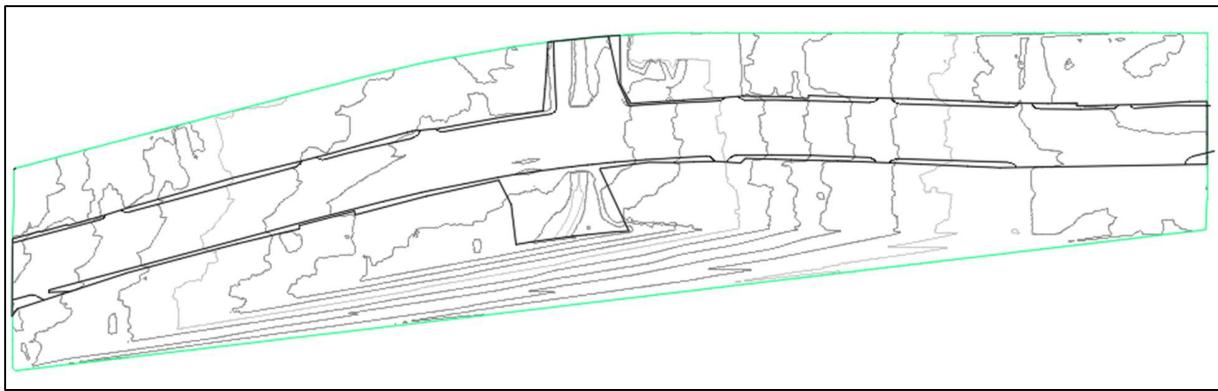


Figura N° 34. Polígono delimitado zona de estudio sobre superficie en software Civil 3D.

Fuente: Elaboración propia.

Con el objetivo de concentrar el análisis altimétrico en la zona de estudio delimitada, se procede a recortar la superficie utilizando el polígono generado en el paso anterior. Posteriormente, se importa al entorno de trabajo un archivo vectorial (*Shapefile*) que contiene la geometría de los canteros existentes en Avenida Italia. Dicha capa es ajustada manualmente en función de la ortofoto, con el fin de corregir desplazamientos o inexactitudes geométricas. Además, se procede a digitalizar elementos urbanos complementarios, tales como cordones de vereda no contemplados en otras capas, ciclovías y bordes de calzada, con el objetivo de enriquecer el contexto físico del trazado y permitir un análisis más detallado de su implantación.

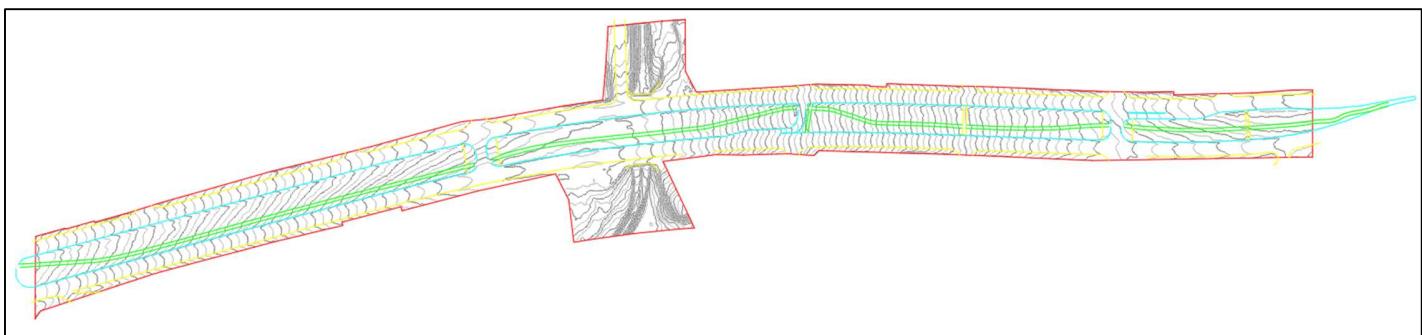


Figura N° 35. Elementos urbanos sobre superficie en software Civil 3D. Fuente: Elaboración

propia.

Una vez ajustadas estas superficies y generada la triangulación⁷ de los puntos, tanto de la nube de puntos, como los correspondientes a cada celda del DEM, se procede a la visualización de estos y analizar su comportamiento en sectores donde se encuentran identificados elementos lineales relevantes del entorno urbano. Con los atributos previamente asignados a los objetos vectoriales, se definen y aplican las correspondientes líneas de quiebre o “*breaklines*” dentro del modelo. Estas *breaklines* permiten controlar la interpolación entre puntos al restringir la generación de triángulos que atravesen discontinuidades físicas del terreno, como cordones de vereda, bordes de canteros y calzada de ciclovía. Su incorporación puede mejorar significativamente la precisión geométrica de las superficies y a modo ilustrativo, se presenta en las figuras N° 36 y 37 una comparación visual entre el modelo generado a partir del MDT ráster, antes y después de la aplicación de las líneas de ruptura. De igual modo se demuestra el mismo concepto en la superficie generada por la nube de puntos directamente, en su situación previa en la figura N° 38, y posterior en la figura N° 39.

⁷ En Civil 3D, la representación de un modelo digital del terreno se basa en una *Triangulated Irregular Network* (TIN), una malla formada por triángulos generados mediante interpolación entre puntos de cota conocida. A partir de esta triangulación es posible estimar la altura en cualquier posición del modelo, ya que cada punto queda contenido dentro de alguno de los triángulos y su cota se calcula mediante la interpolación definida por sus vértices.

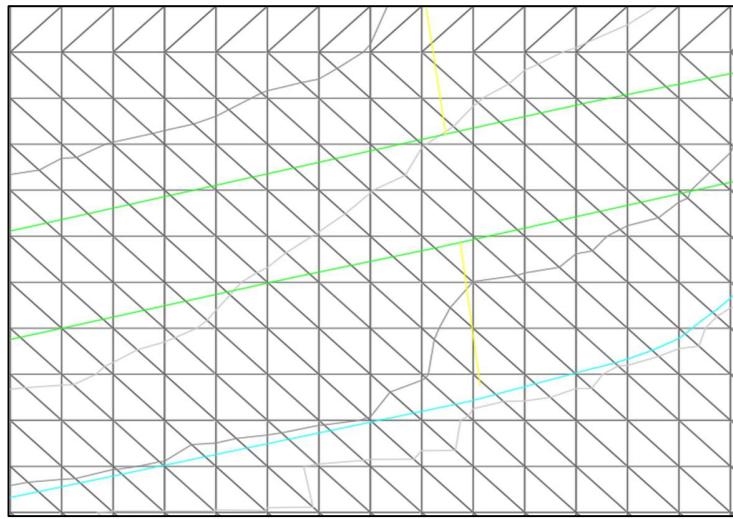


Figura N° 36. Ejemplo superficie de modelo ráster sin aplicar líneas de ruptura (celeste, verde y amarillo), en software Civil 3D. Fuente: Elaboración propia.

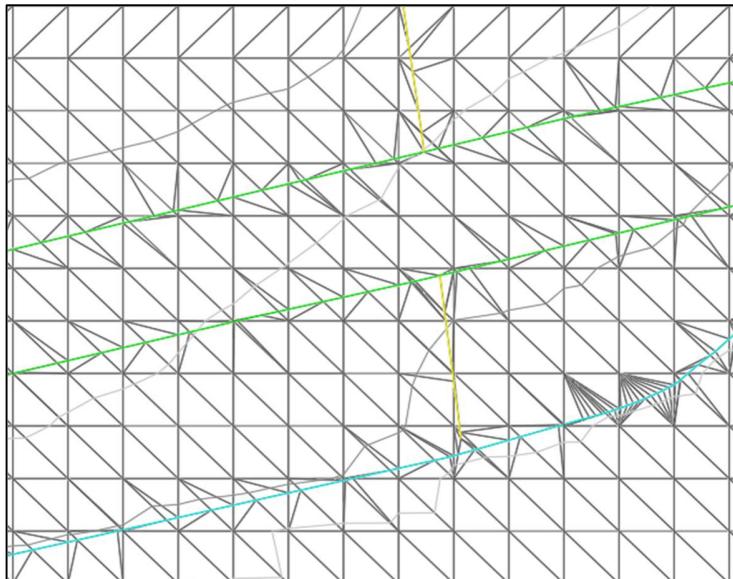


Figura N° 37. Ejemplo superficie de modelo ráster aplicando líneas de ruptura (celeste, verde y amarillo), en software Civil 3D. Fuente: Elaboración propia.

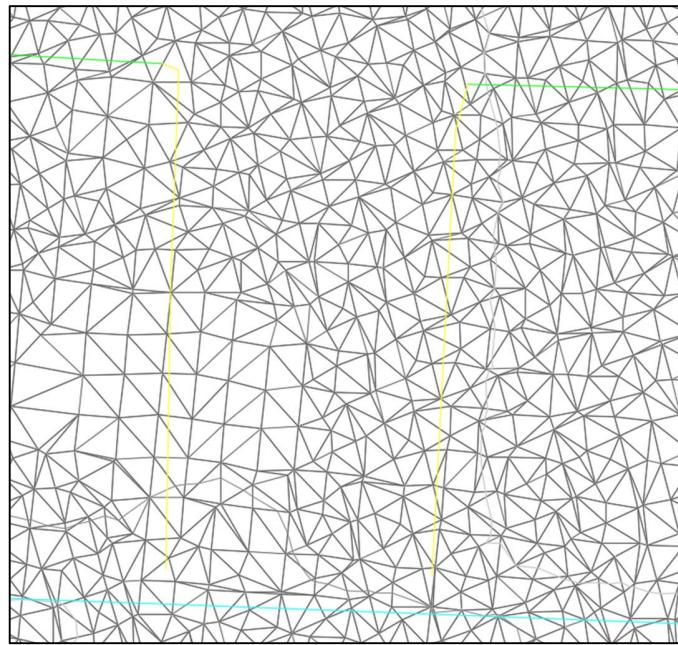


Figura N° 38. Ejemplo superficie de modelo nube de puntos sin aplicar líneas de ruptura (celeste, verde y amarillo), en software Civil 3D. Fuente: Elaboración propia.

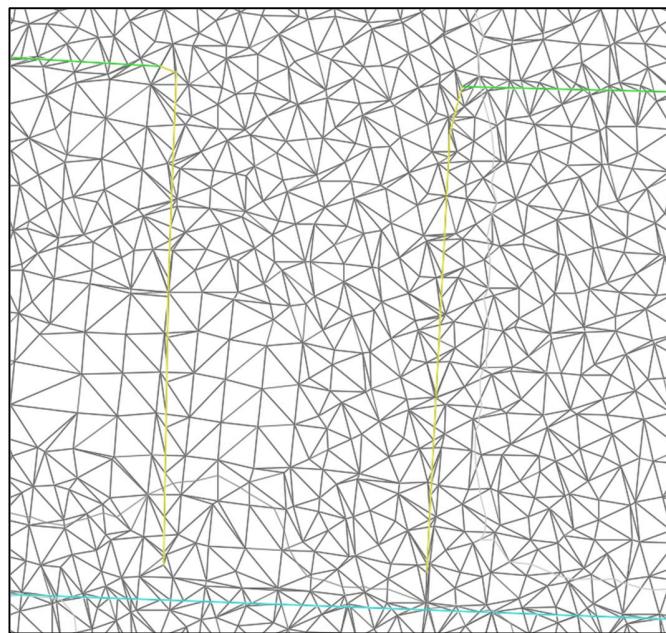


Figura N° 39. Ejemplo superficie de modelo nube de puntos aplicando líneas de ruptura (celeste, verde y amarillo), en software Civil 3D. Fuente: Elaboración propia.

A priori, la superficie generada a partir de la nube de puntos presenta una mayor precisión, basado en el hecho de que no se le aplica ningún procedimiento sobre el dato original. Sin embargo, con el fin de evaluar las diferencias entre el modelo derivado del ráster y el obtenido a partir de la nube de puntos, aplicados al proyecto desarrollado, se genera un perfil longitudinal sobre el eje de la vía determinado anteriormente en el trazado planimétrico. En dicho perfil se analizan las discrepancias entre ambos modelos, tanto en términos altimétricos como en la morfología y la representación de elementos urbanos previamente mencionados, como los cordones.

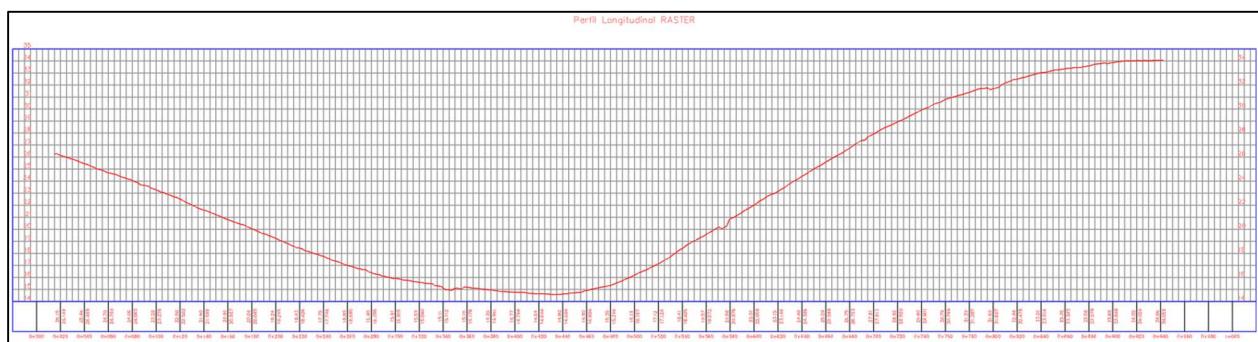


Figura N° 40. Perfil longitudinal del terreno a partir del modelo ráster, en software Civil 3D.

Fuente: Elaboración propia.

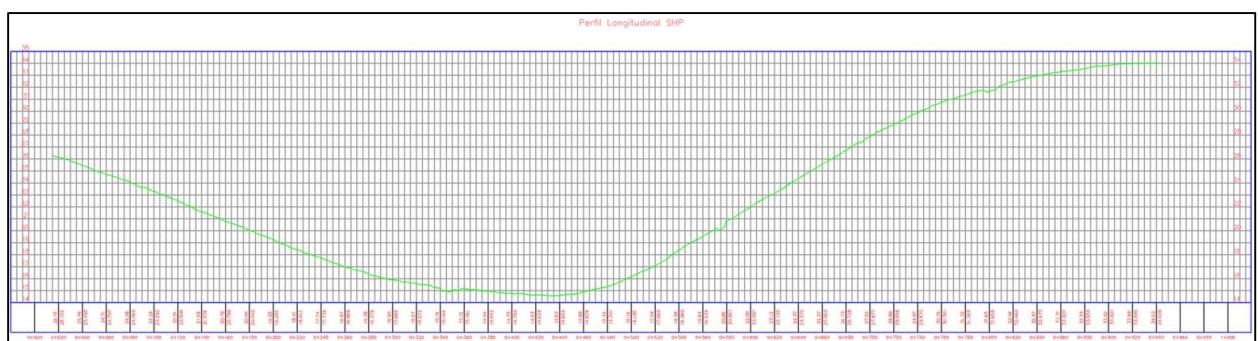


Figura N° 41. Perfil longitudinal del terreno a partir del modelo nube de puntos en software Civil 3D. Fuente: Elaboración propia.

(En anexo 16.4, Lámina 1, se aprecia dichos perfiles con claridad.)

Para analizar las diferencias entre ambos perfiles, se presentan imágenes correspondientes a zonas específicas donde estos se superponen, con el fin de facilitar su comparación visual. Estas se corresponden con cruces de calles perpendiculares a Avenida Italia, es decir, sectores con cambios de nivel y presencia de cordones, donde pueden distinguirse claramente el cantero central y la calzada. En las figuras siguientes (Figuras N° 42, 43 & 44), el perfil de color verde corresponde al generado a partir de la superficie elaborada directamente con la nube de puntos, mientras que el perfil de color rojo representa el obtenido desde el modelo ráster. Es en este tipo de sectores donde resulta posible apreciar con mayor claridad las diferencias entre superficies, dependiendo del modelo empleado para su generación. En el anexo 16.4, Lámina 1, se pueden apreciar éstas con mayor detalle.

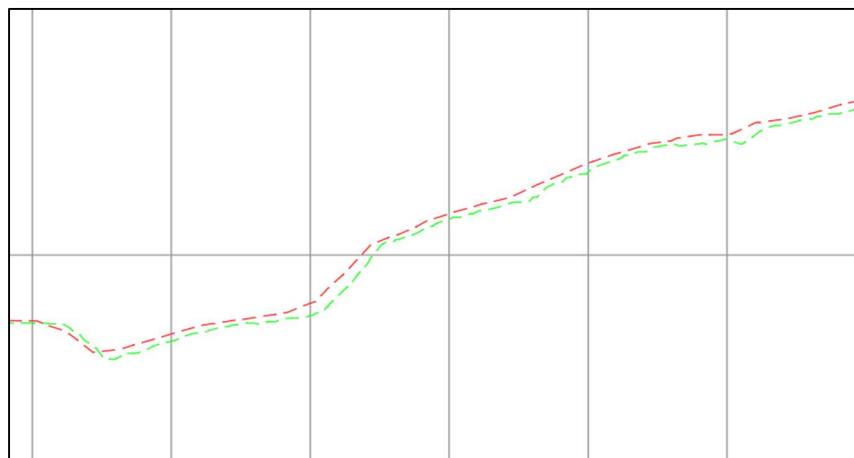


Figura N° 42. Diferencia máxima ($0,053m$) ⁸entre ambos perfiles longitudinales, en software Civil 3D. Fuente: Elaboración propia.

⁸ La diferencia máxima indicada en las Figuras N° 42, 43 y 44 corresponden al valor obtenido mediante el análisis comparativo de perfiles en el software Civil 3D. Las gráficas presentadas en Las mencionadas figuras se muestran con fines ilustrativos y sin escala; la verificación gráfica con escala se encuentra disponible en el Anexo 16.4, Lámina 1.

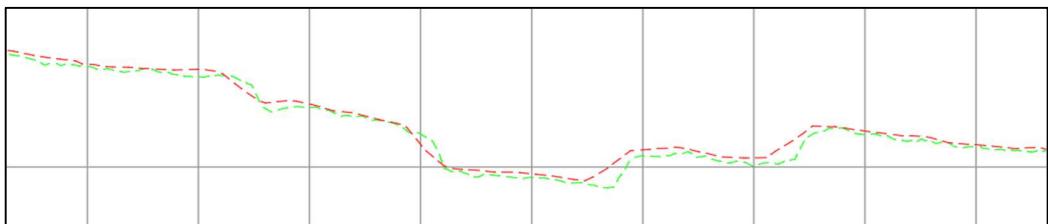


Figura N° 43. Diferencia máxima ($0,096\text{m}$) entre ambos perfiles longitudinales, en software Civil 3D. Fuente: Elaboración propia.

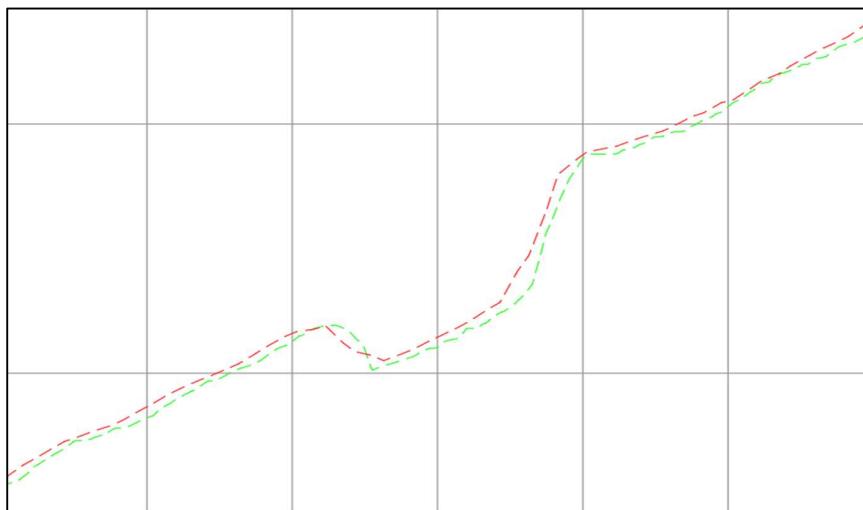


Figura N° 44. Diferencia máxima ($0,068\text{m}$) entre ambos perfiles longitudinales, en software Civil 3D. Fuente: Elaboración propia.

La diferencia máxima que se observa entre ambos modelos es apenas inferior a 10 centímetros, valor que, según el nivel de precisión que requiere el anteproyecto, puede considerarse despreciable, siendo posible trabajar con cualquiera de ellos. Asimismo, se advierte que los elementos urbanos, como los cordones, presentan una mayor definición y realismo en el modelo

generado a partir de la nube de puntos, lo que permite una representación más fiel de la morfología superficial y de los detalles constructivos presentes en el entorno.

Si bien las discrepancias generales entre modelos son reducidas, en una etapa de anteproyecto la elección entre uno u otro puede depender de la optimización de recursos disponibles. El uso de una nube de puntos a lo largo de toda la extensión de la Avenida Italia puede generar archivos de gran tamaño y complejidad operativa, dificultando su procesamiento en entornos de diseño. En cambio, la utilización de un modelo ráster interpolado a partir de dicha nube ofrece una alternativa más liviana y adaptable, cuya precisión puede ajustarse mediante la definición del tamaño de celda. De este modo, es posible equilibrar la resolución del modelo con la eficiencia computacional, seleccionando la densidad de celdas que brinde un nivel de detalle adecuado al grado de definición requerido en esta instancia del proyecto.

Para la continuidad del anteproyecto y el desarrollo del trazado altimétrico correspondiente al área de estudio, se adopta como base el modelo generado a partir de la nube de puntos, dado su mayor nivel de detalle y capacidad de representar con mayor precisión los elementos urbanos. En una etapa posterior al diseño geométrico, que se presenta en el siguiente apartado del informe, se prevé evaluar la coherencia de dicho modelo mediante una práctica de campo, con el objetivo de verificar la correspondencia entre la superficie digital y las condiciones topográficas reales del terreno.

12.5.2. *Trazado de acordamientos verticales*

Obtenido el modelo digital, y luego el perfil longitudinal, elaborados a partir de la nube de puntos LiDAR, se desarrolla el trazado geométrico de la faja destinada a las vías tranviarias. En esta etapa se contemplan dos alternativas de diseño con criterios diferenciados de adaptación al terreno existente.

La primera alternativa, denominada acoplada, busca ajustar el trazado de las vías al terreno natural existente, minimizando la necesidad de movimiento de suelos y obras complementarias. Este enfoque se orienta a aprovechar la topografía actual, reduciendo costos y limitando la intervención estructural sobre el entorno urbano.

La segunda alternativa corresponde a la opción de viaducto, que propone la construcción de una estructura elevada con el fin de evitar los cambios de pendiente pronunciados presentes en la zona y generar una infraestructura exclusiva para el tranvía. Este diseño permite optimizar las condiciones de circulación y mantener las pendientes dentro de los valores admisibles para la operación del sistema.

En el caso del trazado correspondiente al viaducto, se determinan puntos clave de la estructura que serán utilizados posteriormente en práctica de campo para realizar su replanteo, con el objetivo de contrastar los valores obtenidos en el modelo con las condiciones reales del terreno. En esta instancia también se relevan ciertos puntos sobre pavimento, puntos que no sufren alteraciones significativas en su cota, los cuales permitan evaluar la coherencia entre el diseño proyectado y la representación altimétrica derivada del modelo digital empleado. Dicha coherencia se puede chequear con los puntos clave mencionados, sin embargo, al ser la mayoría de éstos sobre tierra, se opta por relevar puntos sobre un terreno más sólido, como ejes de calle o eje de calzada de ciclo vía.

Trazado acoplado al terreno

En primera instancia, se analiza la posibilidad de que el trazado se adapte al terreno existente de la manera más ajustada posible, con el propósito de minimizar las intervenciones constructivas y mantener la topografía natural del área de estudio. No obstante, debido a las limitaciones impuestas por los parámetros geométricos aplicados al diseño, se identifican sectores donde resulta necesario ejecutar un terraplén y otros donde se requiere un leve desmonte para garantizar la continuidad del perfil altimétrico.

Además de las limitaciones geométricas propias de los parámetros de trazado, tales como las longitudes mínimas de tramos rectos y curvas, o las pendientes máximas admisibles, se identifican también condicionantes derivados de la circulación vehicular existente en la Avenida Italia. Entre estas restricciones se destacan los cruces transversales de calles que atraviesan el cantero central de la avenida.

Estas condiciones imponen la necesidad de que el trazado de la vía tranviaria mantenga cotas lo más próximas posible al nivel actual de la calzada, con el objetivo de evitar diferencias abruptas de altura o la generación de rampas en los puntos de cruce. De este modo, se busca garantizar la compatibilidad funcional entre la infraestructura tranviaria y la red vial existente, preservando tanto la continuidad del tránsito como la seguridad y comodidad de los usuarios.



Figura N° 45. Cruces de calle por cantero central sobre ortoimagen. Fuente: Elaboración propia.

En el extremo oeste del tramo se considera un punto de referencia con cota 26,311 metros (obtenida a partir de la superficie generada), con la cual se proyecta una recta tangente con una pendiente aproximada del -3,5 %, valor que se corresponde con la inclinación natural del terreno en dicho sector. En el extremo este, se define una tangente vinculada a un punto con cota 34,032 m, asociada a una pendiente del 0,2 %, representativa del relieve más estable presente en esa zona. Ambas cotas y pendientes se establecen como valores base para el diseño del trazado.

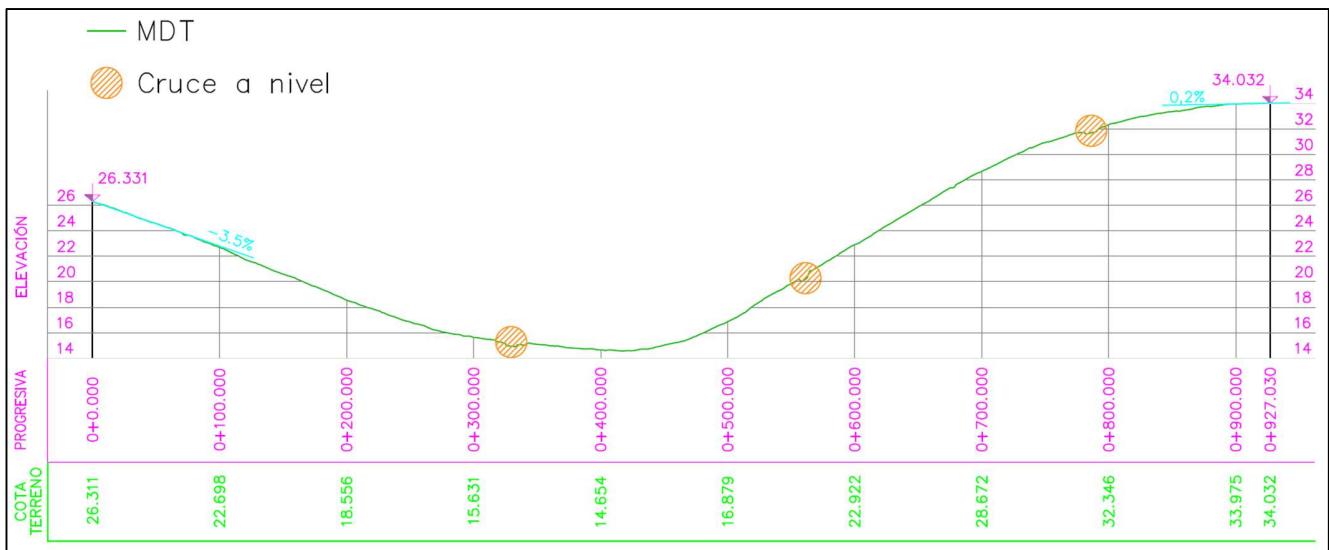


Figura N° 46. Perfil longitudinal con condiciones base. Fuente: Elaboración propia.

Como posible solución, se propone la incorporación de dos rampas de transición que permitan resolver los cambios de pendiente presentes en el tramo analizado. El perfil se desarrolla, de oeste a este, a partir de una pendiente inicial descendente de -3,5 %, que enlaza con una pendiente de -4 %, también descendente, para luego ascender con una inclinación del 6 % y finalmente acoplarse al terreno natural mediante la pendiente mencionada anteriormente de 0,2 %.

Para la determinación de la longitud del acordamiento que conecta la pendiente inicial de -3,5 % con la pendiente de -4 % (Caso A), se establecen los criterios de diseño que se detallan a continuación.

- **Longitud deseada:**

$$LVC = 60 \times A = 60 \times ((-4,0) - (-3,5)) = 30 \text{ m}$$

- **Longitud mínima recomendada:**

$$LVC = 30 \times A = 30 \times ((-4,0) - (-3,5)) = 15 \text{ m}$$

- **Longitud mínima absoluta:**

- *Para crestas:*

$$LVC = \frac{A \times V^2}{215} = \frac{((-4,0) - (-3,5)) \times 60^2}{215} = 9 \text{ m}$$

Se determinan los acordamientos correspondientes a las transiciones entre las pendientes de -4 % a 6 % (Caso B) y de 6 % a 0,2 % (Caso C), aplicando las fórmulas utilizadas en el caso anterior.

En la Tabla N° 2 se presentan las longitudes deseadas, longitudes mínimas recomendadas y longitudes absolutas, consideradas para todos los casos.

| <i>Caso</i> | <i>Pendiente (%)</i> | | <i>Longitud (metros)</i> | | |
|-------------|----------------------|---------------|--------------------------|---------------------------|------------------------|
| | <i>Entrada</i> | <i>Salida</i> | <i>Deseada</i> | <i>Mínima recomendada</i> | <i>Mínima absoluta</i> |
| <i>A</i> | -3,5 | -4,0 | 30 | 15 | 9 |
| <i>B</i> | -4,0 | 6,0 | 600 | 300 | 93 |
| <i>C</i> | 6,0 | 0,2 | 348 | 174 | 97 |

Tabla N° 2. Longitudes mínimas posibles de cada acordamiento acoplado. Fuente: Elaboración propia.

Se considera además la longitud mínima de tramo recto entre curvas verticales, establecida en 34,2 metros, la cual se tiene en cuenta al momento de definir la extensión de los acordamientos propuestos.

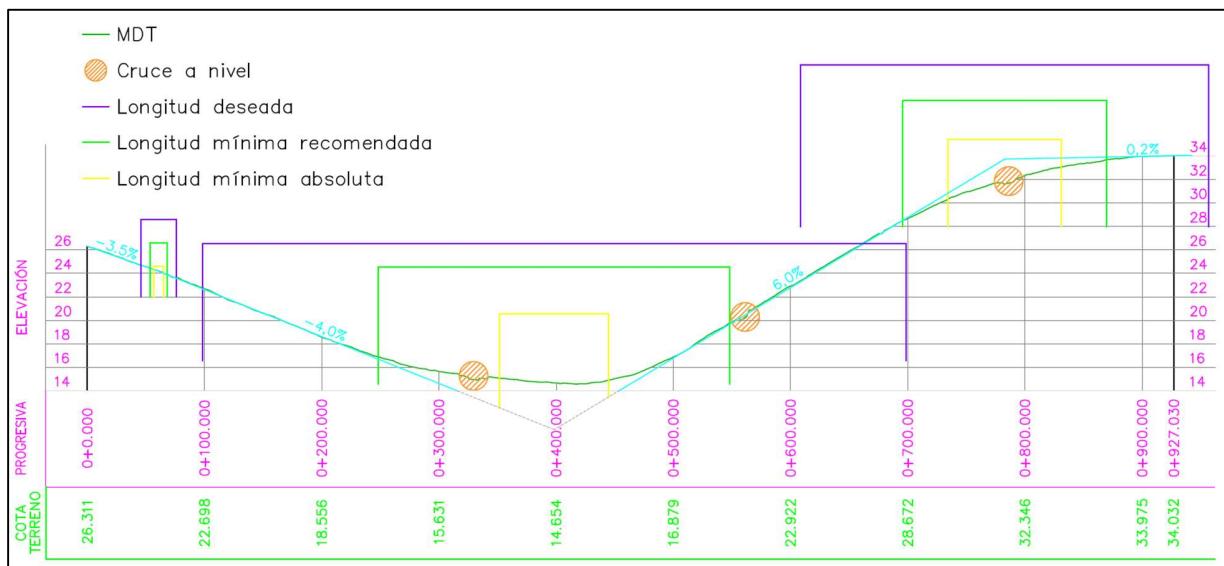


Figura N° 47. Perfil longitudinal con longitudes mínimas posibles de cada acordamiento.

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los valores mínimos recomendados y deseados, se busca definir la longitud de cada acordamiento de manera que cumpla con los tramos rectos mínimos establecidos, se adapte lo más posible al terreno existente y mantenga los pasos a nivel próximos al ras de la calzada, evitando diferencias de cota significativas.

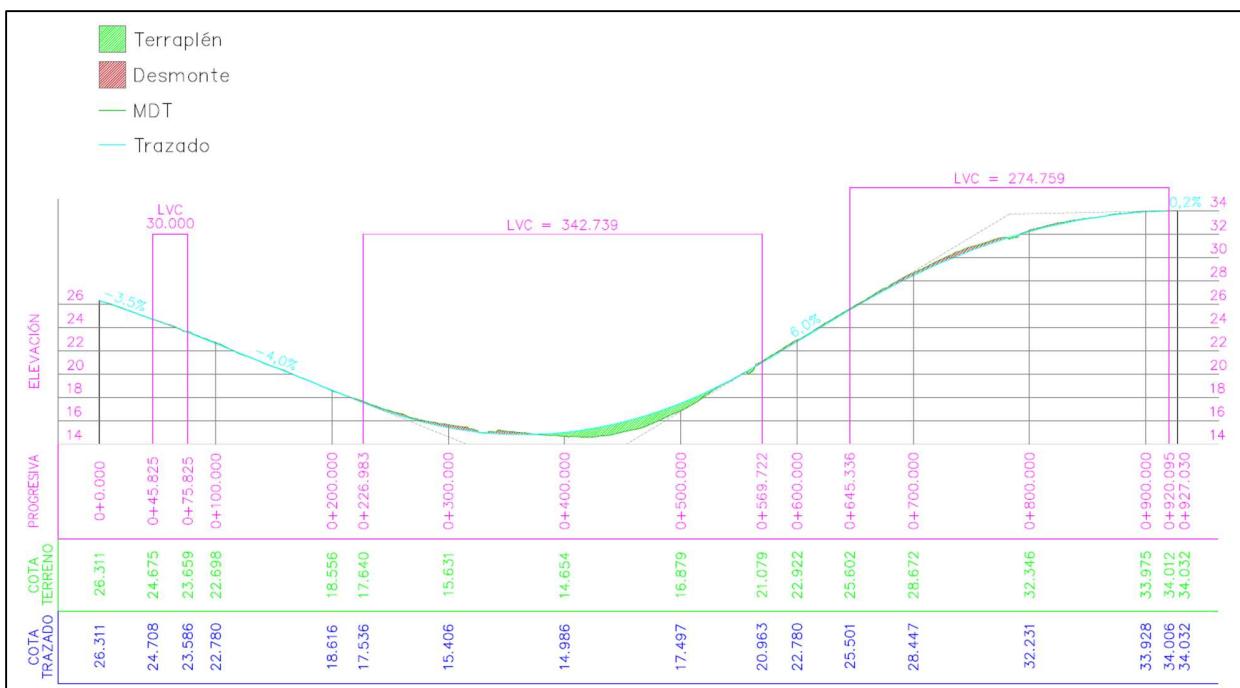


Figura N° 48. Perfil longitudinal de trazado acoplado al terreno. Fuente: Elaboración propia.

Si bien el trazado no logra acoplarse completamente al terreno a lo largo de todo el perfil longitudinal, el teraplén resultante presenta una diferencia máxima de altura cercana a 1 metro y una longitud aproximada de 150 metros en su tramo más significativo, valores considerados reducidos para este tipo de intervención. De manera similar, el pequeño desmonte identificado mantiene una diferencia máxima de altura próxima a los 40 centímetros. Estos resultados evidencian la viabilidad de implementar una vía tranviaria en la zona con mínimas modificaciones del terreno, aunque su desarrollo definitivo requeriría un estudio topográfico y de trazado más detallado, fuera del alcance del presente anteproyecto.

Los detalles correspondientes a dicho trazado se representan en la Lámina 2 del Anexo 16.4

Trazado con viaducto

Como segunda opción de trazado vertical, se plantea la incorporación de un viaducto como solución estructural preliminar, con el fin de superar la diferencia altimétrica existente y generar un entorno exclusivo del tranvía, para sortear los cruces vehiculares por la avenida. El diseño estructural detallado de la obra excede el alcance formativo de la carrera de Agrimensura; sin embargo, se desarrolla una propuesta esquemática con fines didácticos y exploratorios, que permite además verificar la coherencia del modelo altimétrico generado a partir de datos abiertos mediante una futura comprobación en campo.

El viaducto se modela con apoyos cada 30 metros, procurando evitar interferencias con intersecciones y accesos vehiculares existentes. Se considera una altura libre mínima de 4,60 metros entre la calzada y la cara inferior de la estructura, tomando como referencia el gálibo del túnel de la intersección entre Avenida Italia y Avenida Centenario. Asimismo, se incorpora una altura estructural de 1 metro entre la rasante de vía y la base inferior de la estructura propia del viaducto.

Como condición adicional de modelado, se establece una altura máxima total de 12 metros respecto al nivel del terreno natural donde se da la menor altimetria del trazado, tomando como referencia el viaducto de la extensión de la línea 2 del tranvía de Monterrey (México), cuya altura oscila entre 8 y 15 metros. Este límite se aplica como parámetro de factibilidad geométrica, destinado a evaluar la viabilidad del viaducto sin exceder dimensiones adecuadas para el contexto urbano.

Como etapa inicial del diseño de los acordamientos verticales, se grafican las pendientes de ingreso y egreso al tramo en estudio, considerando las mismas condiciones aplicadas en el trazado desarrollado en el punto anterior. En la figura N° 49 se representan las zonas de condicionamiento geométrico previamente mencionadas: en color rojo se indican los gálibos correspondientes a los cruces de calles, donde el viaducto debe evitar interferencias con la circulación vehicular; la zona verde corresponde al sector por el cual la estructura debe atravesar, sin superar los 12 metros de altura respecto al punto de menor cota del terreno; y la zona naranja identifica el sector de acoplamiento al terreno natural, coincidente con un paso a nivel, donde el trazado debe mantenerse lo más próximo posible a la calzada existente.

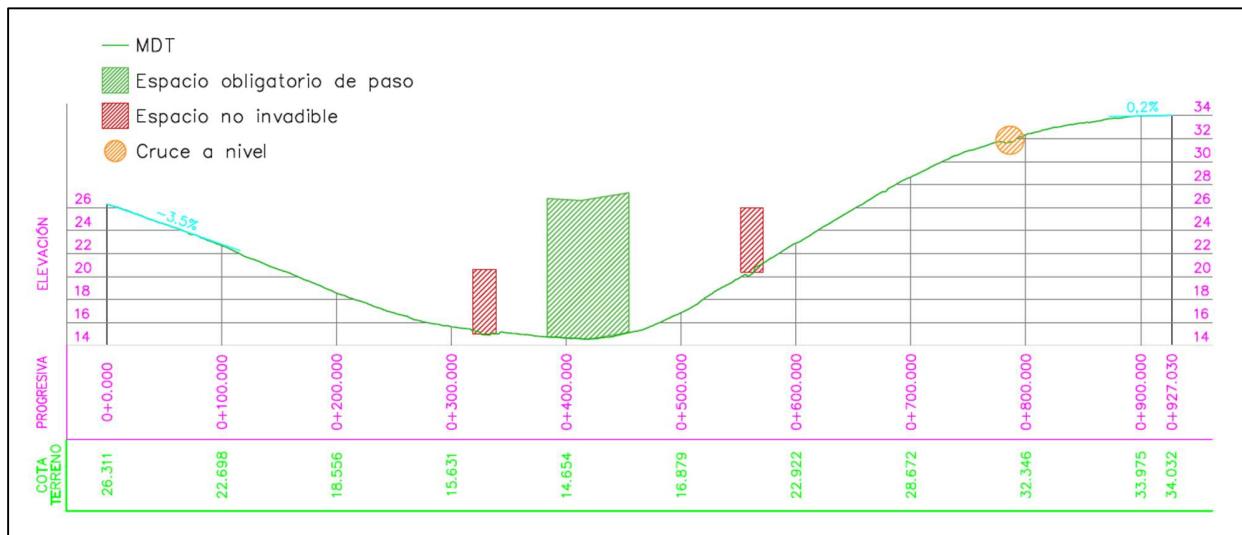


Figura N° 49. Perfil longitudinal con condiciones base de viaducto. Fuente: Elaboración propia.

A partir de esta situación, se propone como solución preliminar la inserción de una recta intermedia con pendiente constante del 2 %, la cual cumple con los criterios establecidos para las pendientes máximas admisibles definidos en los parámetros del trazado.

Esta recta proyectada interseca con las pendientes extremas previamente definidas, de -3,5 % al oeste del tramo (Caso A), y al este otra de 0,2 % al este (Caso B). El cálculo de los elementos de acordamiento se realiza aplicando los criterios técnicos establecidos para el trazado vertical, conforme a lo desarrollado en la sección correspondiente del presente documento.

| Caso | Pendiente (%) | | Longitud (metros) | | |
|------|---------------|--------|-------------------|--------------------|-----------------|
| | Entrada | Salida | Deseada | Mínima recomendada | Mínima absoluta |
| A | -3,5 | 2,0 | 330 | 165 | 52 |
| B | 2,0 | 6,0 | 108 | 54 | 30 |

Tabla N° 3. Longitudes mínimas posibles de cada acordamiento de viaducto. Fuente:
Elaboración propia.

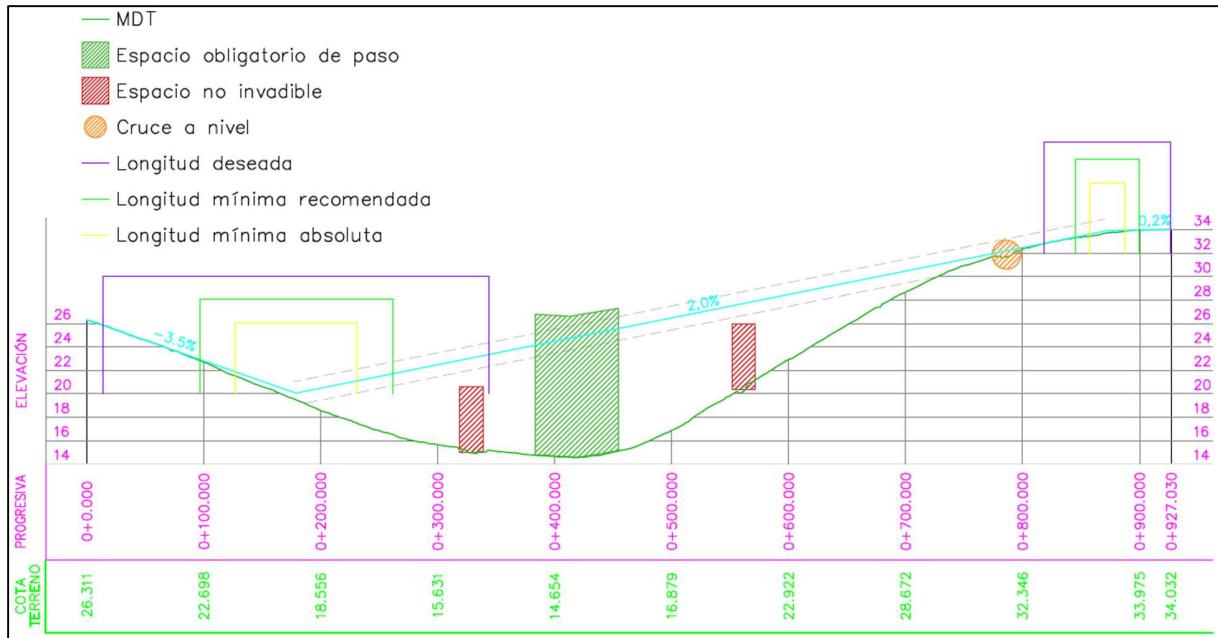


Figura N° 50. Perfil longitudinal con longitudes mínimas posibles de cada acordamiento en

viaducto. Fuente: Elaboración propia.

A diferencia del trazado acoplado al terreno, en este caso no se presentan limitaciones geométricas que impidan aplicar el criterio de longitud deseada, el cual se adopta para la definición de los acordamientos verticales del viaducto.

Una vez calculados y representados los acordamientos, se obtiene el trazado vertical del eje de la faja tranviaria. Sobre este perfil se incorporan los elementos estructurales previamente definidos, considerando en los extremos del viaducto la presencia de estribos con una proporción de 2H:1V y una altura mínima de pie de talud de 4 metros. Con el perfil estructural delimitado, se definen las ubicaciones de las columnas de 1 metro de diámetro, distribuidas con separación constante de

30 metros y ajustadas para evitar interferencias con los elementos condicionantes identificados en el entorno urbano.

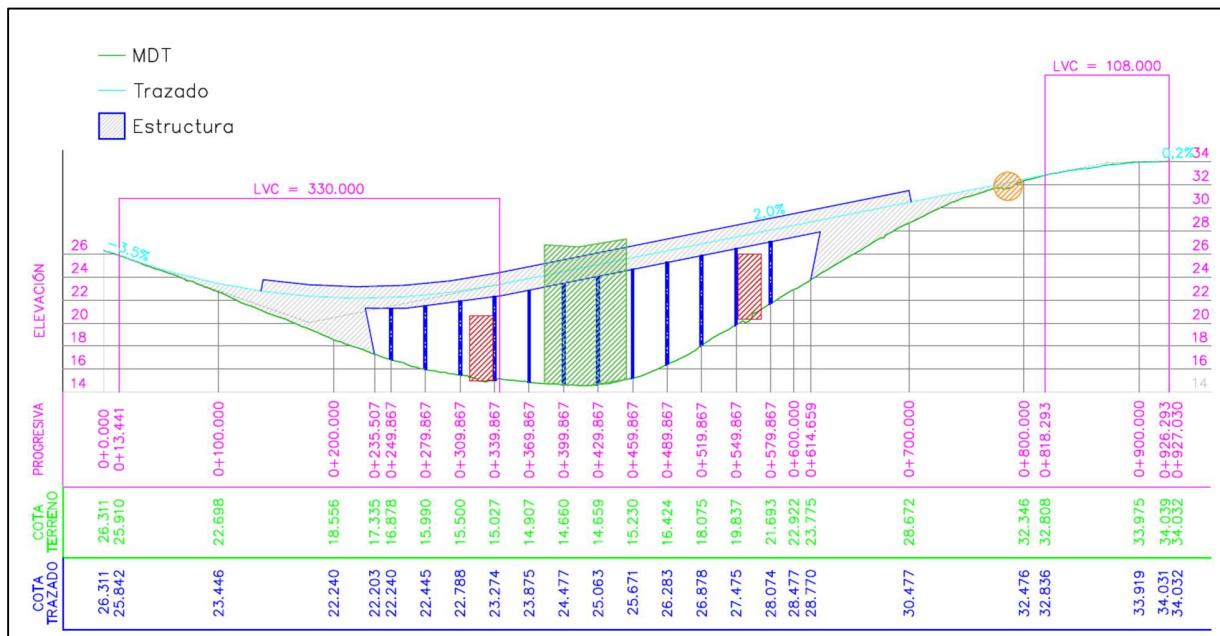


Figura N° 51. Perfil longitudinal con trazado final y viaducto proyectado. Fuente: Elaboración propia.

Al igual que el trazado desarrollado en el punto anterior, el presente diseño no constituye un producto final aplicable, ya que no incorpora la totalidad de los aspectos técnicos, estructurales y constructivos necesarios para un desarrollo profesional. Sin embargo, a diferencia del trazado acoplado al terreno, que pretende evaluar la viabilidad de implementar una vía tranviaria en la zona, la alternativa del viaducto presenta una mayor complejidad en términos de diseño, costo y ejecución. Por este motivo, la propuesta se plantea con fines exploratorios y académicos, y su

modelo se utiliza como base para la práctica de replanteo en campo que se desarrolla en el apartado siguiente.

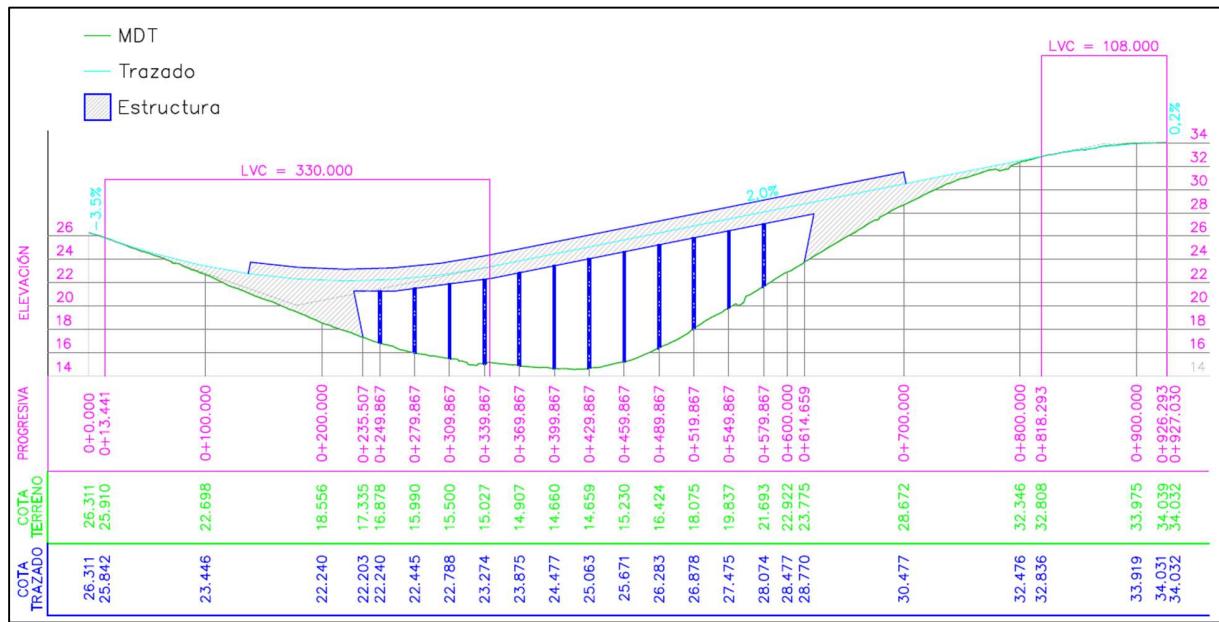


Figura N° 52. Perfil longitudinal viaducto proyectado. Fuente: Elaboración propia.

Los detalles correspondientes a dicho trazado se representan en la Lámina 3 del Anexo 16.4

Replanteo

Con el objetivo de replicar una práctica habitual en obras de infraestructura, se realiza un replanteo de puntos clave correspondientes a la estructura del viaducto diseñado. Esta instancia tiene un doble propósito. Por un lado, realizar el procedimiento de replanteo que efectúan los agrimensores durante la ejecución de una obra, y por otro, evaluar la coherencia y precisión del modelo de terreno generado en el presente proyecto. Para ello, se replantean en planimetría los puntos

definidos en el diseño y se relevan sus cotas altimétricas, con el fin de compararlas con los valores del modelo digital y analizar posibles discrepancias.

Además de los puntos clave del viaducto, se relevan también puntos ubicados en superficies más planas u homogéneas del cantero central, superficies de material firme que perduran en el tiempo, pocos probables de sufrir alteraciones altimétricas, con el objetivo de realizar la misma comparación de alturas y analizar posibles variaciones. Esto resulta especialmente relevante, ya que muchos de los puntos de replanteo coinciden con zonas de césped y vegetación rasa, lo que podría influir en los resultados altimétricos.

El replanteo constituye una práctica esencial en la labor del agrimensor, ya que permite trasladar elementos del modelo proyectado al terreno real mediante la determinación precisa de sus coordenadas. En este caso las coordenadas de los puntos se obtienen en el sistema proyectado de UTM zona 21 sur, por lo que la ejecución del replanteo se realiza utilizando tecnología GNSS, dado que no se dispone de un marco de referencia materializado que habilite el uso de una estación total.

Las consideraciones técnicas, posibles fuentes de error y limitaciones operativas asociadas a este procedimiento se abordan en detalle en el apartado “Implementación de obra” (13.1), desarrollado en una sección posterior del presente informe.

En este caso, se replantean puntos ubicados sobre el eje del trazado, correspondientes al inicio y fin del tramo en estudio, así como los puntos de inicio de los acordamientos que se acoplan al terreno natural. Además, se incluyen puntos representativos de la estructura, tales como los pies de talud y las columnas del viaducto.

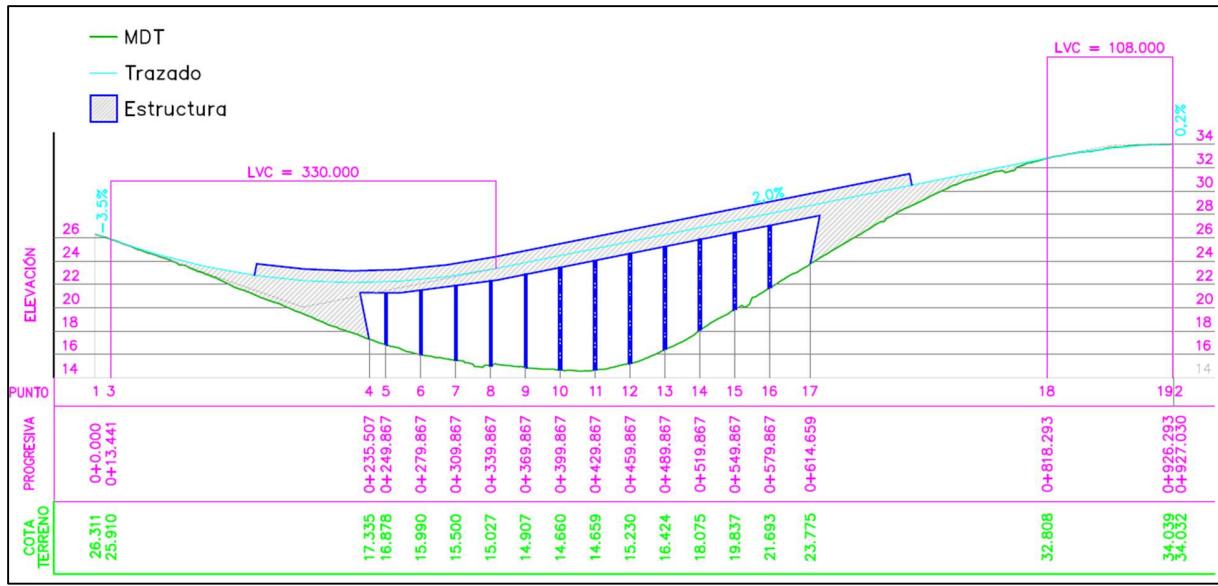


Figura N° 53. Perfil longitudinal de viaducto con puntos a replantear. Fuente: Elaboración propia.

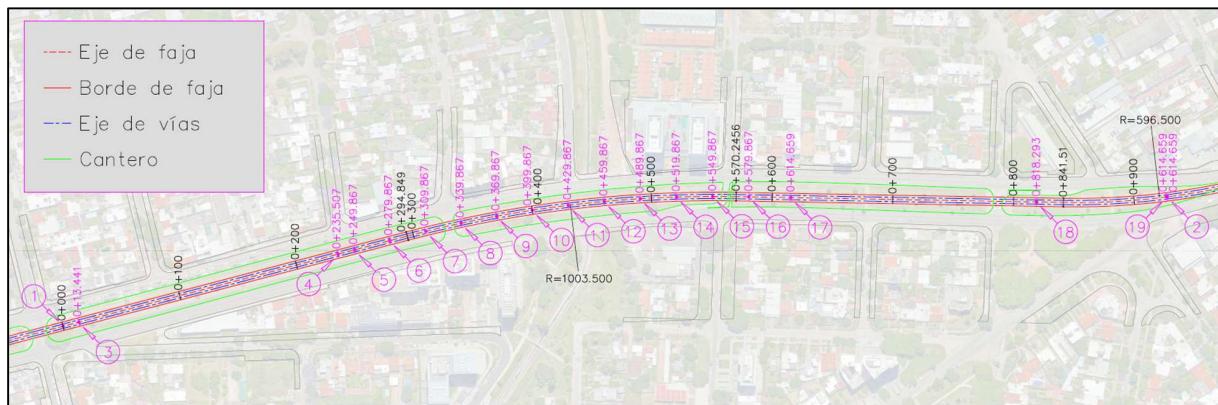


Figura N° 54. Planimetría de puntos a replantear. Fuente: Elaboración propia.

Las coordenadas planimétricas y la cota altimétrica de cada punto se presentan en la Tabla N° 4, donde se detallan los valores utilizados para la ejecución y análisis del replanteo.

| Punto | E (UTM) | N (UTM) | Z (MDT) | Elemento |
|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------------------|
| 1 | 581325,859 | 6139135,469 | 26,311 | <i>Inicio Trazado</i> |
| 2 | 582241,050 | 6139242,844 | 34,032 | <i>Final Trazado</i> |
| 3 | 581338,861 | 6139138,879 | 25,910 | <i>Inicio Acordamiento</i> |
| 4 | 581553,661 | 6139195,215 | 17,335 | <i>Pie de Talud</i> |
| 5 | 581567,552 | 6139198,858 | 16,878 | <i>Columna</i> |
| 6 | 581596,571 | 6139206,469 | 15,990 | <i>Columna</i> |
| 7 | 581626,480 | 6139214,200 | 15,500 | <i>Columna</i> |
| 8 | 581655,700 | 6139220,892 | 15,027 | <i>Columna</i> |
| 9 | 581685,126 | 6139226,729 | 14,907 | <i>Columna</i> |
| 10 | 581714,714 | 6139231,684 | 14,660 | <i>Columna</i> |
| 11 | 581744,437 | 6139235,752 | 14,659 | <i>Columna</i> |
| 12 | 581774,268 | 6139238,930 | 15,230 | <i>Columna</i> |
| 13 | 581804,181 | 6139241,215 | 16,424 | <i>Columna</i> |
| 14 | 581834,149 | 6139242,605 | 18,075 | <i>Columna</i> |
| 15 | 581864,145 | 6139243,099 | 19,837 | <i>Columna</i> |
| 16 | 581894,143 | 6139242,749 | 21,693 | <i>Columna</i> |
| 17 | 581928,929 | 6139242,125 | 23,775 | <i>Pie de Talud</i> |
| 18 | 582132,530 | 6139238,471 | 32,808 | <i>Inicio Acordamiento</i> |
| 19 | 582240,319 | 6139242,746 | 34,039 | <i>Fin Acordamiento</i> |

Tabla N° 4. Coordenadas de puntos a replantar. Fuente: Elaboración propia.

El replanteo y relevamiento en campo mediante tecnología GNSS se realiza utilizando los receptores modelo i73+ e i76 de la empresa CHCNAV. La metodología aplicada consiste inicialmente en posicionar una antena nivelada sobre trípode, a la cual se le determinan las coordenadas precisas mediante la técnica de posicionamiento NTRIP ⁹, conectada a la red

⁹ NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) es un método de posicionamiento que permite recibir correcciones diferenciales en tiempo real a través de una conexión de datos, obtenidas desde una red de estaciones permanentes, con el fin de mejorar la precisión del posicionamiento GNSS.

geodésica REGNA-ROU¹⁰ del Instituto Geográfico Militar (IGM), específicamente a la estación permanente UYGM, ubicada en la sede del Instituto Geográfico Militar. Posteriormente, dicha antena se configura como estación base, transmitiendo correcciones diferenciales en tiempo real a una segunda antena móvil, que opera como rover. Esta comunicación se establece por radio enlace, aplicando la técnica RTK¹¹, la cual permite obtener coordenadas con precisión en tiempo real, asegurando la fiabilidad del replanteo y la verificación de las cotas altimétricas respecto al modelo digital del terreno.



Figura N° 55. Antena i73+ (izquierda) y i76 (derecha) en campo. Fuente: Elaboración propia.

¹⁰ La red REGNA-ROU es una red geodésica activa, compuesta por estaciones GNSS permanentes que proporcionan correcciones en tiempo real y datos de referencia para el posicionamiento preciso en el territorio nacional.

¹¹ RTK (Real Time Kinematic) es una técnica de posicionamiento GNSS que utiliza correcciones diferenciales transmitidas en tiempo real desde una estación base a un receptor móvil, permitiendo obtener coordenadas con mayor precisión durante la observación.

El trabajo de campo se elabora utilizando el modelo geoidal EGM08¹², para la conversión de alturas elipsoidales a ortométricas. La posición de la antena base, determinada mediante la técnica NTRIP, presenta una precisión estimada de 0,016 m en el plano horizontal y 0,021 m en el eje vertical. Una vez iniciada la transmisión de correcciones por radio, el sistema opera con una precisión promedio de 0,013 m en horizontal y 0,018 m en vertical, valores que se consideran adecuados para trabajos de replanteo y verificación altimétrica a escala de este anteproyecto.

Es importante señalar que las alturas provenientes del levantamiento LiDAR utilizado para la generación del modelo digital del terreno también se encuentran referidas a alturas ortométricas. Si bien la fuente oficial no detalla explícitamente el modelo geoidal aplicado, consultas realizadas al Departamento de Geomática de la Intendencia de Montevideo indican que dichas alturas se encuentran vinculadas al modelo geoidal EGM08. Esta correspondencia entre sistemas de referencia garantiza la compatibilidad vertical entre los datos LiDAR empleados en la construcción del MDT y las observaciones GNSS realizadas en campo.

¹² El modelo geoidal EGM08 es un modelo global del geoide desarrollado por la *National Geospatial-Intelligence Agency* (NGA), que permite transformar alturas elipsoidales obtenidas mediante GNSS en alturas ortométricas mediante valores de ondulación geoidal con resolución de 1 arco-minuto.



Figura N° 56. Punto N°2 de replanteo en terreno (izquierda) y proyectado sobre ortoimagen (derecha). Fuente: Elaboración propia.

Con los datos obtenidos en campo, se incorporan las coordenadas altimétricas relevadas mediante GNSS a los puntos definidos en el diseño. A partir de esta información, se compara la cota medida con la correspondiente del MDT generado para el trabajo, con el fin de evaluar la diferencia entre ambas alturas y la coherencia del modelo. En la Tabla N° 5 se presentan los puntos replanteados, junto con sus coordenadas planimétricas, cotas relevadas y diferencias altimétricas obtenidas.

| Punto | E (UTM) | N (UTM) | Z (MDT) | Z (GNSS) | ΔZ |
|-------|------------|-------------|---------|----------|------------|
| 1 | 581325,859 | 6139135,469 | 26,311 | 26,192 | -0,119 |
| 2 | 582241,050 | 6139242,844 | 34,032 | 33,884 | -0,148 |
| 3 | 581338,861 | 6139138,879 | 25,910 | 25,801 | -0,109 |
| 4 | 581553,661 | 6139195,215 | 17,335 | 17,189 | -0,146 |
| 5 | 581567,552 | 6139198,858 | 16,878 | 16,712 | -0,166 |
| 6 | 581596,571 | 6139206,469 | 15,990 | 15,855 | -0,135 |
| 7 | 581626,480 | 6139214,200 | 15,500 | 15,357 | -0,143 |
| 8 | 581655,700 | 6139220,892 | 15,027 | 14,916 | -0,111 |
| 9 | 581685,126 | 6139226,729 | 14,907 | 14,789 | -0,118 |
| 10 | 581714,714 | 6139231,684 | 14,660 | 14,527 | -0,133 |
| 11 | 581744,437 | 6139235,752 | 14,659 | 14,528 | -0,131 |
| 12 | 581774,268 | 6139238,930 | 15,230 | 15,088 | -0,142 |
| 13 | 581804,181 | 6139241,215 | 16,424 | 16,295 | -0,129 |
| 14 | 581834,149 | 6139242,605 | 18,075 | 17,952 | -0,123 |
| 15 | 581864,145 | 6139243,099 | 19,837 | 19,702 | -0,135 |
| 16 | 581894,143 | 6139242,749 | 21,693 | 21,561 | -0,132 |
| 17 | 581928,929 | 6139242,125 | 23,775 | 23,665 | -0,110 |
| 18 | 582132,530 | 6139238,471 | 32,808 | 32,660 | -0,148 |
| 19 | 582240,319 | 6139242,746 | 34,039 | 33,893 | -0,146 |

Tabla N° 5. Coordenadas de puntos a replantar con sus alturas relevadas. Fuente:

Elaboración propia.

Como se aprecia en la Tabla N°5, las diferencias altimétricas entre las alturas medidas en campo y las correspondientes del modelo digital del terreno se mantienen en el entorno de 13 centímetros.

Esta discrepancia responde a un efecto instrumental asociado al desplazamiento existente entre el punto físico de referencia de la antena (ARP) y su centro de fase efectivo, conocido como *phase*

center offset (PCO)¹³. Durante las mediciones RTK, el receptor móvil debe interpretar el tipo de antena utilizado como base a partir del mensaje transmitido, sin embargo, los receptores empleados en este trabajo no aplican automáticamente el offset correspondiente, por lo que genera un desplazamiento vertical sistemático en todas las observaciones GNSS.

Dado que este offset es propio del modelo de antena que se utiliza, corresponde determinar su valor a partir de la información publicada en el archivo ANTEX de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), con el fin de aplicar correctamente el ajuste vertical adecuado a las alturas relevadas. Entre la información publicada por el Instituto Geográfico Militar se encuentra el listado oficial de estaciones permanentes que integran la red REGNA-ROU, donde se especifica el modelo de antena asociado a cada estación. En el caso particular de este trabajo, la determinación de las coordenadas de la antena base se realizó mediante conexión a la estación permanente UYGM, para la cual se indica el uso de una antena CHCNAV modelo CHCC220GR2 CHCD.

A partir de esta identificación, se procede a consultar el archivo ANTEX correspondiente, del cual se obtienen los offsets de centro de fase para las distintas frecuencias observadas. Para la frecuencia L1, el PCO vertical reportado es de 120,32 milímetros, mientras que para la frecuencia L2 el valor asciende a 142,07 milímetros. (Ver Anexo 16.2.)

¹³ El phase center offset (PCO) corresponde a la diferencia vertical existente entre el punto de referencia físico de la antena (ARP) y la posición efectiva desde la cual se reciben las señales GNSS, denominada centro de fase. Este desplazamiento depende del diseño interno de cada antena y es publicado en los archivos ANTEX para su correcta aplicación durante el procesamiento o la corrección diferencial. Cuando el receptor móvil no interpreta el tipo de antena base transmitido en el mensaje RTCM, el PCO no se aplica automáticamente y se genera un sesgo vertical sistemático en todas las coordenadas obtenidas mediante RTK.

Con el propósito de aplicar un ajuste representativo de ambas portadoras, se utiliza el promedio de ambos valores, que en el caso del modelo de antena instalado en la estación UYGM alcanza un valor de 131,20 milímetros. Este valor se incorpora como corrección uniforme a todas las alturas relevadas en campo, obteniéndose así un conjunto de cotas ajustadas que se presentan en la Tabla N°6.

| Punto | E (UTM) | N (UTM) | Z (MDT) | Z (GNSS) | AZ |
|--------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------|
| 1 | 581325,859 | 6139135,469 | 26,311 | 26,323 | -0,012 |
| 2 | 582241,050 | 6139242,844 | 34,032 | 34,015 | 0,017 |
| 3 | 581338,861 | 6139138,879 | 25,910 | 25,932 | -0,022 |
| 4 | 581553,661 | 6139195,215 | 17,335 | 17,32 | 0,015 |
| 5 | 581567,552 | 6139198,858 | 16,878 | 16,843 | 0,035 |
| 6 | 581596,571 | 6139206,469 | 15,990 | 15,986 | 0,004 |
| 7 | 581626,480 | 6139214,200 | 15,500 | 15,488 | 0,012 |
| 8 | 581655,700 | 6139220,892 | 15,027 | 15,047 | -0,020 |
| 9 | 581685,126 | 6139226,729 | 14,907 | 14,92 | -0,013 |
| 10 | 581714,714 | 6139231,684 | 14,660 | 14,658 | 0,002 |
| 11 | 581744,437 | 6139235,752 | 14,659 | 14,659 | 0,000 |
| 12 | 581774,268 | 6139238,930 | 15,230 | 15,219 | 0,011 |
| 13 | 581804,181 | 6139241,215 | 16,424 | 16,426 | -0,002 |
| 14 | 581834,149 | 6139242,605 | 18,075 | 18,083 | -0,008 |
| 15 | 581864,145 | 6139243,099 | 19,837 | 19,833 | 0,004 |
| 16 | 581894,143 | 6139242,749 | 21,693 | 21,692 | 0,001 |
| 17 | 581928,929 | 6139242,125 | 23,775 | 23,796 | -0,021 |
| 18 | 582132,530 | 6139238,471 | 32,808 | 32,791 | 0,017 |
| 19 | 582240,319 | 6139242,746 | 34,039 | 34,024 | 0,015 |

Tabla N° 6. Coordenadas de puntos a replantear con sus alturas relevadas ajustadas. Fuente:
Elaboración propia.

Como se menciona anteriormente, también se realiza un relevamiento de puntos sobre superficies planas u homogéneas, con el propósito de evaluar la precisión altimétrica del modelo en zonas de baja variación topográfica. En este caso, se relevan 15 puntos, cuyas diferencias de altura, respecto al modelo digital se presentan en la Tabla N° 7, permitiendo analizar la consistencia y exactitud del modelo de terreno en este tipo de superficies.

| Punto | E (UTM) | N (UTM) | Z (MDT) | Z (GNSS) | AZ |
|--------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------|
| 1 | 61392381,280 | 5822076,190 | 33,895 | 33,898 | -0,003 |
| 2 | 61392360,140 | 5821436,330 | 32,894 | 32,911 | -0,017 |
| 3 | 61392391,510 | 5820890,640 | 31,681 | 31,708 | -0,027 |
| 4 | 61392382,590 | 5819932,900 | 27,514 | 27,519 | -0,005 |
| 5 | 61392432,720 | 5818796,730 | 20,888 | 20,881 | 0,007 |
| 6 | 61392442,460 | 5818750,390 | 20,170 | 20,183 | -0,013 |
| 7 | 61392177,250 | 5817557,140 | 14,457 | 14,464 | -0,007 |
| 8 | 61392319,900 | 5817538,880 | 14,740 | 14,756 | -0,016 |
| 9 | 61392556,740 | 5817571,680 | 14,657 | 14,670 | -0,013 |
| 10 | 61392445,050 | 5817044,940 | 14,768 | 14,788 | -0,020 |
| 11 | 61392248,850 | 5816937,510 | 14,708 | 14,728 | -0,020 |
| 12 | 61392153,060 | 5816469,890 | 14,710 | 14,731 | -0,021 |
| 13 | 61392014,840 | 5816017,410 | 15,497 | 15,510 | -0,013 |
| 14 | 61391798,640 | 5815165,350 | 18,521 | 18,518 | 0,003 |
| 15 | 61391609,940 | 5814487,300 | 21,326 | 21,337 | -0,011 |

Tabla N° 7. Coordenadas de puntos extras relevados con sus alturas tanto en terreno como MDT. Fuente: Elaboración propia.

Para analizar el comportamiento de las diferencias altimétricas entre el modelo digital del terreno y las observaciones GNSS obtenidas en campo, se comparan las cotas del MDT con las alturas medidas en un conjunto de puntos de control. Para ello, se calculan las diferencias altimétricas

entre ambas fuentes de datos y se analizan estadísticamente mediante indicadores básicos, tales como el promedio, la desviación estándar y el error cuadrático medio (RMSE). Estos estadísticos permiten describir de manera sencilla el comportamiento conjunto de las diferencias, identificar posibles sesgos sistemáticos y estimar la dispersión de los valores obtenidos, sin implicar un estudio formal de calidad del modelo.

- Diferencias de altura (ΔZ):

$$\Delta Z = Z_{MDT} - Z_{GNSS}$$

- Promedio ($\bar{\Delta Z}$):

$$\bar{\Delta Z} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta Z_i$$

- Desviación estándar (σ):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta Z_i - \bar{\Delta Z})^2}$$

- Error cuadrático medio (*RMSE*):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta Z_i)^2}$$

Con el propósito de diferenciar adecuadamente los insumos utilizados en el análisis, se distinguen dos conjuntos de datos, ambos obtenidos a partir de observaciones GNSS. El primero corresponde al relevamiento ajustado de replanteo (Tabla N°6), integrado por puntos cuya ubicación está definida por el trazado altimétrico del proyecto y que se miden específicamente para verificar su correspondencia con el MDT. El segundo conjunto corresponde al relevamiento de puntos en

superficies homogéneas (Tabla N°7), conformado por observaciones registradas en sectores representativos del terreno, seleccionados por su continuidad superficial de manera al azar. Los resultados de dicho análisis se presentan en la Tabla N°8.

| <i>Estadístico</i> | <i>Valor</i> | |
|--------------------------------|------------------|---------------------|
| | <i>Replanteo</i> | <i>Relevamiento</i> |
| <i>n (cantidad de puntos)</i> | 19 | 15 |
| <i>Promedio (m)</i> | 0,002 | -0,012 |
| <i>Desviación estándar (m)</i> | 0,015 | 0,009 |
| <i>RMSE (m)</i> | 0,015 | 0,015 |
| <i>Mínima diferencia (m)</i> | -0,022 | -0,027 |
| <i>Máxima diferencia (m)</i> | 0,035 | 0,007 |

Tabla N° 8. Estadísticos básicos de las diferencias de altura entre el MDT y el relevamiento

GNSS. Fuente: Elaboración propia.

Dado que no se pretende realizar un estudio sobre la calidad del MDT, sino que se busca evaluar la coherencia de este, los estadísticos calculados permiten observar el comportamiento general de las diferencias altimétricas entre el MDT y los puntos GNSS. El valor promedio indica la presencia o ausencia de un sesgo sistemático entre ambas fuentes de información, mientras que la desviación estándar refleja la variabilidad de las diferencias en el conjunto analizado. Por su parte, el RMSE sintetiza el error total asociado a la comparación. Estos indicadores permiten interpretar la coherencia general del modelo respecto a las mediciones de campo.

Al analizar los estadísticos presentados en la Tabla N°8 se observa que, una vez aplicado el ajuste correspondiente al offset del centro de fase de la antena base, ambos conjuntos de puntos, tanto los provenientes del replanteo como los registrados sobre superficies homogéneas, muestran

diferencias altimétricas de muy baja magnitud respecto al modelo digital del terreno. En particular, los promedios obtenidos (0,002 m en el grupo de replanteo y -0,012 m en el relevamiento sobre superficies homogéneas) se ubican en el orden de los milímetros, lo que evidencia la ausencia de un sesgo vertical significativo entre las alturas GNSS corregidas y el MDT.

La desviación estándar y el RMSE refuerzan esta interpretación, ya que en ambos conjuntos los valores se mantienen acotados ($\sigma \approx 0,015$ m y RMSE $\approx 0,015$ m en el replanteo; $\sigma \approx 0,009$ m y RMSE $\approx 0,015$ m en las superficies homogéneas). Estos resultados son coherentes con los niveles de precisión esperables tanto para las mediciones RTK utilizadas como para el MDT derivado de la interpolación de la nube de puntos LiDAR. Asimismo, las diferencias mínimas y máximas registradas se encuentran en rangos reducidos, sin evidenciar la presencia de valores atípicos o inconsistencias locales relevantes.

Al comparar ambos conjuntos de puntos, se aprecia que el grupo de superficies homogéneas presenta una dispersión menor, atribuible a que estas observaciones se realizan sobre sectores firmes y estables, evitando la influencia de césped, vegetación baja o desniveles superficiales que pueden afectar tanto el retorno LiDAR como la medición GNSS en terreno. En cambio, los puntos de replanteo incluyen varios casos ubicados sobre el césped del cantero central, donde la vegetación puede introducir pequeñas variaciones en la lectura altimétrica, tanto en el LiDAR como en el hundimiento del bastón en el levantamiento con GNSS. No obstante, la diferencia en los valores de dispersión es mínima (0,006 m) y no compromete la coherencia general del modelo. En conjunto, los resultados permiten concluir que, el MDT generado presenta una muy buena correspondencia con las mediciones GNSS efectuadas en campo. La baja magnitud de las diferencias, junto con su estabilidad interna, permite afirmar que el MDT es consistente dentro del área analizada y adecuado para los fines del presente anteproyecto. Si bien el análisis se

circunscribe a un sector puntual de la traza de Avenida Italia, los datos LiDAR proporcionados por la Intendencia de Montevideo constituyen una base válida para el desarrollo de proyectos de estas características, pudiendo complementarse con un relevamiento detallado del eje del corredor y perfiles transversales del entorno, a fin de refinar el modelo y detectar o corregir posibles discrepancias locales no evidenciadas en esta evaluación.

13. Implementación de obra

En las obras civiles lineales, como el trazado de una vía férrea, el proceso de trasladar un proyecto teórico al terreno presenta numerosos desafíos técnicos. Se deben respetar condiciones de forma, dimensión y ubicación definidas por el proyecto, en un entorno que demanda alta precisión y coordinación entre equipos de distintas etapas. En este contexto, el Ingeniero Agrimensor desempeña un rol central al garantizar que esas condiciones geométricas se cumplan, mediante la materialización en el terreno de la estructura del proyecto en escala 1:1 y en tres dimensiones (Mangiaterra & Del Bianco, 2012).

El Agrimensor interviene desde la etapa inicial del diseño, planificando un sistema de referencia adecuado y construyendo el marco que lo materializa, conocido como Sistema Planialtimétrico de Apoyo, que constituye la base geométrica de toda la obra. A través de este sistema se logra la necesaria interoperabilidad entre el relevamiento, el proyecto ejecutivo y el replanteo, asegurando que los distintos actores involucrados trabajen en un mismo entorno referencial (Mangiaterra & Del Bianco, 2012). Su correcta implementación permite minimizar los errores de traslación, rotación o escala que pudieran surgir en la ejecución y evita costosos retrasos o ajustes de obra.

13.1. Elección de Proyección Cartográfica

La elección de la proyección cartográfica es un elemento clave para preservar la fidelidad del trazado respecto a la superficie terrestre real (elipsoide). Dependiendo el tipo de obra a realizar, cual es la mejor opción, teniendo en cuenta los diversos factores que se dan en cada caso. En el

presente proyecto, al tratar de una obra lineal de gran extensión con orientación predominante en sentido Oeste-Este, la elección de la proyección adquiere especial relevancia.

13.2. Universal Transversa Mercator

La proyección Universal Transversa Mercator (UTM), huso 21 sur para la mayoría del territorio uruguayo, inclusive Montevideo, es una opción bastante factible dado su carácter universal y su amplia aplicación, siendo el estándar oficial y permitiendo una compatibilidad directa con GNSS. Sin embargo, al tratarse de una proyección cilíndrica conforme transversal, es necesario considerar las desviaciones y deformaciones que pueden generarse a lo largo del eje principal del trazado de la obra, especialmente debido a la distancia recorrida en sentido Oeste-Este, alejándose del meridiano central (57° O).

13.2.1. Convergencia plana meridiana

Una de estas desviaciones, aspecto clave a considerar al utilizar la proyección UTM, es la convergencia plana de los meridianos, definida anteriormente dentro del capítulo 10.15 del Marco Teórico del presente informe. Al trabajar con coordenadas de dicha proyección, las direcciones norte y este del plano no coinciden exactamente con las direcciones geográficas verdaderas, por lo que, al pasar del plano al terreno, si no se tiene en cuenta dicha diferencia angular, una línea proyectada hacia el norte en el plano, en realidad estará desviada respecto al norte geográfico. Esta desviación, en proyectos de gran extensión lineal, tal como líneas férreas, se vuelve muy significativo, afectando la orientación y el ajuste de obra en terreno. Ignorar la convergencia plana puede generar diversos desalineamientos, errores en el replanteo y discrepancias en el

posicionamiento, ya que ocasiona errores de distancia, errores angulares, desajustes instrumentales al trabajar con GNSS y estación total en simultáneo, problemas de interoperabilidad, entre otros.

Los receptores GNSS operan directamente en coordenadas geodésicas, y, al exportar o mostrar coordenadas planas, el propio software del equipo realiza de manera automática la conversión mediante el modelo de proyección seleccionado, considerando la posición respecto al meridiano central de la zona. De esta forma, las coordenadas proyectadas obtenidas ya contemplan el efecto de la convergencia meridiana propia del sistema de proyección utilizado.

Por otro lado, al trabajar con una Estación Total, es de necesidad conocer la posición geográfica (latitud y longitud) del punto donde se estacione el instrumento, con el fin de calcular la convergencia meridiana correspondiente mediante la fórmula presentada previamente en el Marco Teórico del presente informe. Posteriormente, al orientar el instrumento, se debe optar por un criterio. Si se orienta el mismo al norte geográfico, se debe aplicar la corrección angular, igual al valor de la convergencia, a todos los azimuts o direcciones del proyecto. En cambio, si se orienta la Estación Total hacia el norte de la proyección, estableciendo la referencia con otro punto del proyecto que posea coordenadas conocidas en la proyección implementada, el sistema queda en sincronía con el sistema de proyección, sin necesidad de aplicar correcciones angulares adicionales. Este último criterio de orientación es el más práctico en caso de que el proyecto ya esté diseñado en coordenadas UTM, ya que el instrumento realiza su labor en el mismo sistema, evitando rotaciones. No obstante, en obras lineales de gran extensión, como la analizada en el presente trabajo, la convergencia plana varía a lo largo del trazado, por lo que se debe disponer de varios puntos con coordenadas conocidas a lo largo de la obra. De esta manera, se garantiza la coherencia geométrica y angular en todo el desarrollo, minimizando la acumulación de errores y

asegurando la correcta correspondencia entre el diseño proyectado y su materialización en el terreno.

A continuación, se presenta un análisis de la variación de la convergencia plana meridiana a lo largo de la zona de estudio, calculando ésta en los puntos extremos del trazado, Noreste, Noroeste, Sureste y Suroeste, y se opta por dividir el trazado en 4 franjas, realizando el cálculo también en el 1^{er} y 3^{er} cuarto del espacio del proyecto. Se estableció para el cálculo un azimut igual a cero.

| Punto | Convergencia γ | Error en 100 metros, sin considerar γ |
|-------|-----------------------|--|
| NE | -0° 32' 53.09'' | 0.956 m |
| NW | -0° 28' 59.77'' | 0.843 |
| SE | -0° 32' 53.91 | 0.957 m |
| SW | -0° 29' 0.50'' | 0.844 m |
| PM | -0° 30' 56.81'' | 0.900 m |
| 1/4M | -0° 29' 58.47'' | 0.872 m |
| 3/4M | -0° 31' 55.15'' | 0.928 m |
| NW SW | -0° 29' 0.13'' | 0.844 m |
| NE SE | -0° 32' 53.49'' | 0.957 m |

Tabla N° 9. Resultados cálculos de la convergencia plana meridiana para cada punto. Fuente:
Elaboración propia.



Figura N° 57. Distribución de puntos para cálculos. Fuente: Elaboración propia.

En la tabla N° 9 se aprecia el error que se podría implementar al orientar el equipo hacia el norte geográfico y no considerar la convergencia plana meridiana, siendo éste bastante significativo, aumentando al medir distancias grandes. Por ello, es aconsejable establecer un marco de referencia bien distribuido, de tal forma que siempre sea accesible orientar la estación a un punto de coordenadas conocidas en el proyecto, tal como se menciona anteriormente, evitando estos errores.

13.2.2. Coeficiente de deformación lineal para elementos infinitesimales

Otro aspecto relevante que se debe considerar al utilizar la proyección UTM es el coeficiente de deformación lineal k , también definido anteriormente dentro del Marco Teórico. El mismo expresa la relación entre una distancia medida sobre el plano de proyección y su distancia real sobre el terreno. Al ser UTM una proyección conforme el factor de escala no es constante, sino que varía en función de la distancia al meridiano central, lo cual es relevante en el presente proyecto de análisis dado a que el trazado de la vía se aleja del meridiano central. En caso de no considerar dicho factor las distancias proyectadas en el plano presentarán discrepancias respecto a las distancias medidas sobre el terreno, alcanzando valores de diferencia significativos cuanto más lejos del meridiano central se estudie.

De igual manera que con la convergencia meridiana, al emplear un equipo GNSS no es necesario incluir el coeficiente de deformación lineal k , ya que el software interno muestra las coordenadas proyectadas a partir de las coordenadas planas, las cuales calcula con la ley de la proyección. En cuanto a la influencia del coeficiente al utilizar la Estación Total, se debe introducir el valor de este en el instrumento para realizar las medidas acordes al proyecto.

A continuación, se presenta un estudio y posterior análisis de la variación del factor k a lo largo del trazado de la obra proyectada, con el fin de apreciar la dimensión de dicha variación y concluir cual es la manera más adecuada de implementar el coeficiente al presente caso. Para ello, se calcula el k en los puntos extremos del trazado, en el punto medio y en los cuartiles 1 y 3, de igual manera que se realiza con anterioridad, al calcular la convergencia plana meridiana. (Ver Figura N° 57)

Al realizar el correspondiente cálculo de k para cada caso, se obtienen los siguientes resultados para cada punto, donde también se adjunta el error correspondiente en cada uno al no considerar el mencionado coeficiente.

| <i>Punto</i> | <i>Coeficiente k</i> | <i>Error lineal en 100 metros, sin considerar el coef.</i> |
|--------------|----------------------|--|
| NE | 0,999694563 | 0,031 m |
| NW | 0,999673524 | 0,033 m |
| SE | 0,999694525 | 0,031 m |
| SW | 0,999673494 | 0,033 m |
| PM | 0,999683696 | 0,032 m |
| 1/4M | 0,999678520 | 0,032 m |
| 3/4M | 0,999689037 | 0,031 m |
| NW SW | 0,999673509 | 0,033 m |
| NE SE | 0,999694544 | 0,031 m |

Tabla N° 10. Resultados cálculos de coeficiente k para cada punto. Fuente: Elaboración propia.

Analizando los resultados se observa que la variación del coeficiente de deformación lineal a lo largo del trazado no es significativa, manteniéndose prácticamente constante en toda la zona de estudio. Esto se debe a que dicha variación no es lineal, ya que el coeficiente cambia de forma más

lenta en las proximidades del meridiano central y aumenta su variación a medida que se incrementa la distancia respecto a éste. El presente caso de estudio se localiza cercano a la línea azul de valor $k = 0.9997$ que se aprecia en la Figura N° 14, donde también se visualiza cómo varía el factor, tal cual se menciona recientemente. Si fuese el caso de que se extienda la obra, abarcando más longitud en sentido Este – Oeste, se debería estudiar nuevamente, y analizar si existe una variación más significativa. Por otro lado, si este mismo proyecto se ubicase, por ejemplo, en Maldonado, Punta del Este, allí sí se distingue con más claridad el cambio del valor del coeficiente a lo largo del trayecto.

En cuanto a la mínima variación del coeficiente k , tal como se aprecia en la Tabla N° 10, los coeficientes calculados para cada faja presentan diferencias del orden de 1×10^{-5} , lo cual se traduce en errores lineales cercanos a $0,031\text{--}0,033$ m a los 100 metros. Esta magnitud, prácticamente constante en todo el tramo analizado, indica que la deformación propia del sistema UTM se mantiene estable y no genera discrepancias significativas a escala del anteproyecto.

Desde un punto de vista práctico, especialmente al trabajar con una estación total en coordenadas UTM, resulta razonable evaluar el efecto del factor de escala en intervalos de longitud típicos de obra, como 100 metros. Considerando que el error introducido por la deformación no supera los 3 centímetros en ese rango, la utilización de un único valor de k para todo el tramo, como puede ser el valor en el punto medio (PM), no constituye una decisión inadecuada. De todas formas, si la obra cuenta con mojones materializados cada cierto tramo, se impide incrementar el error de deformación lineal, dado que, en vez de emitir mediciones de gran distancia, se puede volver a posicionar la estación total más cerca del objetivo a relevar. No obstante, la elección final puede depender de la disponibilidad y distribución de estos puntos de apoyo con coordenadas UTM.

confiables. También es válido optar por aplicar un factor k particular para cada faja, o incluso subdividir el tramo en zonas más pequeñas si la precisión requerida así lo demandara. En cualquier caso, lo esencial es comprender la naturaleza de la deformación asociada al sistema de proyección y evaluar su impacto sobre la obra para adoptar el criterio más adecuado.

13.3. Proyección Local

Una alternativa eficaz para reducir las deformaciones en obras lineales de gran extensión consiste en emplear una proyección local adaptada al eje del proyecto, como puede ser una Cónica Conforme de Lambert o una Oblicua Mercator. Estas proyecciones permiten ajustar los parámetros del sistema a la orientación y ubicación de la traza, logrando que las distancias representadas en el plano mantengan una correspondencia más precisa con las reales sobre el terreno. Sin embargo, implica definir y documentar sus parámetros específicos centrados en el proyecto.

Implementar la proyección Oblicua Mercator y alinear su eje central con el eje del trazado de la obra, es una opción que se adapta bastante al caso ya que minimiza las distorsiones en todo el desarrollo de la vía. En todo el trayecto se utiliza un mismo coeficiente de deformación lineal k , sin importar donde se sitúe el proyecto, Maldonado, Montevideo o cualquier otro sitio, por lo que dicha proyección es conveniente en todo tipo de obras lineales de gran tamaño. No obstante, definir este tipo de proyección no es del todo sencillo, por lo que no es usualmente utilizada.

Otra opción a optar es establecer una proyección local Transversa Mercator, definiendo los parámetros a conveniencia, adaptando los mismos al proyecto. El uso de este tipo de proyecciones locales es más frecuente, a diferencia de la Oblicua Mercator, dada su simpleza de definición al

proyectar sus parámetros. En el presente caso de estudio, se puede implementar una proyección local Transversa Mercator definida, por ejemplo, con los siguientes parámetros:

- Meridiano central sobre el medio del trazado, pasando sobre el punto medio establecido en la Figura N° 57.
- Latitud de origen, la cual sería conveniente establecer la misma al sur del trazado, resultando así trabajar siempre con valores positivos, dependiendo del parámetro falso Norte que se le asigne a la proyección
- Factor de escala en el meridiano central. En cuanto a éste, es conveniente asignarle el valor 1, minimizando así deformaciones lineales lo máximo posible.
- Falso Este. Al tratarse el de una obra lineal de extensión aproximada de 12 kilómetros, 12000 metros, se opta por implementar un falso Este de valor 6000 m o mayor. De esta forma la coordenada se mantiene positiva para cualquier punto situado en la zona del trazado.
- Falso Norte. En relación con lo mencionado en la latitud de origen, y como se define esta, es preferible asignar el valor 0 al falso Norte, con tal de que dicha coordenada sea siempre positiva.



Figura N° 58. Ejemplo esquemático de proyección local Transversa Mercator. Fuente:

Elaboración propia.

Ejemplo de archivo prj para proyección local:

```
PROJCS["Pryecto_ZP",GEOGCS["GCS_WGS_1984",DATUM["D_WGS_1984",SPHEROID[
    "WGS_1984",6378137.0,298.257223563]],PRIMEM["Greenwich",0.0],UNIT["Degree",0.
    0174532925199433]],PROJECTION["Transverse_Mercator"],PARAMETER["False_Eastin
    g",6000.0],PARAMETER["False_Northing",0.0],PARAMETER["Central_Meridian",-56.5535],
    PARAMETER["Scale_Factor",1.0],PARAMETER["Latitude_Of_Origin",-34.533081],UNIT["Meter",1.0]]
```

Figura N° 59. Ejemplo de archivo prj para proyección local. Fuente: Elaboración propia.

De todas formas, si bien la proyección Oblicua Mercator es la más adecuada, y la Transversa Mercator local una opción sencilla y recomendable, se considera mejor implementar la conocida proyección UTM zona 21 sur con el marco SIRGAS-ROU98, dado que se trata de un proyecto urbano de gran envergadura, en el cual interviene una gran cantidad de profesionales. De esta manera se utiliza una referencia universal y estandarizada que favorece la interoperabilidad y la transmisión segura de los datos a lo largo de todas las etapas del proyecto.

13.4. *Otras consideraciones en obras lineales*

Más allá del sistema de referencia y la red geodésica base, el Ingeniero Agrimensor debe considerar otras variables críticas para asegurar la calidad geométrica del proyecto. La correcta planificación del levantamiento topográfico, la recolección precisa de detalles relevantes para el diseño y la supervisión del proceso de replanteo, forman parte de un ciclo continuo de control y ajuste. El conocimiento técnico de este profesional también resulta clave en el control de deformaciones estructurales, en el posicionamiento preciso de estructuras prefabricadas y en la planificación de posibles ampliaciones o modificaciones futuras de la obra (Mangiaterra & Del Bianco, 2012).

Cuando se enfrentan tareas que requieren precisiones ajustadas, tiempos exiguos y mediciones en campo, es indispensable contar con los conocimientos, la experiencia y los instrumentos propios de la agrimensura, para garantizar que cada elemento del proyecto se ejecute conforme a las tolerancias estipuladas y se integre armónicamente con su entorno (Mangiaterra & Del Bianco, 2012).

En el desarrollo de toda obra de gran infraestructura, como obras lineales de gran extensión, resulta de vital importancia establecer un marco de referencia planimétrico y altimétrico confiable, que asegure la coherencia geométrica del proyecto a lo largo de toda su traza. En este sentido, es recomendable establecer un marco de referencia a través de la implementación de mojones, ubicados estratégicamente en distintos sectores de la obra. La determinación de estos puntos debe realizarse mediante observaciones GNSS de alta precisión, vinculándolos con las estaciones permanentes del Instituto Geográfico Militar (IGM). De esta forma, se obtiene una red la cual queda integrada al sistema geodésico oficial del país (SIRGAS-ROU98), lo que garantiza la trazabilidad de la información y la compatibilidad con otros relevamientos o proyectos

complementarios.

Como resultado de este proceso, se obtienen las coordenadas de los mojones tanto en el sistema geodésico (latitud, longitud y altura elipsoidal) como en el sistema proyectado UTM, zona 21 Sur.

Durante las etapas de replanteo y control de obra, estos mojones constituyen la base fundamental desde la cual se establecen las estaciones de trabajo. La selección del instrumento más adecuado dependerá de la precisión requerida en cada fase, siendo el GNSS apropiado para tareas de control general o verificaciones globales, mientras que la Estación Total ofrece una mayor exactitud en mediciones de detalle, siempre que se consideren correctamente los efectos de la convergencia meridiana y del coeficiente de deformación lineal (k) mencionados anteriormente.

En consecuencia, la correcta implementación y mantenimiento de esta red de control geodésico no solo permite garantizar la calidad geométrica de la obra, sino que además facilita la interoperabilidad entre los distintos equipos técnicos involucrados, favoreciendo un flujo de información confiable y consistente a lo largo de todo el desarrollo del proyecto.

14. Conclusiones

El presente proyecto de grado, tal como se plantea en su introducción y se demuestra a lo largo de su desarrollo, no tiene como finalidad principal proponer una solución definitiva al problema del transporte urbano en Montevideo. Por el contrario, su objetivo radica en integrar conocimientos y áreas de trabajo vinculadas a la formación del Ingeniero Agrimensor, articulando herramientas y competencias adquiridas durante toda la carrera.

En este sentido, se aborda el proceso completo que va desde el relevamiento y la recopilación de datos geoespaciales hasta la formulación de una propuesta de anteproyecto geométrico. Durante dicha etapa, se enfrentaron dificultades propias del trabajo profesional, como la obtención de información georreferenciada actualizada y la necesidad de gestionar permisos, o limitantes de recursos, para el uso de tecnologías específicas. A partir de estas limitaciones, se exploraron soluciones alternativas mediante el uso de datos públicos, lo que permitió no solo continuar con el trabajo sino también demostrar la capacidad de adaptación y análisis que debe caracterizar a un agrimensor calificado frente a contextos diversos.

Asimismo, se contemplaron nociones fundamentales del diseño de caminos, que, si bien una obra vial de estas características se encuentra fuera de los márgenes de competencia que puede asumir un agrimensor, es importante tener un conocimiento, aunque sea básico, de los elementos que se emplean en el trazado geométrico de una vía, ya que podemos ser nosotros quienes lleven los elementos proyectados a la realidad del terreno. Igualmente permite visibilizar cómo, desde la Agrimensura, se puede participar activamente en el diseño geométrico de obras lineales, contribuyendo con precisión técnica y criterio territorial.

Otro aspecto abordado en el trabajo se refiere a la planificación y gestión de obra. En esta etapa, se enfatizó la importancia de prever errores potenciales, evaluar su impacto y anticipar soluciones viables, todo esto antes de que tales errores se manifiesten en la etapa constructiva, donde podrían traducirse en demoras o costos innecesarios. En este marco, se destacan la implementación de redes de control, la correcta elección de sistemas de referencia y proyección, y la necesidad de garantizar entornos de trabajo coordinados para todos los profesionales involucrados en la obra, tanto ingenieros como topógrafos o técnicos de campo.

Un enfoque menos frecuente, pero igualmente relevante, es el que aborda el impacto territorial de este tipo de infraestructuras. Desde una perspectiva más amplia como el ordenamiento territorial, se reconoce la necesidad de que las obras viales, sean rurales o urbanas, se inserten en marcos de planificación local e integral. En este punto, el agrimensor puede asumir un rol activo en la toma de decisiones estratégicas mediante la valoración de alternativas, evaluando posibles expropiaciones, y aplicando facultades tanto legales como del punto de vista avaluatorios. Estas competencias, también desarrolladas durante la formación universitaria, refuerzan la visión multidisciplinaria e integral del perfil profesional. Dicho enfoque puede ser apto para abordar en un proyecto de grado, por ejemplo, estudiando y analizando el impacto que generaría implementar la presente obra en cuanto al avalúo de los alrededores. (Ver Anexo 16.3)

En resumen, este proyecto de grado permite simular y exemplificar múltiples dimensiones del ejercicio profesional del Ingeniero Agrimensor, enfrentando problemáticas reales y ensayando soluciones dentro de un marco técnico fundamentado. Al mismo tiempo, sienta bases sólidas para futuros estudios más específicos y detallados, tanto por agrimensores, como otros profesionales

que deseen profundizar en áreas como la evaluación de impacto, la simulación operacional o la ingeniería estructural de obras ferroviarias.

15. Bibliografía

- Aronoff, S., (1989). “*Geographic Information Systems: A Management Perspective*”, Ottawa
- Olaya, V., (2020). “*Sistemas de Información Geográfica*”. [Edición digital]
- Frega, A., (2024). “*Montevideo trescientos años*”, Intendencia de Montevideo
- Centro de Investigaciones Económicas (CINVE). (2023). *La transformación del sistema de transporte público en el Área Metropolitana de Montevideo*”
<https://www.cinve.org.uy>
- Transportation Research Board (TRB), (2012). “*Track Design Handbook for Light Rail Transit*”, Washington, D.C.
- Ajuntament de Barcelona, (2016). “*ESTUDIS PER A LA CONNEIXÓ DE LES XARXES TRAMBAIX I TRAMBESÒS FASE 1*”, Barcelona
- Leica Geosystems, (2006). “*Leica TPS400 Series Manual de empleo*”, Suiza
- Berné, J. L., Anquela, A. B., & Garrido, N., (2014). “*GNSS. GPS: fundamentos y aplicaciones en Geomática*”, Valencia
- Facultad de Ingeniería, (1997). “*Plan de estudios de la carrera de Agrimensura*”. Universidad de la República
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Coastal Services Center. (2012). “*Lidar 101: An Introduction to Lidar Technology, Data, and Applications.*”, Charleston, SC: NOAA Coastal Services Center,
- Snyder, J. P., (1987). “*Map projections: A working manual (USGS Professional Paper 1395)*”. United States Geological Survey

- Mangiaterra, M, A. & Del Bianco, A., (2012). “*El protagonismo del Ingeniero Agrimensor en las obras de ingeniería*”, 8th FIG Regional Conference
- Casanova, R., Sosa, R., Mariángelos, A., Canneva, N. & Silvera, A., (2012). “*Algunos conceptos sobre: Cartografía y SIG, Hacia la representación del territorio*”, GTIG-FING-UdelaR, Montevideo
- Martínez, R., (2012). “*Apuntes Cartografía Matemática*”, Facultad de Ingeniería UdelaR
- Bergkvist, J., (2015). “*Optimal Design of Network for Control of Total Station Instruments*”, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden
- Felicísimo, M., (1994). “*Modelos Digitales del Terreno*”, Oviedo
<http://www.etsimo.uniovi.es/~feli>
- Carrilho, A., (2016). “*Aplicação de técnicas de processamento e análise de imagens para detecção de edificações e vegetação a partir de dados LiDAR*”, Universidade Estadual Paulista
- Alstom S.A., (2020). “*Citadis X05: Product sheet*” [Folleto técnico].
- Administración de Ferrocarriles del Estado, (s.f.) “Historia”
<https://www.afe.com.uy/historia/>

16. Anexo

16.1. Parámetros de Trazado

La definición de los parámetros geométricos adoptados para el diseño preliminar de la vía tranviaria se fundamenta en el estudio de documentación técnica internacional y antecedentes nacionales relevantes. Como fuente principal se utilizó el *Track Design Handbook for Light Rail Transit* publicado por la *Transportation Research Board* (TRB), el cual establece criterios normativos y recomendaciones para sistemas de tren ligero en contextos urbanos (Transportation Research Board, 2012).

Asimismo, se analizaron estudios técnicos y memorias de diseño correspondientes a proyectos de tranvías en funcionamiento en distintos países, tales como Australia, España, Finlandia, Francia y Suiza. A nivel nacional, también se tomaron en cuenta parámetros utilizados en el Proyecto Ferroviario Central, cuyas obras concluyeron en diciembre de 2023. Se consideraron archivos técnicos disponibles y experiencias acumuladas durante la ejecución de dicho corredor ferroviario, particularmente en lo referente a secciones de vía en entornos urbanos y transiciones geométricas.

Para dimensionar las características del material rodante que circularía sobre la vía propuesta, se tomó como referencia el modelo Citadis X05 (305), de la empresa francesa Alstom, ampliamente utilizado en ciudades como Barcelona y otras con redes de tranvía moderno.

Cabe aclarar que los parámetros geométricos adoptados en esta instancia responden a un trazado básico y preliminar, propio de un anteproyecto de carácter académico. Las definiciones aquí presentadas no contemplan la totalidad de los recaudos técnicos, constructivos y normativos requeridos para el diseño definitivo de una vía tranviaria.

Planimetría

Ancho de vía

Al tratarse de un caso en el que no existe una red de vías en operación, con un ancho de vía determinado, se tomará como ancho de vía, o trocha, el estándar internacional que es de 1435 mm.

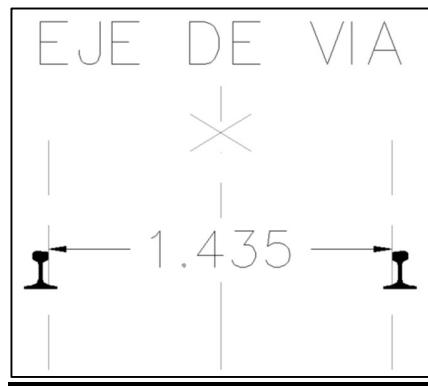


Figura N° X. Corte transversal de vía. Fuente: Elaboración propia.

Velocidad de diseño o máxima

La velocidad de diseño es un parámetro clave que condiciona la determinación del resto de los elementos geométricos del trazado, tanto desde el punto de vista de la seguridad como del confort. Representa la velocidad máxima esperada a la que podría operar el vehículo en condiciones normales. Su elección depende de factores como el tipo de vía, si esta es exclusiva o compartida con otros medios de transporte como los automóviles o buses, el entorno urbano, las características del vehículo y los objetivos operativos del sistema, como tiempos de viaje y frecuencia. En vías compartidas o entornos urbanos densos, las velocidades típicas varían entre 15 y 40 km/h, mientras que en corredores exclusivos pueden alcanzar entre 40 y 70 km/h. Dado que el vehículo que se toma como ejemplo para implementar en la vía tiene como característica una velocidad máxima de 80 km/h (Alstom S.A., 2020) y la velocidad máxima permitida en varios tramos de Avenida Italia para el resto de los vehículos es de 75 km/h, resulta adecuado tomar como velocidad máxima de diseño los 60 km/h, lo cual no quiere decir que el tranvía siquiera llegue a esas velocidades en la práctica, simplemente la vía estará diseñada de tal forma para que sea posible circular a velocidad de diseño.

Longitud mínima de tramo recto entre curvas horizontales

Uno de los principales criterios proviene del Manual de AREMA (*American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association*), el cual establece que la longitud mínima de recta entre curvas con sentido opuesto debe ser, al menos, igual a la longitud del vehículo más largo que circulará por el sistema, en este caso se tiene un vehículo de 37 metros. En la práctica, este criterio suele traducirse en una longitud mínima recomendada de 30 metros.

No obstante, además del requerimiento geométrico, resulta fundamental incorporar consideraciones relativas al confort de los pasajeros, especialmente en sistemas de transporte público como tranvías o trenes urbanos. Para ello, se utiliza una fórmula empírica que garantiza un mínimo de dos segundos de recorrido en tramo recto entre dos curvas, lo cual contribuye significativamente a mejorar la comodidad del viaje y la estabilidad del vehículo. Esta relación se expresa de la siguiente forma:

$$L_i = 0,57 \times v$$

Donde:

- L_i : longitud mínima del tramo recto entre curvas, en metros
- v : velocidad operativa, en km/h

Radios de curvas circulares

En el diseño planimétrico de una vía tranviaria, las curvas horizontales simples se utilizan para conectar segmentos rectos mediante tramos circulares de radio constante. En este anteproyecto, el diseño se ha simplificado deliberadamente, prescindiendo de elementos como peralte y sobreanchos. El radio mínimo de diseño para vías principales en sistemas de tren ligero, según la literatura técnica, se establece en torno a 25 metros, aunque ciertos modelos de tranvías permiten operar con radios mínimos absolutos de hasta 10,7 metros en entornos restringidos, como patios o desvíos técnicos (Transportation Research Board, 2012).

Para asegurar una transición adecuada y evitar giros abruptos, la longitud mínima recomendada para una curva circular sin peralte se estima mediante la fórmula:

$$L = 0,57 \times v$$

Donde:

- L : longitud mínima del tramo recto entre curvas horizontales, en metros
- v : velocidad operativa, en km/h

Esta expresión garantiza una experiencia de viaje confortable, incluso en ausencia de elementos transicionales como espirales. Por ejemplo, para una velocidad de 60 km/h, la curva debería tener al menos 34 metros de desarrollo.

En los casos en que dos curvas consecutivas de sentidos opuestos se conectan en un mismo tramo, se recomienda intercalar una longitud mínima de tangente entre curvas, también estimada con la fórmula:

$$L_T = 0,57 * v$$

Donde:

- L_T : longitud mínima del tramo recto entre curvas contrarias, en metros
- v : velocidad operativa, en km/h

De esta manera, se asegura una transición gradual en la dirección del movimiento, evitando el efecto de “zigzag” que puede generar incomodidad al usuario y esfuerzos dinámicos de fricción sobre la vía y los vehículos.

Otros parámetros que no se tendrán en cuenta

Curvas de transición (espirales):

Dependen de la velocidad de circulación y suelen ser más necesarias a velocidades mayores a 40 km/h. Estas suelen considerarse necesarias para el confort y reducir el efecto de las fuerzas laterales.

Sobreanchos:

En curvas cerradas se requiere sobreancho de vía para evitar que el cuerpo del tranvía invada la vía opuesta o zonas adyacentes. El sobreancho varía según el radio de curva y la longitud del tranvía, cuanto menor sea el radio de la curva mayores serán los sobreanchos.

Peralte:

Generalmente no se aplica peralte sobre la vía en zonas urbanas por la baja velocidad que alcanza un tranvía, pero sí podría considerarse aplicarlo en corredores segregados o de mayor velocidad. En este caso se obvia en la totalidad de la vía.

Altimetría

El alineamiento vertical en un sistema de tren ligero se compone de segmentos con pendiente constante, los cuales están conectados entre sí mediante curvas parabólicas verticales.

Longitud mínima de tramo recto entre curvas verticales

Se establece una longitud mínima para los tramos de pendiente constante que se encuentran entre curvas verticales sucesivas, esta longitud mínima tiene como finalidad garantizar transiciones suaves y seguras, tanto desde el punto de vista operativo como en términos de confort para los pasajeros.

Según las recomendaciones de diseño, la longitud deseada de estos tramos rectos debe ser de al menos 30 metros. Alternativamente, puede calcularse al igual que en los tramos rectos entre curvas horizontales, utilizando la expresión:

$$L = 0,57 \times v$$

Donde:

- L : longitud mínima del tramo recto entre curvas verticales, en metros
- v : velocidad operativa, en km/h

En casos excepcionales, se admite como valor mínimo absoluto una longitud de 12 metros, aunque este valor solo debe utilizarse cuando las restricciones del trazado lo justifiquen.

Pendientes máximas

Para garantizar un funcionamiento seguro y eficiente del tren ligero, las pendientes en las vías deben mantenerse dentro de ciertos límites, según la longitud del tramo:

- En tramos largos sin límite de extensión, la pendiente no debe superar el 4 %.
- Si la distancia entre los puntos de cambio de pendiente es de hasta 750 metros, se permite una pendiente de hasta 6 %.
- En tramos cortos, con no más de 150 metros entre curvas verticales, puede aceptarse una pendiente de hasta 8 %.
- Además, para asegurar un buen drenaje en vías con fijación directa, se recomienda una pendiente mínima de 0,2 %.

Acordamientos verticales

Estas curvas parabólicas permiten una transición suave en el cambio de pendiente entre dos tramos rectos, contribuyendo así tanto a la seguridad operacional como al confort de los pasajeros. Las curvas verticales utilizadas en este tipo de alineamientos presentan una tasa constante de cambio

de pendiente, lo que permite un diseño predecible y eficiente desde el punto de vista constructivo y operativo. Este enfoque facilita la adaptación del trazado a las variaciones del terreno y evita cambios bruscos en la inclinación del vehículo, que podrían resultar incómodos o inseguros.

Para definir su longitud, se recomiendan los siguientes criterios:

- **Longitud deseada:**

$$LVC = 60 \times A$$

- **Longitud mínima recomendada:**

$$LVC = 30 \times A$$

- **Longitud mínima absoluta:**

- Para crestas:

$$LVC = \frac{A \times V^2}{215}$$

- Para valles:

$$LVC = \frac{A \times V^2}{387}$$

Donde:

- LVC : es la longitud de la curva vertical en metros.
- $A = G_2 - G_1$: es la diferencia entre pendientes de entrada y salida.
- V : es la velocidad de diseño en km/h.
- G_1 y G_2 son las pendientes de entrada y salida, respectivamente.

Consideraciones fuera del alcance del presente estudio

En esta etapa del anteproyecto se delimitan ciertos aspectos que, si bien resultan relevantes para el diseño integral de una infraestructura ferroviaria, no serán abordados en profundidad debido al enfoque específico del trabajo y a su carácter preliminar. Entre ellos se destacan los siguientes:

Visibilidad:

No se contempla un análisis detallado de visibilidad a lo largo del trazado. Se asume que el diseño geométrico respetará las condiciones mínimas de seguridad visual en etapas futuras del proyecto.

Drenaje:

No se realiza una evaluación del sistema de drenaje superficial o subterráneo asociado a la vía. El diseño hidráulico deberá ser abordado posteriormente, en conjunto con otras disciplinas vinculadas al saneamiento urbano y la infraestructura vial.

Sistema de catenaria:

No se considera en esta fase si la tracción eléctrica del tranvía se realizará mediante catenaria aérea o sistemas alternativos sin catenaria (como alimentación por suelo o baterías embarcadas). En caso de optarse por el uso de postes para soporte de catenaria, su localización deberá integrarse al diseño geométrico definitivo.

Corte transversal de vías

Para la definición del ancho de la faja de circulación de una línea de tranvía, es necesario contemplar una serie de factores vinculados tanto a la seguridad operativa del vehículo como a las condiciones del entorno urbano por el que se implementa una nueva infraestructura. En términos generales, la faja del tranvía debe garantizar espacio suficiente para alojar el ancho de vía, la separación entre ejes de ambas vías paralelas circulando en sentidos opuestos, y márgenes laterales de seguridad que permitan absorber movimientos dinámicos del tranvía, tolerancias de operación y condiciones de mantenimiento. Según manuales internacionales de diseño de tranvías y trenes ligeros, los márgenes laterales adicionales se definen para evitar interferencias con elementos adyacentes, facilitar la visibilidad y permitir una franja de resguardo entre el material rodante y elementos como veredas, mobiliario urbano o columnas de servicios. Estos espacios laterales también contemplan aspectos de seguridad para peatones y eventuales maniobras de evacuación (Transportation Research Board, 2012).

En el caso de este anteproyecto, se toma como referencia la configuración de sistemas tranviarios ya implementados en ciudades europeas con características operativas similares. En particular, se analizó el proyecto del Tranvía de Barcelona, que utiliza unidades Citadis X05 (305), de la empresa francesa Alstom, uno de los modelos considerados como ejemplo técnico en este trabajo. En tramos comparables a la configuración propuesta para transcurrir en el cantero central de Avenida Italia, la faja de vía doble se define con un ancho aproximado de 7 metros, incluyendo la separación entre vías y los márgenes laterales de seguridad (Ajuntament de Barcelona, 2016).

Este ancho estándar resulta adecuado como valor de referencia para la fase de anteproyecto, ya que permite un espacio operativo mínimo para la circulación simultánea de dos tranvías en sentidos opuestos. En la práctica, la determinación definitiva de la faja debe contemplar un análisis detallado de cada tramo, considerando la interacción con estructuras existentes, limitaciones de calzada, cruces, postes de catenaria, en caso de ser necesarios y medidas de control de tráfico.

No obstante, en este anteproyecto se opta por simplificar el diseño y trabajar con una única faja tipo de 7 metros de ancho para todo el corredor propuesto, dejando planteada la necesidad de evaluar variantes de separación de vías, ramales independientes o ajustes de sección transversal en una etapa de proyecto avanzado más detallado.

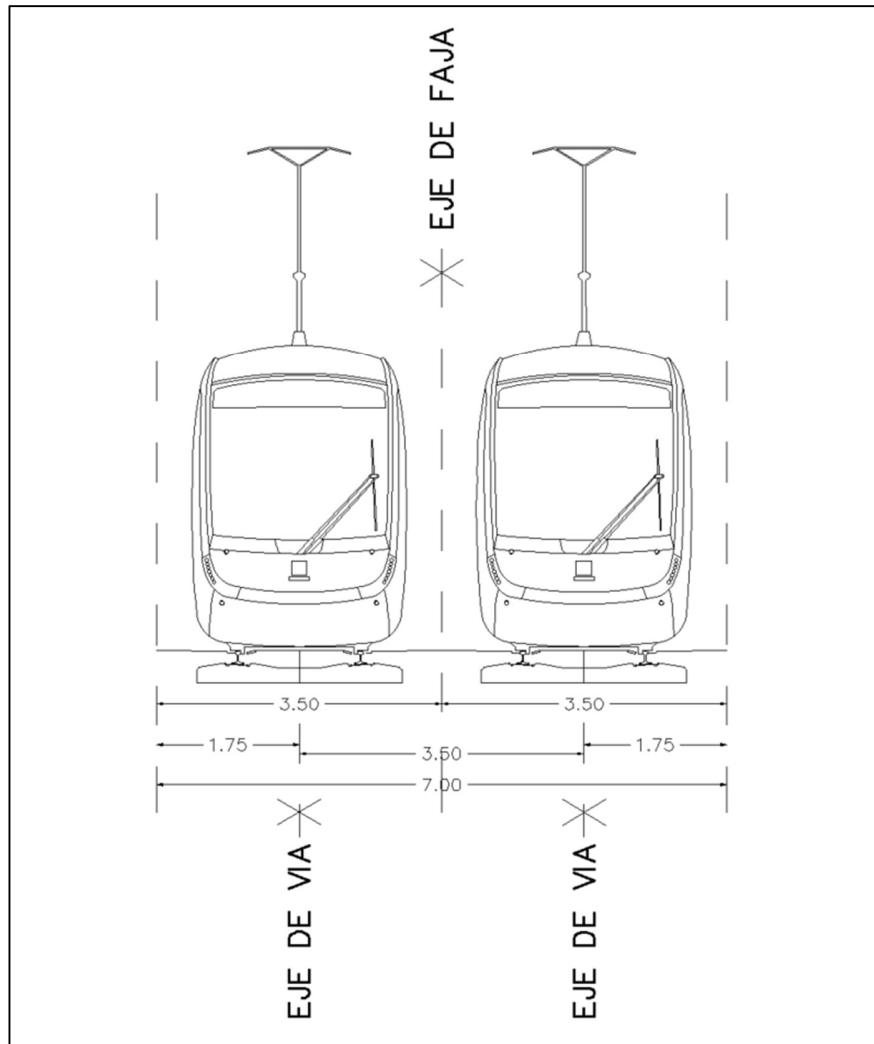


Figura N°X. Corte transversal de faja tipo de 7 metros con tranvía modelo. Fuente:

Elaboración propia.

16.2. Archivo ANTEX

El archivo ANTEX consultado en el presente informe de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), se puede acceder mediante el enlace:

https://geodesy.noaa.gov/ANTCAL/LoadFile?file=CHCC220GR2_CHCD.atx

1.4 M

A
This calibration extracted from composite ngs20.atx. See
the composite file ngs20.atx for more information.

ANTEX VERSION / SYST
PCV TYPE / REFANT
COMMENT
COMMENT
END OF HEADER
START OF ANTENNA
CHCC220GR2 CHCD
ROBOT Geo++ GmbH 5 09-JUN-19 METH / BY / # / DATE
5.0
0.0 90.0 5.0
17
IGS20_2233
PCV #a 005 #c 024 #s 024 | G01 E01 J01 S01 C01 COMMENT
PCV #a 005 #c 024 #s 024 | G02 J02 COMMENT
PCV #a 005 #c 024 #s 024 | G05 E05 J05 C05 S05 I05 COMMENT
PCV #a 005 #c 024 #s 024 | R01 R04 COMMENT
PCV #a 005 #c 024 #s 023 | R02 R06 COMMENT
a: #antennas, c: #calibrations, s: #sets for frequency
G01
0.38 0.31 120.32
NOAZI 0.00 -0.12 -0.49 -1.10 -1.91 -2.82 -3.73 -4.51 -5.04 -5.27 -5.20 -4.85 -4.19 -3.15 -1.60 0.53 3.22 6.18 8.93
0.0 0.00 -0.10 -0.46 -1.07 -1.89 -2.81 -3.71 -4.44 -4.94 -5.16 -5.10 -4.78 -4.15 -3.12 -1.58 0.51 3.05 5.77 8.29
5.0 0.00 -0.10 -0.46 -1.08 -1.90 -2.82 -3.72 -4.45 -4.93 -5.14 -5.08 -4.77 -4.16 -3.14 -1.62 0.47 3.01 5.74 8.26
10.0 0.00 -0.10 -0.47 -1.09 -1.91 -2.84 -3.73 -4.45 -4.93 -5.13 -5.07 -4.76 -4.16 -3.17 -1.66 0.42 2.97 5.71 8.23
15.0 0.00 -0.10 -0.47 -1.10 -1.92 -2.85 -3.74 -4.46 -4.92 -5.11 -5.05 -4.75 -4.16 -3.19 -1.70 0.38 2.94 5.78 8.22
20.0 0.00 -0.11 -0.48 -1.10 -1.93 -2.86 -3.75 -4.47 -4.92 -5.10 -5.04 -4.73 -4.16 -3.21 -1.73 0.35 2.93 5.70 8.21
25.0 0.00 -0.11 -0.48 -1.11 -1.94 -2.88 -3.76 -4.48 -4.93 -5.10 -5.03 -4.73 -4.16 -3.22 -1.75 0.33 2.92 5.71 8.22
30.0 0.00 -0.11 -0.49 -1.12 -1.95 -2.89 -3.78 -4.49 -4.94 -5.11 -5.03 -4.72 -4.16 -3.22 -1.75 0.32 2.93 5.73 8.24
35.0 0.00 -0.11 -0.49 -1.12 -1.96 -2.89 -3.79 -4.51 -4.96 -5.13 -5.04 -4.72 -4.15 -3.21 -1.74 0.34 2.95 5.77 8.28
40.0 0.00 -0.12 -0.49 -1.13 -1.96 -2.90 -3.80 -4.53 -4.98 -5.15 -5.05 -4.72 -4.14 -3.19 -1.72 0.37 2.99 5.83 8.34
45.0 0.00 -0.12 -0.50 -1.13 -1.96 -2.90 -3.81 -4.54 -5.01 -5.18 -5.07 -4.73 -4.13 -3.16 -1.68 0.41 3.05 5.90 8.42
50.0 0.00 -0.12 -0.50 -1.13 -1.96 -2.90 -3.81 -4.55 -5.03 -5.20 -5.10 -4.75 -4.13 -3.14 -1.64 0.46 3.11 5.98 8.52
55.0 0.00 -0.12 -0.50 -1.13 -1.96 -2.89 -3.81 -4.56 -5.05 -5.23 -5.13 -4.76 -4.12 -3.12 -1.60 0.51 3.18 6.07 8.63
60.0 0.00 -0.13 -0.51 -1.13 -1.95 -2.88 -3.80 -4.56 -5.06 -5.26 -5.16 -4.78 -4.12 -3.10 -1.57 0.56 3.24 6.16 8.75
65.0 0.00 -0.13 -0.51 -1.13 -1.94 -2.87 -3.79 -4.55 -5.07 -5.27 -5.18 -4.80 -4.13 -3.09 -1.54 0.60 3.30 6.24 8.86
70.0 0.00 -0.13 -0.51 -1.12 -1.93 -2.85 -3.77 -4.54 -5.07 -5.28 -5.20 -4.82 -4.14 -3.08 -1.52 0.63 3.34 6.30 8.96
75.0 0.00 -0.13 -0.51 -1.12 -1.92 -2.84 -3.75 -4.53 -5.06 -5.29 -5.21 -4.83 -4.15 -3.08 -1.52 0.64 3.36 6.34 9.04
80.0 0.00 -0.14 -0.51 -1.12 -1.91 -2.82 -3.73 -4.51 -5.04 -5.28 -5.21 -4.84 -4.16 -3.09 -1.53 0.63 3.35 6.36 9.09
85.0 0.00 -0.14 -0.52 -1.12 -1.91 -2.81 -3.71 -4.49 -5.03 -5.27 -5.21 -4.84 -4.16 -3.11 -1.55 0.60 3.33 6.34 9.11
90.0 0.00 -0.14 -0.52 -1.12 -1.90 -2.80 -3.69 -4.47 -5.01 -5.26 -5.20 -4.84 -4.17 -3.12 -1.58 0.56 3.28 6.31 9.10
95.0 0.00 -0.14 -0.52 -1.12 -1.90 -2.79 -3.68 -4.45 -5.00 -5.25 -5.19 -4.83 -4.17 -3.14 -1.61 0.51 3.22 6.25 9.06
100.0 0.00 -0.15 -0.52 -1.12 -1.90 -2.78 -3.68 -4.45 -4.99 -5.24 -5.24 -4.83 -4.17 -3.15 -1.64 0.46 3.15 6.18 9.01
105.0 0.00 -0.15 -0.53 -1.12 -1.90 -2.78 -3.67 -4.44 -4.98 -5.23 -5.17 -4.82 -4.17 -3.16 -1.67 0.41 3.08 6.11 8.94
110.0 0.00 -0.15 -0.53 -1.12 -1.90 -2.78 -3.67 -4.44 -4.98 -5.23 -5.17 -4.82 -4.17 -3.17 -1.70 0.37 3.02 6.04 8.88
115.0 0.00 -0.15 -0.53 -1.13 -1.90 -2.79 -3.68 -4.45 -4.99 -5.23 -5.17 -4.81 -4.17 -3.18 -1.72 0.33 2.97 5.98 8.83
120.0 0.00 -0.15 -0.54 -1.13 -1.91 -2.80 -3.69 -4.46 -4.99 -5.23 -5.17 -4.82 -4.17 -3.18 -1.73 0.31 2.94 5.95 8.79
125.0 0.00 -0.15 -0.54 -1.14 -1.91 -2.80 -3.69 -4.46 -5.00 -5.24 -5.18 -4.82 -4.18 -3.19 -1.73 0.31 2.93 5.93 8.77

G01
G02
0.16 -0.28 142.07
NOAZI 0.00 -0.05 0.14 -0.37 -0.76 -1.28 -1.89 -2.46 -2.88 -3.09 -3.07 -2.87 -2.56 -2.14 -1.50 -0.41 1.37 3.99 7.30
0.0 0.00 -0.03 -0.13 -0.32 -0.63 -1.09 -1.65 -2.23 -2.71 -3.00 -3.06 -2.90 -2.57 -2.11 -1.46 -0.45 1.15 3.60 6.94
5.0 0.00 -0.03 -0.12 -0.31 -0.62 -1.08 -1.65 -2.25 -2.75 -3.05 -3.11 -2.93 -2.59 -2.12 -1.47 -0.47 1.13 3.61 7.04
10.0 0.00 -0.03 -0.12 -0.30 -0.62 -1.09 -1.67 -2.29 -2.80 -3.11 -3.16 -2.97 -2.61 -2.12 -1.47 -0.48 1.13 3.65 7.19
15.0 0.00 -0.02 -0.11 -0.29 -0.62 -1.10 -1.70 -2.34 -2.86 -3.18 -3.21 -3.01 -2.63 -2.13 -1.47 -0.47 1.16 3.74 7.39
20.0 0.00 -0.02 -0.11 -0.29 -0.63 -1.12 -1.75 -2.39 -2.93 -3.24 -3.26 -3.04 -2.64 -2.13 -1.47 -0.46 1.21 3.86 7.62
25.0 0.00 -0.02 -0.11 -0.29 -0.64 -1.15 -1.79 -2.45 -2.99 -3.29 -3.30 -3.06 -2.64 -2.12 -1.45 -0.43 1.28 4.00 7.87
30.0 0.00 -0.02 -0.10 -0.30 -0.65 -1.18 -1.84 -2.51 -3.05 -3.34 -3.33 -3.07 -2.64 -2.12 -1.44 -0.39 1.37 4.16 8.11
35.0 0.00 -0.02 -0.10 -0.30 -0.67 -1.21 -1.88 -2.55 -3.08 -3.36 -3.34 -3.07 -2.64 -2.12 -1.43 -0.35 1.47 4.32 8.32
40.0 0.00 -0.02 -0.10 -0.31 -0.68 -1.23 -1.91 -2.58 -3.10 -3.37 -3.33 -3.06 -2.64 -2.12 -1.41 -0.30 1.57 4.48 8.49
45.0 0.00 -0.01 -0.10 -0.31 -0.70 -1.26 -1.93 -2.59 -3.11 -3.36 -3.32 -3.05 -2.64 -2.12 -1.40 -0.24 1.67 4.61 8.61
50.0 0.00 -0.01 -0.10 -0.32 -0.71 -1.27 -1.94 -2.59 -3.09 -3.33 -3.30 -3.05 -2.65 -2.13 -1.39 -0.19 1.77 4.73 8.66
55.0 0.00 -0.01 -0.10 -0.32 -0.72 -1.28 -1.94 -2.58 -3.07 -3.31 -3.28 -3.05 -2.67 -2.15 -1.39 -0.14 1.87 4.82 8.65
60.0 0.00 -0.01 -0.10 -0.33 -0.72 -1.28 -1.93 -2.56 -3.04 -3.28 -3.27 -3.06 -2.69 -2.18 -1.38 -0.09 1.95 4.88 8.58
65.0 0.00 -0.01 -0.10 -0.33 -0.73 -1.28 -1.92 -2.54 -3.01 -3.25 -3.26 -3.07 -2.73 -2.21 -1.39 -0.05 2.01 4.91 8.47
70.0 0.00 -0.01 -0.10 -0.33 -0.73 -1.28 -1.91 -2.52 -2.98 -3.24 -3.27 -3.10 -2.77 -2.24 -1.39 -0.02 2.06 4.91 8.32
75.0 0.00 -0.01 -0.10 -0.33 -0.73 -1.27 -1.90 -2.58 -2.96 -3.23 -3.28 -3.13 -2.81 -2.28 -1.40 -0.01 2.08 4.88 8.17
80.0 0.00 -0.01 -0.11 -0.33 -0.73 -1.26 -1.88 -2.48 -2.95 -3.23 -3.29 -3.16 -2.85 -2.31 -1.42 -0.01 2.08 4.84 8.01
85.0 0.00 -0.01 -0.11 -0.33 -0.73 -1.26 -1.88 -2.47 -2.95 -3.23 -3.28 -3.13 -2.87 -2.33 -1.44 -0.02 2.06 4.79 7.88
90.0 0.00 -0.01 -0.10 -0.33 -0.72 -1.26 -1.88 -2.47 -2.95 -3.23 -3.31 -2.98 -2.88 -2.35 -1.46 -0.05 2.01 4.73 7.78
95.0 0.00 -0.01 -0.10 -0.33 -0.73 -1.26 -1.88 -2.48 -2.95 -3.23 -3.30 -3.18 -2.88 -2.35 -1.49 -0.10 1.96 4.67 7.73
100.0 0.00 -0.01 -0.11 -0.34 -0.73 -1.27 -1.89 -2.48 -2.95 -3.22 -3.28 -3.15 -2.85 -2.34 -1.51 -0.15 1.89 4.63 7.71
105.0 0.00 -0.01 -0.11 -0.34 -0.73 -1.27 -1.89 -2.49 -2.95 -3.21 -3.25 -3.10 -2.81 -2.33 -1.53 -0.21 1.82 4.59 7.74
110.0 0.00 -0.01 -0.11 -0.34 -0.73 -1.28 -1.90 -2.50 -2.95 -3.28 -3.30 -3.04 -2.75 -2.30 -1.55 -0.27 1.76 4.57 7.79
115.0 0.00 -0.01 -0.11 -0.34 -0.74 -1.29 -1.91 -2.50 -2.94 -3.15 -3.14 -2.97 -2.69 -2.27 -1.57 -0.32 1.71 4.56 7.86
120.0 0.00 -0.01 -0.11 -0.34 -0.74 -1.29 -1.92 -2.51 -2.93 -3.12 -3.09 -2.90 -2.62 -2.24 -1.57 -0.36 1.67 4.57 7.92
125.0 0.00 -0.01 -0.11 -0.34 -0.75 -1.30 -1.93 -2.51 -2.92 -3.08 -3.03 -2.83 -2.56 -2.20 -1.57 -0.39 1.65 4.57 7.97
130.0 0.00 -0.01 -0.11 -0.35 -0.75 -1.31 -1.93 -2.51 -2.90 -3.06 -2.99 -2.78 -2.52 -2.17 -1.57 -0.40 1.64 4.58 7.98
135.0 0.00 -0.01 -0.11 -0.35 -0.75 -1.31 -1.94 -2.51 -2.90 -3.04 -2.96 -2.75 -2.48 -2.15 -1.55 -0.39 1.63 4.56 7.95
140.0 0.00 -0.01 -0.12 -0.35 -0.76 -1.31 -1.94 -2.51 -2.89 -3.03 -2.95 -2.73 -2.46 -2.12 -1.53 -0.38 1.62 4.52 7.87
145.0 0.00 -0.02 -0.12 -0.36 -0.76 -1.32 -1.94 -2.51 -2.89 -3.03 -2.95 -2.73 -2.46 -2.11 -1.51 -0.36 1.61 4.46 7.75
150.0 0.00 -0.02 -0.12 -0.36 -0.77 -1.32 -1.94 -2.51 -2.90 -3.05 -2.97 -2.75 -2.47 -2.10 -1.48 -0.34 1.59 4.36 7.58

En los recuadros naranjas de las imágenes se resalta el valor correspondiente a la diferencia de altura al centro de fase, tanto para la frecuencia L1 (G01) y L2 (G02).

16.3. *Impacto del tranvía en cuanto al ordenamiento territorial*

Como es de conocimiento general, la Avenida Italia suele ser, en algunos sitios, un gran límite desde el punto de vista evaluatorio. Esto se puede apreciar con claridad sobre el barrio Malvín, donde la situación es bastante diferente de ambos lados de la avenida, siendo los inmuebles más cotizados los que se encuentran al sur de ésta.

Como se menciona en las conclusiones del presente trabajo, un tema a abordar para proyecto de grado podría ser un estudio evaluatorio masivo de este barrio, luego de implementar un tranvía sobre el cantero central de Avenida Italia. Como hipótesis, se podría cuestionar si dicha obra afectaría aún más el valor de los inmuebles de la zona, no solo actuando como un límite con más firmeza, sino afectando en todos sus alrededores.

En la materia Avaluaciones 3 fue abordado un estudio de este tipo, y, aunque a nosotros nos ha tocado en otro barrio, otros estudiantes han estudiado el caso de Malvín, observando que efectivamente la situación varía de cada lado de Avenida Italia.

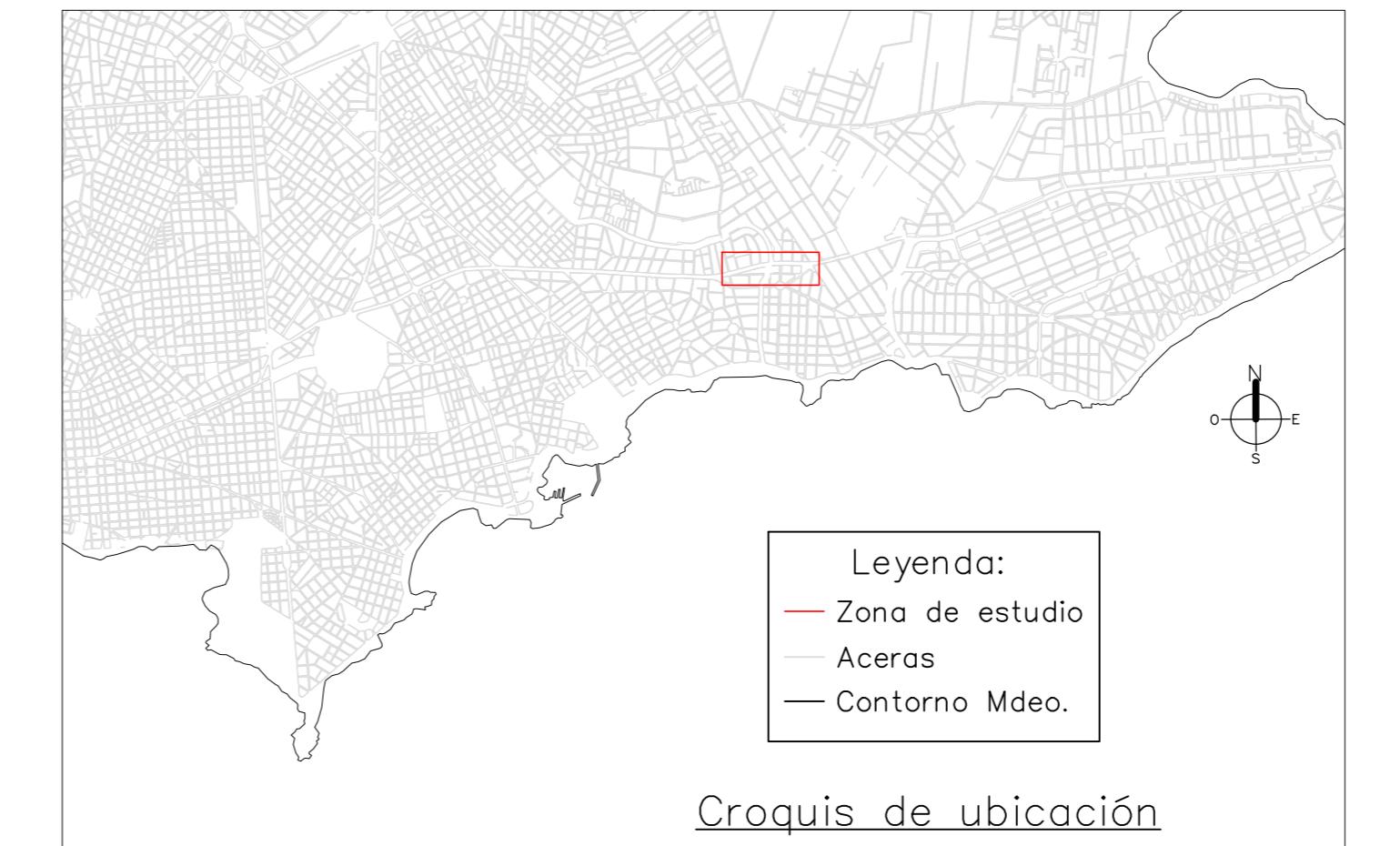
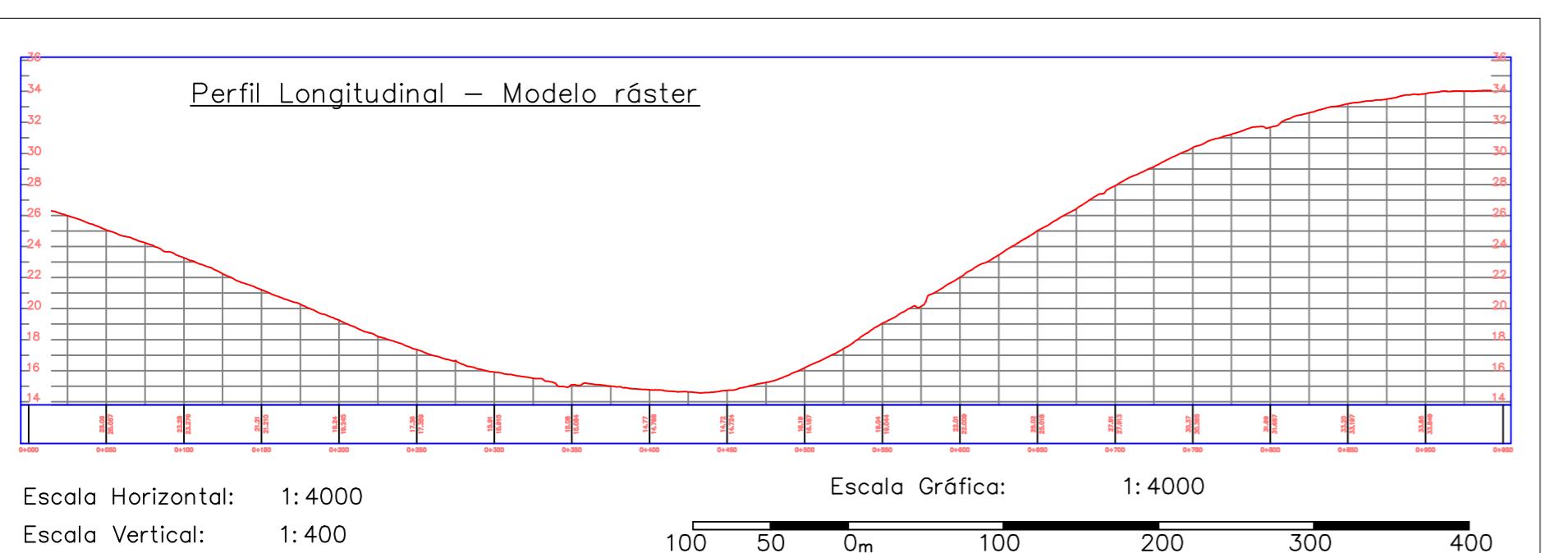
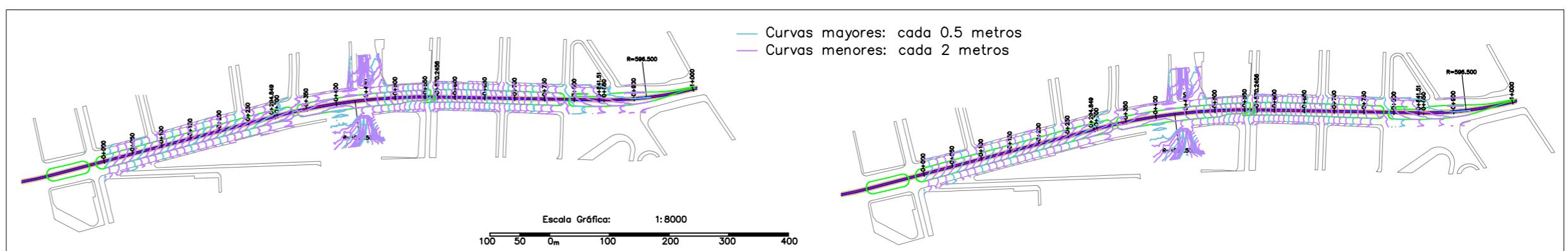
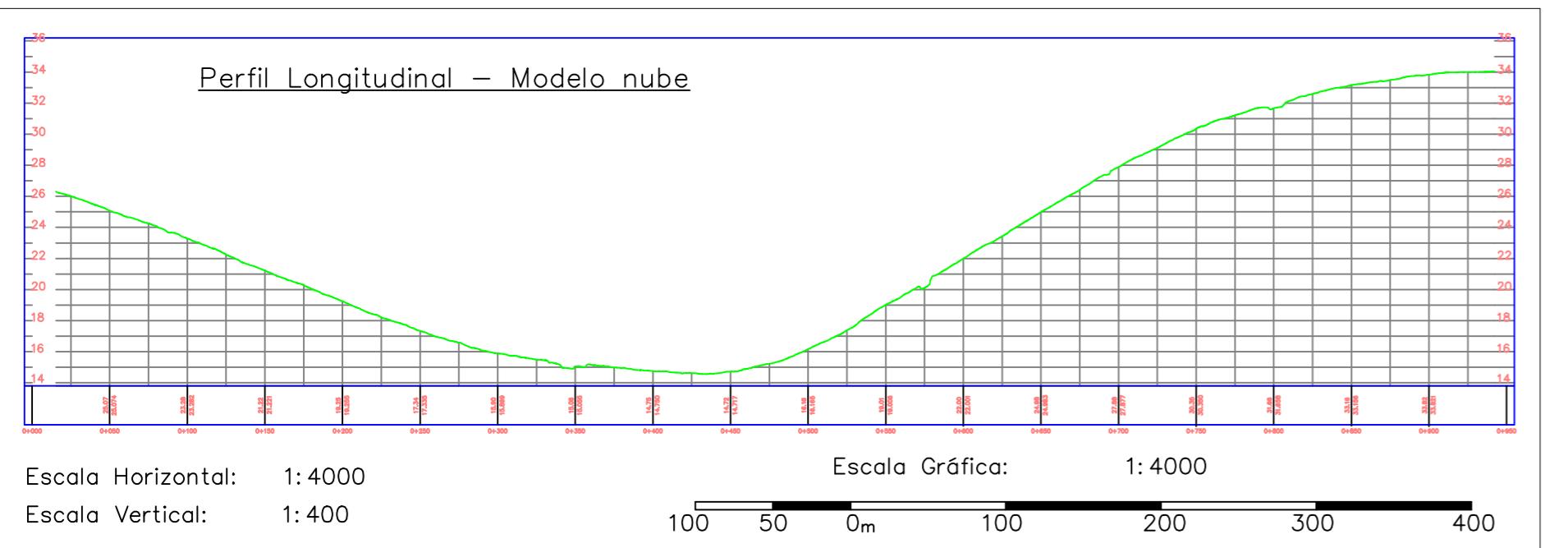
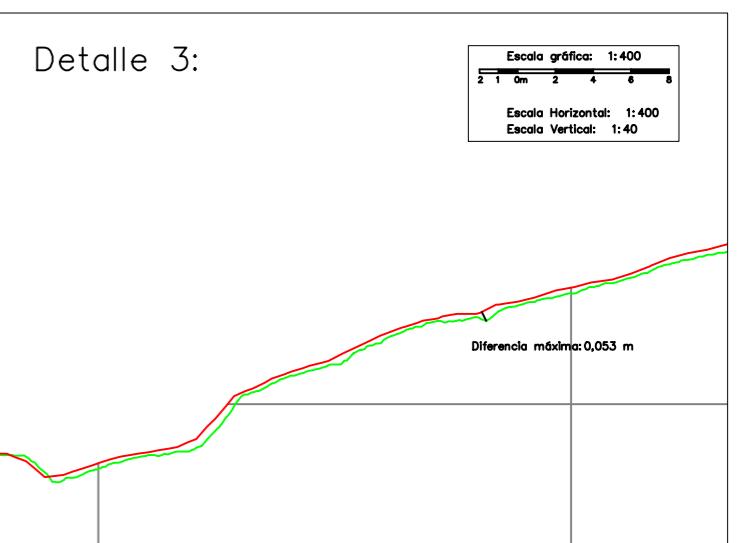
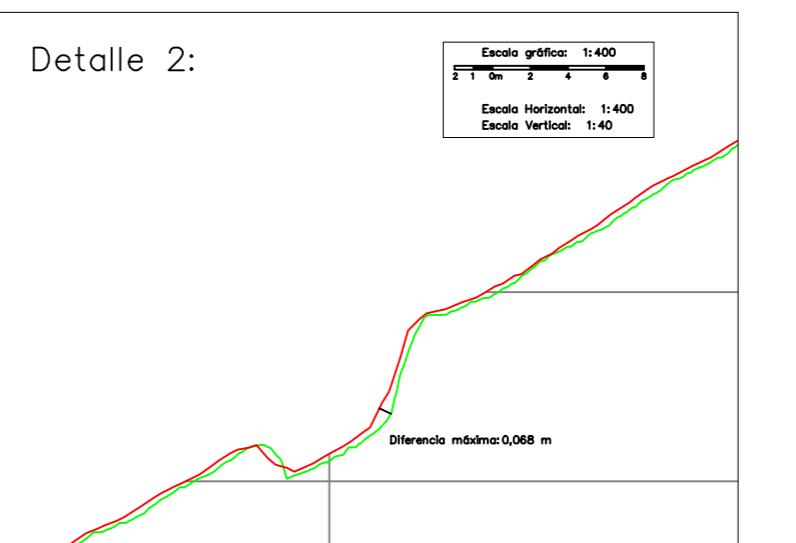
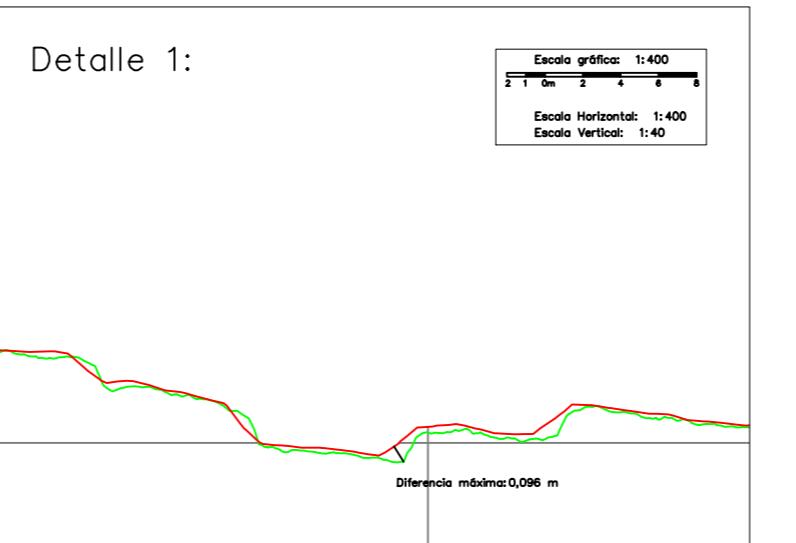
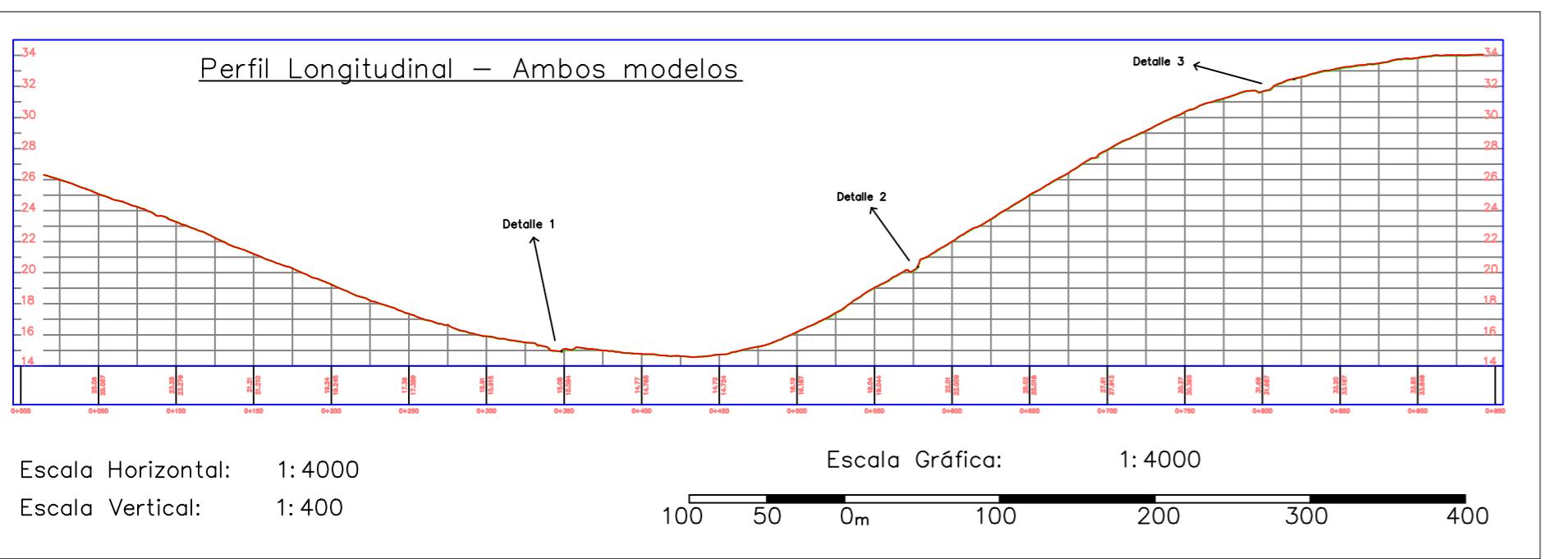
Además, si se proyectase un trazado del tranvía más extendido, se podría hacer un enfoque al proceso de urbanización, planteándose que, seguramente, implementar esta obra traerá como consecuencia un gran aumento poblacional en las zonas del este, tales como ciudad de la costa.

Por otro lado, se puede realizar un estudio de impacto en el transporte, analizando si el tranvía perjudicaría la circulación vehicular, principalmente en aquellas calles que cruzan la vía del tranvía, si el mismo fuera acoplado al terreno.

16.4. Láminas de trazado

Las láminas adjuntas al presente informe y su contenido de presentan en el siguiente orden:

- Lámina 1: Perfiles Longitudinales con detalles
- Lámina 2: Trazado acoplado al terreno
- Lámina 3: Trazado con viaducto



Perfiles Longitudinales

Anteproyecto obra lineal: Tranvía por Av. Italia

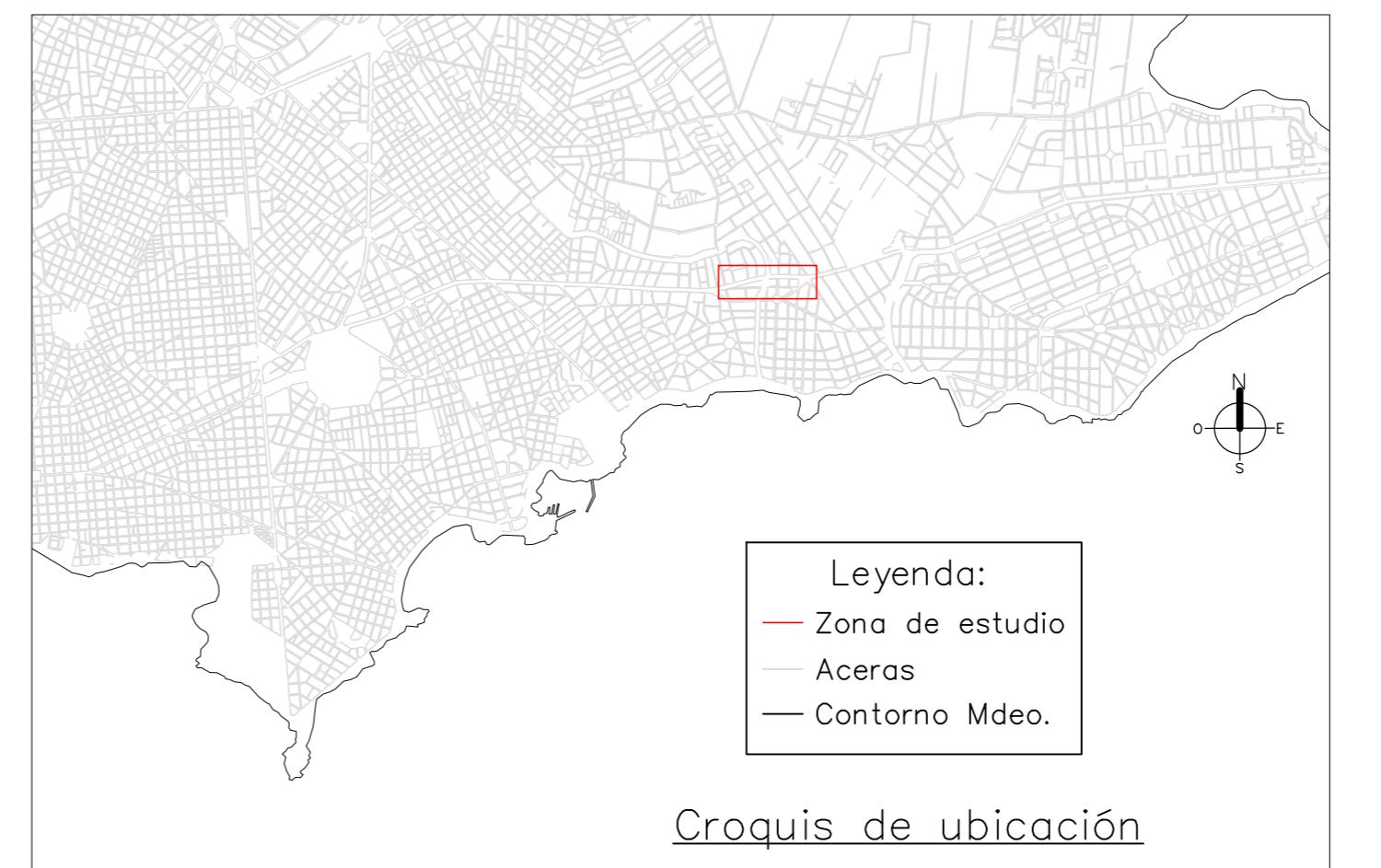
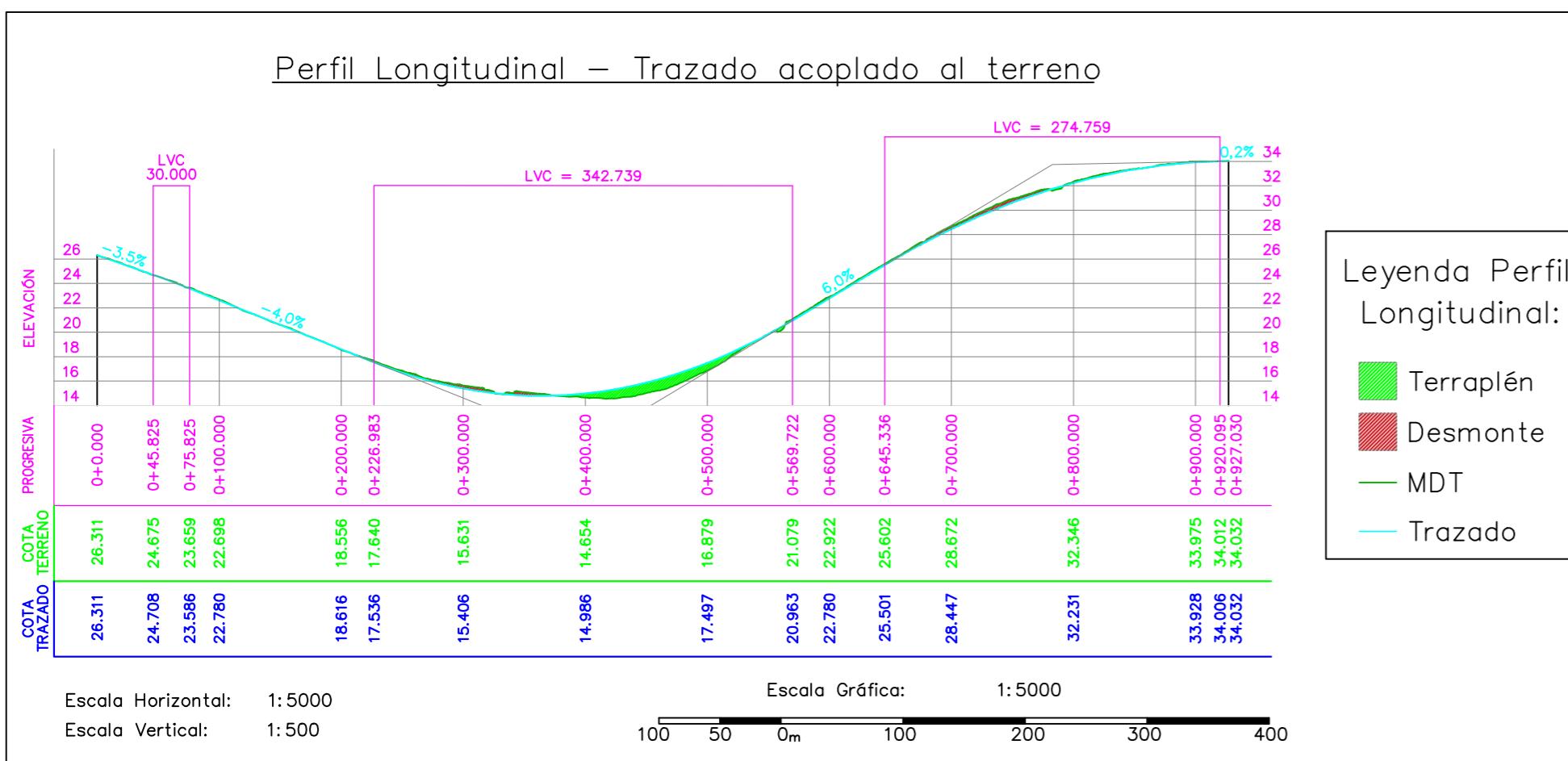
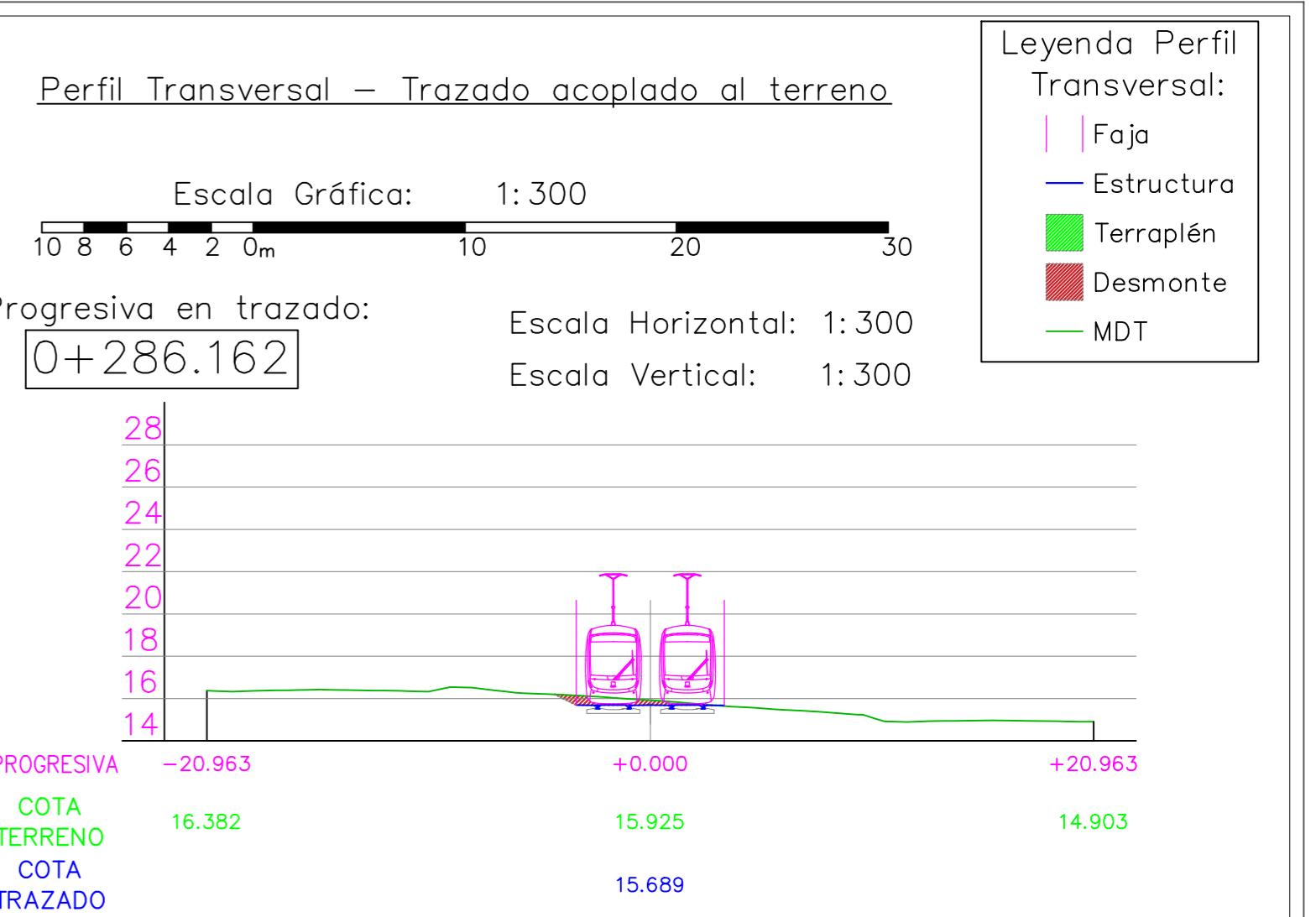
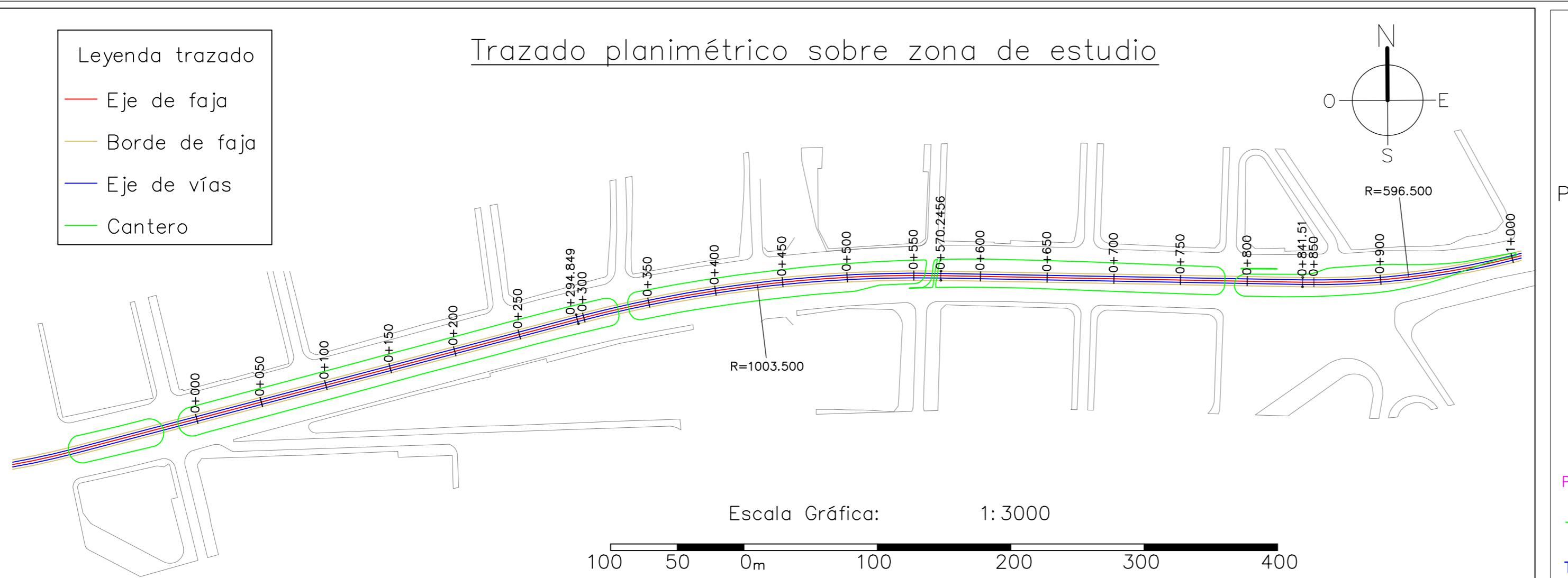
Proyecto para optar por el título de Ingeniero Agrimensor

Zona de estudio: Av. Italia, entre las calles Hipólito Yrigoyen y Dr. Alejandro Gallinal

| | | |
|--------------|------------------------------------|--|
| Estudiantes: | Lucas Padilla Juan José Zanatta | Tutor: Prof. Ing. Agrim. Luis Calderón |
|--------------|------------------------------------|--|

| | | |
|-----------------|-----------------|-------------------|
| Nro. de lámina: | Tamaño de hoja: | Fecha: |
| Lámina 1 | ISO A4x3 | Diciembre de 2025 |

| | |
|---------------------------------|--------------------------|
| Facultad de Ingeniería - Udelar | Instituto de Agrimensura |
|---------------------------------|--------------------------|



Trazado acoplado al terreno

Anteproyecto obra lineal: Tranvía por Av. Italia

Proyecto para optar por el título de Ingeniero Agrimensor

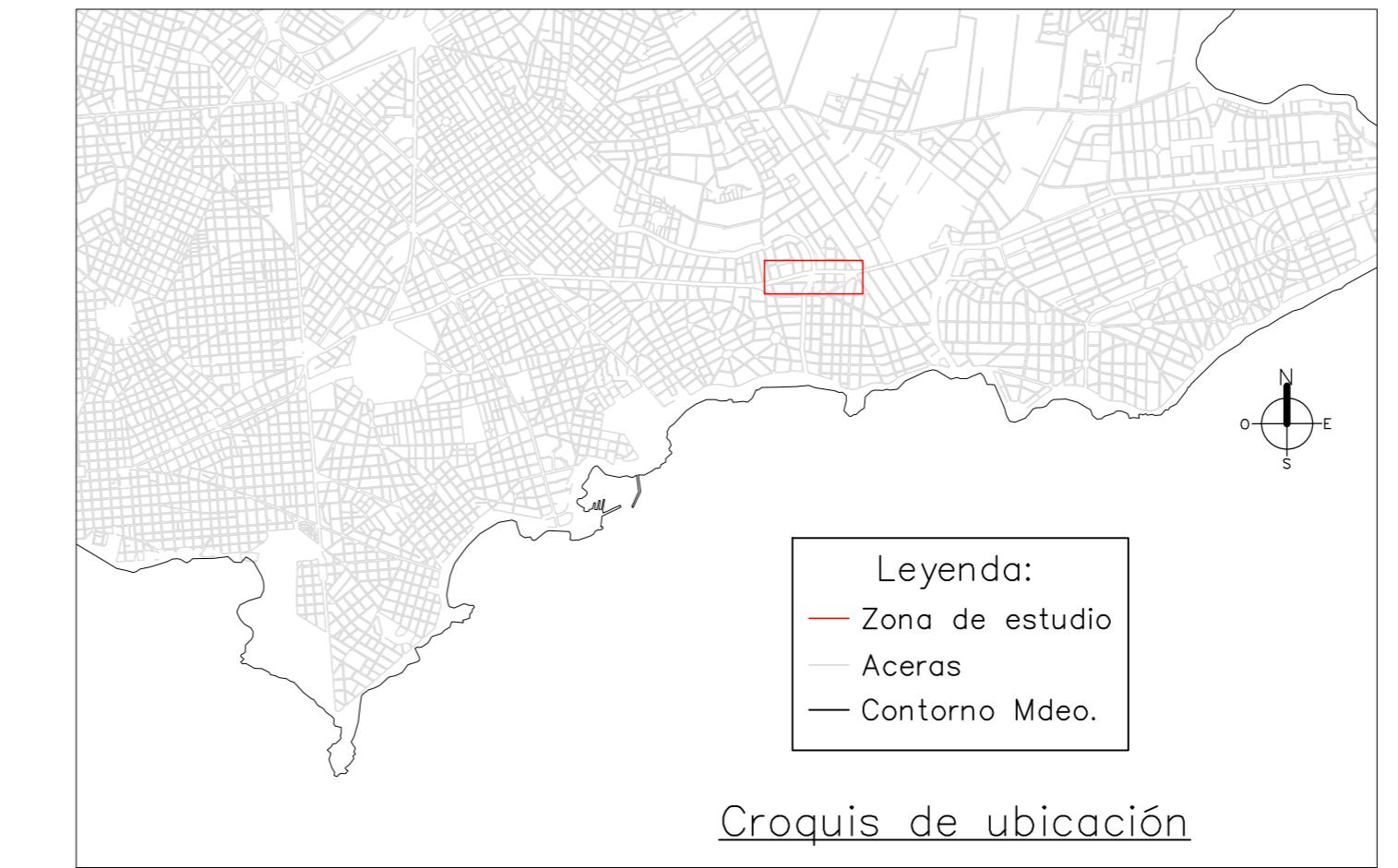
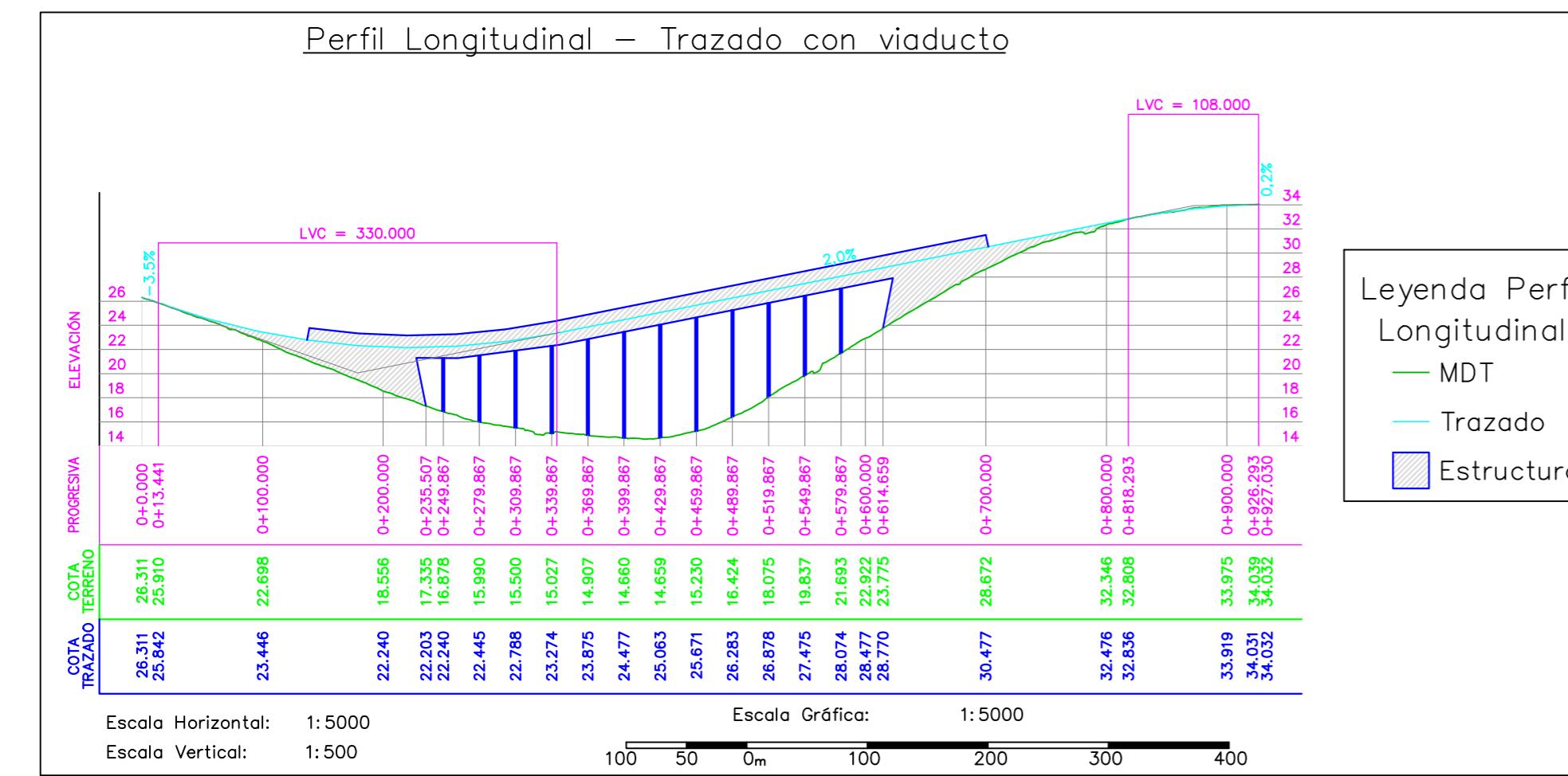
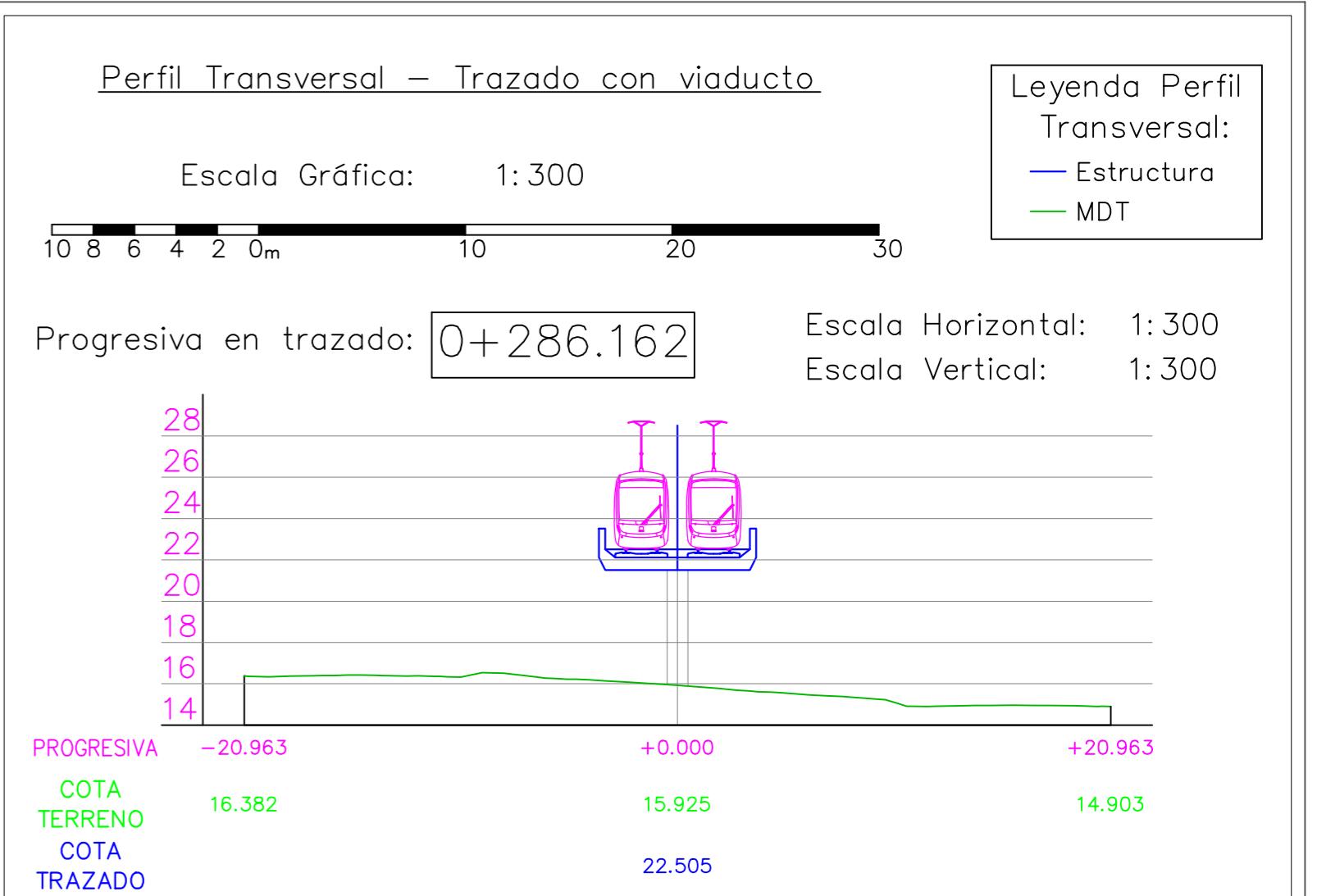
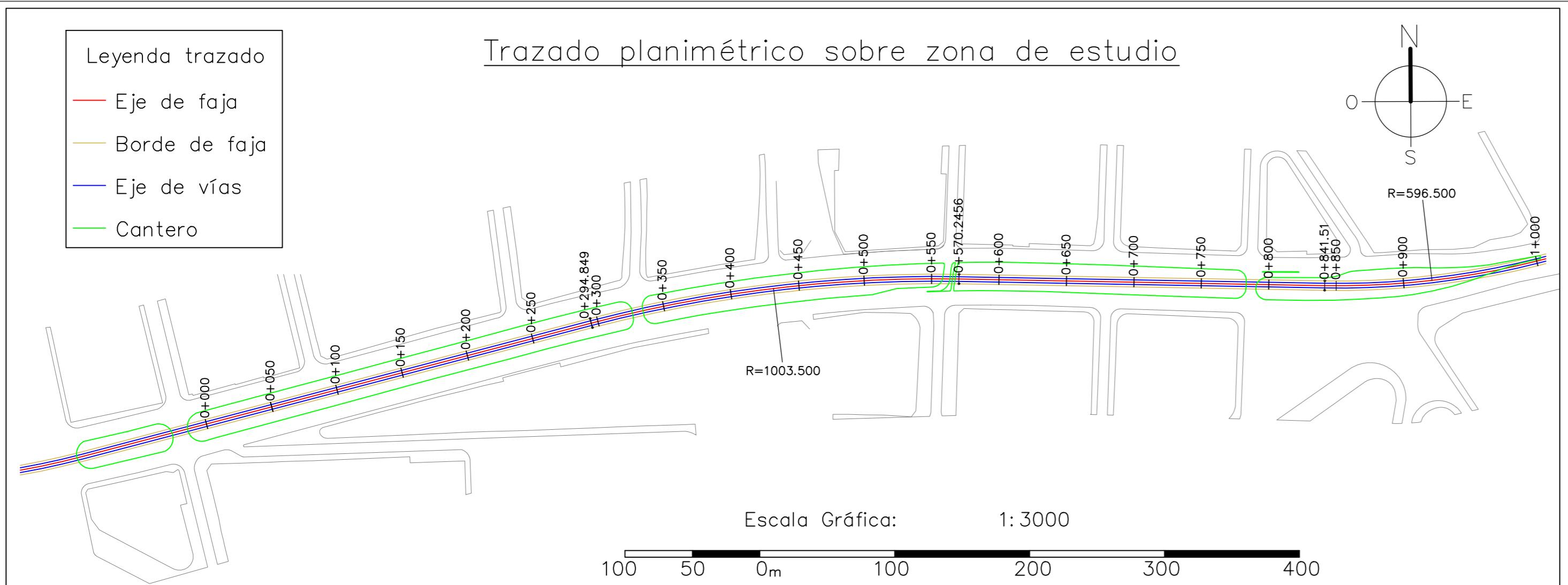
Zona de estudio: Av. Italia, entre las calles Hipólito Yrigoyen y Dr. Alejandro Gallinal

Estudiantes: Lucas Padilla Juan José Zanatta Tutor: Prof. Ing. Agrim. Luis Calderón

Nro. de lámina: Lámina 2 Tamaño de hoja: ISO A4x3 Fecha: Diciembre de 2025

Facultad de Ingeniería - Udelar Instituto de Agrimensura

FACULTAD DE INGENIERÍA UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA URUGUAY INSTITUTO DE AGRIEMENTURA



Trazado con viaducto

Anteproyecto obra lineal: Tranvía por Av. Italia

Proyecto para optar por el título de Ingeniero Agrimensor

Zona de estudio: Av. Italia, entre las calles Hipólito Yrigoyen y Dr. Alejandro Gallinal

Estudiantes: Lucas Padilla Juan José Zanatta Tutor: Prof. Ing. Agrim. Luis Calderón

Nro. de lámina: Lámina 3 Tamaño de hoja: ISO A4x3 Fecha: Diciembre de 2025

Facultad de Ingeniería - UdelaR Instituto de Agrimensura

FACULTAD DE INGENIERÍA UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA URUGUAY INSTITUTO DE AGRIEMENTURA