

**Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería en Construcción**

Análisis y propuestas para las intersecciones viales en la trayectoria del tren
INCOFER: Caso estudio cantón de Paraíso, Cartago

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Jéssica Gómez Martínez

Cartago, Junio 2019.

CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

Proyecto de Graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por los profesores Ing. Gustavo Rojas Moya, Arq. Carlos Ugalde Hernández, Ing. Alejandro Medina Angulo, Ing. Rommel Cuevas Kauffmann, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.



Ing. Gustavo Rojas Moya.
Director



Arq. Carlos Ugalde Hernández.
Profesor Guía



Ing. Alejandro Medina Angulo.
Profesor Lector



Ing. Rommel Cuevas Kauffmann.
Profesor Observador

Abstract

An analysis of the trajectories of the INCOFER passenger train and the road network of the North-South sector of the canton of Paraíso was carried out with the objective of identifying deficiencies, proposing and proposing solutions to such crossings before the start of the new Train Fast Passenger (TRP). Six priority crossings located in the central canton of Paraíso and arranged in the East-West direction were considered in the analysis. The characterization process included consultation of previous studies, meetings with experts, spatial and temporal analysis and quantification of vehicle flows inside and outside the canton.

To project future traffic conditions at junctions 1, 2, 3 and 4, a spatial comparison process was carried out between analogous sectors of the cantons of Cartago and Paraíso, which share similar characteristics. While for crossing 5 and 6, three methodologies were applied to project the future vehicular flow. The previous, allowed the approach of two concepts of road solutions: active / passive signaling and leveling, considering for both the results of transit microsimulation generated by PTV-VISSIM for the temporary spaces 2026 and 2050. It is concluded that both concepts contribute to improve satisfactorily the road dynamics and the interaction with the TRP for both temporary spaces.

Keywords: crossings, train, signaling, unevenness, microsimulation, concepts, traffic, TPDA, vehicular intensity, TRP, Paradise, streets, visibility, safety, solutions, land use, vehicle counts, infrastructure, characterization, maps, QGIS.

Resumen

Un análisis de cruces de la trayectoria del tren de pasajeros de INCOFER y la red vial del sector Norte-Sur del cantón de Paraíso fue realizado con el objetivo de identificar deficiencias, plantear y proponer soluciones a tales cruces ante la puesta en operación del nuevo Tren Rápido de Pasajeros (TRP). Seis cruces prioritarios localizados en el cantón central de Paraíso y dispuestos en el sentido Este-Oeste fueron considerados en el análisis. El proceso de caracterización incluyó consulta de estudios previos, reuniones con expertos, análisis espacial y temporal y cuantificación de flujos vehiculares dentro y fuera del cantón.

Para proyectar las condiciones de tránsito a futuro en los cruces 1, 2, 3 y 4, se realizó un proceso de comparación espacial entre sectores análogos de los cantones de Cartago y Paraíso, los cuales comparten características similares. Mientras que para el cruce 5 y 6, se aplicaron tres metodologías para proyectar el flujo vehicular futuro. Lo anterior, permitió el planteamiento de dos conceptos de soluciones viales: señalización activa/pasiva y desnivelación, considerando para ambos los resultados de microsimulación de tránsito generados por PTV-VISSIM para los espacios temporales 2026 y 2050. Se concluye que ambos conceptos contribuyen a mejorar satisfactoriamente, la dinámica vial y la interacción con el TRP para ambos espacios temporales.

Palabras claves: cruces, tren, señalización, desnivelación, microsimulación, conceptos, tránsito, TPDA, intensidad vehicular, TRP, Paraíso, calles, visibilidad, seguridad, soluciones, uso de suelo, conteos vehiculares, infraestructura, caracterización, mapas, QGIS.

Análisis y propuestas para las intersecciones viales en la trayectoria del tren INCOFER: Caso estudio cantón de Paraíso, Cartago

JÉSSICA GÓMEZ MARTÍNEZ

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Junio del 2019

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS	2
PREFACIO	2
RESUMEN EJECUTIVO	4
INTRODUCCIÓN	6
MARCO TEÓRICO	10
CARACTERÍSTICAS DEL TRÁNSITO.....	10
PROYECCIÓN DEL TRÁNSITO VEHICULAR..	10
CAPACIDAD DE CARRETERAS	11
LOS NIVELES DE SERVICIO (LOS)	11
SEÑALIZACIÓN EN CRUCES A NIVEL	13
DISPOSITIVOS DE CONTROL DE TRÁFICO..	14
SOFTWARE PTV VISSIM.....	22
CRITERIOS PARA JUSTIFICAR UNA DESNIVELACIÓN	23
ESTUDIOS DE CASO SOBRE DESNIVELACIÓN	26
CASOS DE ESTUDIO SOBRE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS PARA ESTRUCTURAS ELEVADAS	29
VENTAJAS/DESVENTAJAS DE SEÑALIZACIÓN ACTIVA/PASIVA VS DESNIVELACIÓN.....	36
METODOLOGÍA	39
RESULTADOS	53
CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	53
PROPUESTAS DE SOLUCIONES	65
OPCIÓN VIABLE PARA LA DESNIVELACIÓN	77
ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	80
CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	80
PROPUESTAS DE SOLUCIONES	85
OPCIÓN VIABLE PARA LA DESNIVELACIÓN	94
CONCLUSIONES	97
RECOMENDACIONES	100
ANEXOS	102
REFERENCIAS.....	103

Acrónimos y Abreviaturas

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials	WSDOT	Washington State Department of Transportation
DV	Distancia de visibilidad		
EIV	Estudio de Ingeniería de Valor del Proyecto del Tren Rápido de Pasajeros (TRP) en la Gran Área Metropolitana (GAM)		
EPTRP	Estudio de Prefactibilidad del Sistema de Tren Rápido de Pasajeros en la Gran Área Metropolitana		
GAM	Gran Área Metropolitana		
HCM	Highway Capacity Manual		
INCOFER	Instituto Costarricense Ferroviario		
INEC	Instituto Nacional de		
INVU	Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo		
MOPT	Ministerio de Obras Públicas y Transporte		
LOS	Service of Levels		
MDGC	Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de Carreteras		
MCDU	Manual Centroamericano de Dispositivos Uniformes para el Control del Tránsito		
MNDT	MN Department of Transportation		
MTA	Metropolitan Transportation Authority		
PRUGAM	Planificación Regional y Urbana de la Gran Área Metropolitana		
SIECA	Secretaría de Integración Económica Centroamericana		
TPDA	Tránsito Promedio Diario Anual		
TRP	Tren Rápido de Pasajero		
USDT	U.S Department of Transportation		
WMATA	Washington Metropolitan Area Transit Authority		

Prefacio

En el año 1995, el presidente José María Figueres Olsen ordenó el cierre de INCOFER por el déficit que acumulaba en esa época. No obstante, desde su reapertura en el año 2005, se ha observado la aprobación del mismo por parte de los usuarios y se demuestra en el “Informe anual de estadísticas operativas de INCOFER”, donde se indica que durante el año 2018 se transportaron por ruta 3 888 193 pasajeros en todas las rutas disponibles (INCOFER, 2019).

No obstante en la GAM, este servicio presenta patrones radiales poco eficientes al competir con el flujo vehicular particular y no contar con integración intermodal. Además, el crecimiento expansivo de baja densidad de las ciudades impide rentabilizar el transporte colectivo al dispersar la demanda y ampliar los recorridos, siendo unas de las razones por la cual los usuarios prefieren tener su propio vehículo (Plan GAM 13-30 de Movilidad, 2013).

Aunque la GAM cuenta con una importante red vial nacional su capacidad de movilidad vehicular, tanto en volumen de vehículos como en tiempos de viaje, se ha visto cada vez más limitada por el flujo creciente de automotores y la lenta actualización de obras viales. Esto lleva a una red de comunicación débil con una pobre conexión transversal entre radiales, poco desarrollo de tipo reticular, grandes flujos periféricos y pérdida de horas de trabajo y familia por tiempos prolongados de viaje (Plan GAM 13-30 de Movilidad, 2013).

Esta cantidad de vehículos aumenta la contaminación del aire por la emisión de gases y exceso de ruido, debido a que las emisiones vehiculares aportan un 75% de la contaminación del aire, un 23% es contribución de la actividad industrial y energética, y el restante 2% es generado por otras fuentes. Mientras que los valores de emisiones sonoras máximos permitidos se han ido incrementando a lo largo de los últimos 55 años, afectando la salud de las personas y el ecosistema (Plan GAM 13-30 Ambiental, 2013).

Por lo tanto, una de las soluciones que resulta integral para los problemas antes mencionados es la implementación del tren rápido de pasajeros, ya que reduce el consumo de combustibles, el tiempo que tarda en transportarse los usuarios, la carga vehicular y la emisión de gases. Este último aspecto representa un factor importante con la actual Política Nacional de Adaptación al Cambio Climático, que tiene como objetivo general que la sociedad costarricense transite hacia un modelo de desarrollo resiliente.

En Costa Rica es necesaria la creación de comunidades más compactas y caminables apoyadas en el transporte público de manera que la población mantenga su calidad de vida sin depender de un automóvil para su movilidad personal. Bajo este principio la implementación del TRP en el país representa un modo de transporte amigable con el ambiente, que cambia el paradigma de movilización y mejora las condiciones para que los usuarios se trasladen de manera más eficiente.

La llegada del TRP a Paraíso, es una muestra de esa necesidad y surge de una alianza entre el Instituto Costarricense de Ferrocarriles y la Municipalidad de Paraíso. Esto beneficiará a más de 170 mil personas de esta zona de Cartago. Sin embargo, lo anterior conlleva un impacto en la dinámica vial que puede ocasionar el colapso de la red y demoras de viaje prolongadas.

Igualmente, los cruces que se producen entre la trayectoria del tren y la red vial, representan un riesgo latente para que se produzcan colisiones con el tren. Esto genera, pérdidas materiales para los usuarios y el gobierno, así como la muerte de personas. A consecuencia de las imprudencias, falta de visibilidad en los cruces e incluso la ausencia de señalización horizontal/vertical. Tal problemática se puede observar desde los últimos 13 años donde los cruces son causantes de accidentes, por ejemplo, según el Instituto Costarricense de

Ferrocarriles en el año 2017 se registraron 156 colisiones del tren con vehículos que no respetaron la vía férrea, mientras que en 2018 se presentaron 91 colisiones, como resultado se produjo la muerte de al menos una persona (INCOFER, 2019; INCOFER 2018).

Por consiguiente, es preciso realizar un análisis que permita diagnosticar los cruces que presentarán mayor problemática cuando el TRP se encuentre en funcionamiento, a modo de brindar propuestas de soluciones que evite las complicaciones viales que se presentan actualmente con el tren, y a su vez permitirá que en el futuro exista un equilibrio de los aspectos funcionales, económicos, ambientales, y sociales, logrando una interconexión real entre ambas vías.

Agradecimientos

El agradecimiento de este proyecto va dirigido primero a Dios y la Virgen por permitirme llevar a cabo esta investigación, a mi familia, en especial a mis padres por su apoyo y amor incondicional a lo largo de este proceso. También al señor Godofredo Rojas del Departamento de Topografía y Geodesia de la Municipalidad de Paraíso, por la información digital y espacial, cedida. Adicionalmente, al Ing. Alejandro Medina, por la ayuda brindada en temas de Ingeniería de Tránsito; al Ing. Sergio Arriola de la Escuela de Ing. Electronica del TEC y a mi profesor guía, el Arq. Carlos Ugalde Hernández, por su dedicación y ayuda constante durante el desarrollo de este proyecto.

Resumen ejecutivo

Un análisis de cruces entre la actual trayectoria del tren de pasajeros de INCOFER y la red vial del sector Norte-Sur del cantón de Paraíso fue realizado con el objetivo de identificar deficiencias, plantear y proponer soluciones viales factibles a tales cruces, ante la puesta en operación del nuevo Tren Rápido de Pasajeros (TRP). Con la elaboración de este proyecto se le brinda colaboración al INCOFER, como institución comprometida a brindar un servicio de transporte ferroviario eficiente, a COSEVI siendo la entidad responsable de promover, financiar y dirigir proyectos en materia de seguridad vial, con miras a mejorar la calidad de vida de los habitantes; y finalmente, al Municipio de Paraíso que es el principal beneficiario, puesto que el área que se estudió se encuentran bajo su gobierno.

Por lo tanto, seis cruces localizados en el cantón central de Paraíso y dispuestos en el sentido Este-Oeste, fueron definidos como prioritarios por el gobierno local y por ende, considerados en el análisis.

El proceso de caracterización del área de estudio incluyó (i) consulta de estudios previos, (ii) reuniones con expertos del sector privado y enlaces de gobierno, (iii) análisis espacial y temporal incluyendo vuelos fotogramétricos y (iv) medición/cuantificación de flujos vehiculares dentro y fuera del cantón.

Los resultados de la caracterización indican que los cruces 1 y 2 abarcan Zonas Residenciales de Media y Alta Densidad aun en desarrollo, los cruces 3 y 4 se limitan a entradas de fincas privadas, mientras que los cruces 5 y 6 se ubican en Zona Residencial de Alta Densidad.

Con base en los resultados de flujos vehiculares obtenidos en los cruces 5 y 6, el aun temprano estado de desarrollo de los proyectos urbanísticos ligados a los cruces 1 y 2 y la pronta implementación del nuevo Plan Regulador del Cantón de Paraíso, se llevó a cabo un proceso de comparación espacial entre sectores análogos de los cantones de Cartago y Paraíso, los cuales

comparten características similares de ubicación, Uso de Suelo, extensión y administración.

Con lo anterior, se logró la transferencia de atributos espaciales que permitieron proyectar las condiciones de tránsito a futuro en los cruces 1, 2, 3 y 4. Respecto a los cruces 5 y 6, se utilizaron tres metodologías basadas en (i) comparación espacial entre sitios análogos de los Cantones de Cartago y Paraíso, (ii) crecimiento poblacional, y (iii) proyecciones vehiculares basadas en mediciones de flujo y estaciones de conteo.

Los resultados de dichas metodologías dan índices comparables, lo que acredita su utilización en el planteamiento de dos conceptos de soluciones viales (i) señalización activa/pasiva y (ii) desnivelación, considerando en ambos casos los resultados de micro-simulación de tránsito dados por el modelo PTV-VISSIM para los espacios temporales 2026 y 2050.

El concepto de señalización activa/pasiva sugiere un Nivel de Servicio máximo D, con demoras máximas de 47.63 s y una longitud de cola igual a 61.55 m en el cruce 2, para el 2026 y un Nivel de Servicio máximo D con una longitud de cola máxima igual a 96.52 m en el cruce 6 y demoras máximas de 45.77 s para el cruce 5 en el año 2050, por lo que basados únicamente en criterios cuantitativos, no se requeriría de una intervención vial de desnivelación.

El concepto de desnivelación por su parte, únicamente, contempla los cruces 5 y 6, y considera tanto la desnivelación de las calles 12 y 10 en el sentido Norte-Sur, como la desnivelación de la vía férrea en el sentido Este-Oeste. Los resultados indican que con base en la topografía natural del terreno, la opción más factible es la desnivelación sobre-terreno de la vía férrea en el sentido Este-Oeste, mediante la utilización de un sistema constructivo conformado por vigas tipo cajón prefabricadas sobre pilas centrales coladas en sitio, con una metodología constructiva de Tramo-por-Tramo. La desnivelación de las calles en el sentido Norte-Sur, ya sea sobre o bajo-terreno resulta inviable dado el impacto que ello

tendría sobre la dinámica vial del cantón central de Paraíso, la cantidad de propiedades que enfrentarían expropiación, la compleja topografía, los riesgos de inundación, los costos capitales y la complejidad de operación y mantenimiento.

Se concluye que tanto el concepto de señalización activa/pasiva como el concepto de desnivelación de la línea férrea sobre-terreno, contribuyen satisfactoriamente a mejorar la dinámica vial y la interacción con el TRP para ambos espacios temporales. Debe aclararse que en la decisión final ligada a una solución de desnivelación imperan factores que trascienden criterios de volúmenes de tránsito y que obedecen ante todo a consideraciones financieras y sociales. Finalmente, se recomienda el desarrollo de una micro-simulación más extensa y detallada de todo el sistema que permita a su vez cuantificar la evolución temporal de la interacción entre el TRP y el entorno general de tránsito en la zona, así como un estudio de ingeniería de tránsito que considere aspectos tales como la seguridad, operaciones del TRP, impactos secundarios con mayor detalle, entre otros.

Introducción

El transporte en masa de pasajeros a través de sistemas rápidos de transporte, es una necesidad que va en aumento, por lo que requiere de una atención y planificación tal, que permita satisfacer una demanda creciente y cada vez más compleja.

Como respuesta a la saturación de las redes viales, consecuencia de un número cada vez mayor de vehículos sobre un área de calzada limitada, es que surgen los sistemas TRP, los cuales permiten la rápida movilización de un alto volumen de personas a través de una red que se fundamente en un derecho de vía, ya sea prioritario o exclusivo.

En este sentido, resulta imperativo caracterizar, analizar, diseñar, implementar y controlar la interacción entre el sistema ferroviario y la red vehicular existente o futura. Puesto que, es innegable el hecho de que los sistemas ferroviarios impactan la dinámica vehicular. Los retrasos, Niveles de Servicio (LOS), colisiones y hasta fatalidades son sólo algunos ejemplos de los conflictos entre trenes y vehículos.

Por ende, resulta indispensable analizar y diseñar la infraestructura de control y señalización adecuado por cada cruce de forma tal que se maximice la operación del tren y se minimicen los conflictos con vehículos y peatones. Para ello, existe un amplio margen de posibilidades de intervención hoy, desde señalizaciones hasta desnivelaciones de la infraestructura.

La disponibilidad de criterios, normas, procedimientos, y sistemas modernos de información geográfica, sensores remotos, hardware y software de simulación, permiten encontrar deficiencias y visualizar opciones de mejora con una mayor factibilidad. En consecuencia, este proyecto pretende realizar un análisis de los seis cruces ferroviarios existentes entre la trama vial Norte-Sur y la trayectoria del tren de pasajeros INCOFER a lo largo del sentido

Este-Oeste, en el cantón de Paraíso, a modo de brindar soluciones viables ante la puesta en operación del nuevo TRP.

Actualmente, en el cantón de Paraíso no se ha rehabilitado el tren de pasajeros de INCOFER, se espera que este servicio llegue nuevamente a este cantón los primeros meses del año 2020. No obstante, debido al crecimiento urbano y la necesidad de un servicio de transporte público eficiente, rápido y seguro, surge el proyecto del TRP, el cual se espera que inicie su operación para el año 2026, aproximadamente.

Lo anterior, conlleva a un impacto en la dinámica vial de Paraíso, que trae consigo consecuencias negativas para todos los usuarios que interactúan en este conjunto. Además, como reflejo de la situación que se ha presentado en los últimos 13 años desde la rehabilitación del tren en la GAM, tal como: múltiples colisiones con el tren, atropellos a peatones, entre otros; que más allá de ocasionar pérdidas materiales se produce la muerte de personas. El presente proyecto, busca minimizar la ocurrencia de esta problemática en el cantón de Paraíso, con miras al desarrollo urbano que se espera y la llegada del TRP a futuro. Lo anterior, mediante la propuesta de soluciones factibles que cumplan con las condiciones y necesidades identificadas en el área bajo estudio.

Por lo tanto, se plantea como objetivo general proponer soluciones factibles a los cruces que se generan entre la trayectoria del tren con el trazado vial existente, en el cantón de Paraíso. Asimismo, los objetivos específicos establecidos para este proyecto, se muestran seguidamente.

1. Identificar los cruces existentes entre la trama vial Norte-Sur con el eje ferroviario, en Paraíso, y someterlos a análisis.
2. Desarrollar diferentes soluciones a los cruces entre el sector Norte-Sur con el

eje ferroviario, en Paraíso, así como su respectiva evaluación.

3. Proponer las soluciones más factibles para los cruces ferroviarios de Paraíso, con base en el producto del OE2.

Estudios previos desarrollados

Diversos estudios se han desarrollado en los últimos años sobre los cruces que se producen entre la trama vial y ferroviaria en el país, los cuales sirven como base para llevar a cabo la presente investigación y se describen a continuación en orden cronológico.

En Setiembre del 2012 se realizó una tesis acerca de un diagnóstico del estado técnico y análisis presupuestario para la rehabilitación de la sección Cartago-El Yas, tomando como base la ruta existente en Curridabat-Cartago. Como consecuencia, se determinó que existía poca infraestructura ferroviaria en el tramo de Paraíso, aunado a la presencia de maleza sobre el derecho de vía e invasiones principalmente por casas de habitación, donde las líneas de construcción o tapias invaden los límites establecidos (Pérez, et al., 2012).

En Setiembre del 2018, como parte de la Maestría de Ingeniería Vial se desarrolló un estudio técnico sobre la tesis antes mencionada (*“Diagnóstico Técnico y Análisis de Costos para la Rehabilitación de la Red Ferroviaria en la Sección Cartago-Páez-Yas”*). Como parte de las soluciones contempladas se proponen pasos a desnivel para aquellos cruces de alto tránsito. Tal es el caso del cruce en Oreamuno, sobre la intersección de Barrio Petra, en el eje Cartago-Paraíso; para el cual se plantea la elevación de la red vial sobre el eje ferroviario, acorde a la complejidad del cruce en cuestión (Figura 1). Mientras en el cruce hacia Oreamuno, sobre el mismo eje Cartago-Paraíso, se propone elevar la línea férrea sobre la red vial (Figura 2).

En relación con los cruces que se deben tratar a nivel debido a temas de expropiación, se establecen dos puntos críticos utilizando sistemas de señalización y semaforización (Navarro, et al., 2018).



Figura 1. Propuesta de puente vehicular sobre la línea férrea. Fuente. Navarro, et al., 2018.



Figura 2. Propuesta de ferrocarril pasando sobre la vía. Fuente. Navarro, et al., 2018.

En agosto del 2018, se preparó un informe de pasos a nivel requeridos en la rehabilitación de la vía férrea entre la Basílica de Cartago y Paraíso, esto con el objetivo de establecer los posibles pasos a nivel que deberán ser construidos mediante vía en placa de concreto. Con este estudio, se determinó que todos los cruces a lo largo del eje ferroviario desde la Basílica de Cartago hasta Paraíso, necesitan ser reconstruidos por completo para la rehabilitación del tren a futuro. Además, se propone eliminar el cruce inmediato a la antigua estación del tren, con el fin de trasladar el andén hacia el Oeste, debido a que se tiene mayor disponibilidad de espacio (Gerencia de Proyectos INCOFER, 2018).

En octubre del 2018, se realizó un Estudio de Ingeniería de Valor del Proyecto del Tren Rápido de Pasajeros (TRP) en la Gran Área Metropolitana (GAM) (EIV), el cual está compuesto por dos partes: la primera es sobre Ingeniería de Valor del TRP y la segunda un Informe Financiero del mismo. Con base en el estudio realizado para los cruces entre la red vial

y ferroviaria, se identificaron como susceptibles a ser desnivelados un total de 50 cruces de los más de 250 existentes. Esto como resultado de un análisis de factores tal como, los puntos de cruces de Alta tensión o proyectos que tengan una repercusión sobre el corredor ferroviario. Por otra parte, se concluye que se deberá evaluar también si a la hora de realizar la intersección a desnivel es mejor realizarlo por encima de la cota del terreno o por debajo. Esta decisión atenderá a elementos como la geotecnia, la disponibilidad de espacio o la integración urbana. Asimismo, es necesario un nivel de detalle en cuanto a modelización de transporte que a la fecha de la realización del presente documento, no se disponía.

Respecto al sistema constructivo del viaducto, se menciona de forma generalizada el sistema que se requiere, haciendo una comparación de otros países. De la misma forma con el costo estimado para llevar a cabo la elevación del tren. Esto a consecuencia, de que no se cuenta con un análisis estructural de la propuesta (IDOM, 2018).

Amenazas naturales

La zona en estudio presenta las amenazas geológicas habituales del país: riesgos por sismo, hidrológicos y volcánicos. Los principales riesgos se analizan tomando como base los Mapas de Amenazas Naturales, los cuales son un producto preliminar, elaborado por la Comisión Nacional de Emergencias (CNE) en su mayoría con fuentes a escala 1:50.000 o mayores para todo el país (CNE, 2016). Dichos mapas tienen limitaciones implícitas, debido a la escala y ausencia de información base, por lo tanto su utilidad es únicamente como una orientación general de referencia sobre el tema.

Amenazas hidrometeorológicas del cantón de Paraíso

Con base en los estudios previos de la Comisión Nacional de Emergencias (CNE, 2016), los ríos que se pueden considerar una amenaza hidrometeorológica para el cantón central de Paraíso son principalmente, la quebrada Pollo y

el río Blanquillo (Figura 3). A causa del crecimiento urbano sin planificación y en forma desordenada, así como la ocupación de las planicies de inundación, se ha generado una disminución en el período de recurrencia de las inundaciones (menores a un año); siendo lo anterior un problema serio que se presenta en el cantón de estudio. Aunado a esto, la contaminación de los cauces con desechos sólidos, ocasiona una reducción de la capacidad en la sección hidráulica, lo que induce al desbordamiento de ríos y quebradas con mayor facilidad.

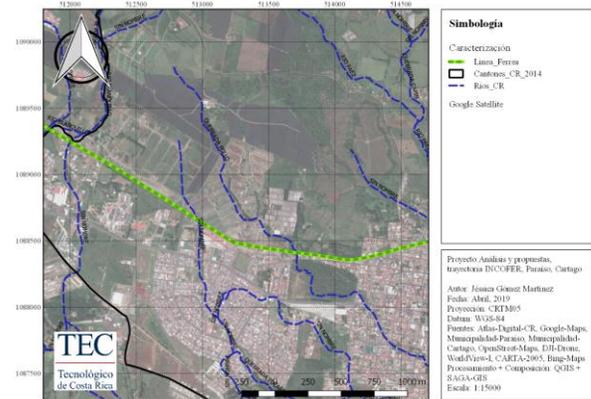


Figura 3. Ríos y quebradas que afectan los cruces en estudio en el cantón Central de Paraíso (Anexo 2). Fuente. Elaboración propia, QGIS.

Amenazas por inestabilidad del suelo

La zona de Paraíso es propensa a los deslizamientos por las características topográficas y geológicas, los cuales pueden ser activados por fuertes lluvias, malas prácticas agrícolas o la actividad sísmica y volcánica.

Los terrenos volcánicos, poco cohesivos y con pendiente considerable denominados Inceptisoles (Figura 4), predominan hacia el norte de Paraíso, no obstante, los deslizamientos se presentan con mayor frecuencia en las zonas cercanas al río donde la pendiente del terreno es mayor. Según las referencias (CNE, 2016) se han producido deslizamientos en la cuenca del río Paraíso y Quebrada Pollo (Figura 4). Hacia la zona sur del cantón, se encuentran rocas muy fracturadas, y terrenos con pendiente muy fuerte denominados Ultisoles, el cual

predomina en Paraíso (Figura 4). Además, presenta un alto régimen de lluvias, por lo que son más comunes los deslizamientos. Asimismo, son propensos a deslizamientos los sitios donde se han realizado cortes de carretera y tajos.

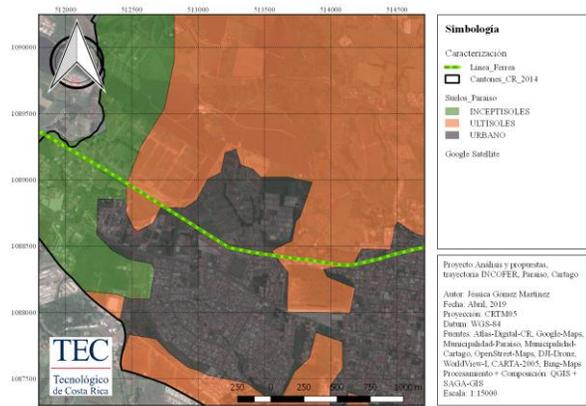


Figura 4. Tipos de suelos presentes en la zona de estudio, Paraíso (Anexo 2).
Fuente. Elaboración propia, QGIS.

El presente proyecto amplía el análisis de los cruces en cuanto a microsimulaciones y análisis cuantitativos de flujo vehicular, permitiendo una mejor caracterización del área. En consecuencia, se brindan soluciones factibles con un mayor criterio de selección del que se ha realizado hasta el momento, según tales estudios previos. Sin embargo, respecto a las amenazas naturales en el cantón de Paraíso, el análisis se limita a los estudios realizados por la CNE, dado que esos aspectos van más allá del alcance del proyecto.

Marco Teórico

Características del tránsito

La información sobre el tránsito de una carretera nacional, por lo general se encuentra disponible en la página web del Ministerio de Obras Públicas y Transporte (MOPT, 2019), mediante las 1100 estaciones de conteo vehicular que instaló la Secretaría de Planificación Sectorial de esta institución. Las estaciones brindan los volúmenes de tránsito por día como promedio del año y la distribución de acuerdo al tipo de vehículo. Algunas estaciones se encuentran contabilizando desde el año 1965, hasta la actualidad (Dirección de Relaciones Públicas, 2018).

Sin embargo, para aquellos caminos que no pertenecen a la red vial nacional, se puede realizar conteos manuales o electrónicos que permitan tener conocimiento del flujo aproximado sobre una calle o cruce. Además, el MOPT brinda información sobre el porcentaje de crecimiento vehicular, con base en cada estación, los cuales permiten realizar proyecciones para estimar el volumen vehicular a futuro.

El Tránsito Promedio Diario Anual (TPDA) es la unidad general de medida del tránsito sobre una carretera y representa el volumen del tránsito promedio diario anual, es decir, se define como el volumen total durante un período determinado de tiempo (por lo general son días) mayor que un día y menor o igual a un año, el cual se divide entre la cantidad de días comprendido en el período de medición. El TPDA es importante porque permite justificar el diseño de ciertos elementos estructuras en una carretera, pero no es adecuado para el uso directo en el diseño geométrico de una carretera, (con excepción de calles con bajo volumen

vehicular), debido a que no muestra las variaciones, que se pueden presentar ciertos meses al año en el flujo vehicular (SIECA, 2011). Por lo antes mencionado, es importante tomar en cuenta la intensidad del tránsito a lo largo de un día, que permita elegir aquellas horas pico como una base adecuada para el diseño geométrico.

Esto se debe a que se realiza el diseño basándose en la presencia de demandas horarias extremas que pueden tener un menor nivel de comodidad para conducir. En la práctica, es común hacer uso del concepto denominado la intensidad de la treintava hora, lo cual significa que es excedida únicamente por treinta horas durante el año y representa una fracción del TPDA, dependiendo del tipo de carretera (Dobles, 2013).

Para las carreteras rurales, el valor de la treintava hora se encuentra generalmente, entre el 12 y 18 % del TPDA, usando como término medio y representativo el 15 % del TPDA. En las carreteras urbanas, el volumen se localiza entre el 8 y 12 % del TPDA, del cual es válido utilizar en la práctica el 10 %.

Proyección del tránsito vehicular

Para realizar la proyección del tránsito vehicular al año deseado, la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (2004), recomienda utilizar la siguiente fórmula:

$$TPDA_{Actual} * (1 + \%crecimiento)^n \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde:

-TPDA actual: tránsito promedio diario anual actual

-% crecimiento: Tasa de crecimiento para la estación de conteo

-n: tiempo en años que se desea proyectar

Capacidad de carreteras

La capacidad de una carretera según la SIECA (2011) define como “*el máximo número de vehículos que pueden circular en un punto dado durante un período específico de tiempo, bajo condiciones prevalecientes de la carretera y el tránsito. Asumiendo que no hay influencia del tránsito más adelante, dentro del en análisis*”.

Las condiciones prevalecientes consisten en aquellas características geométricas como lo es el número y uso de los carriles, la configuración de carriles, ancho de hombro y los alineamientos horizontales y verticales, entre otros elementos (SIECA, 2011).

El análisis de la capacidad de una carretera tiene como principal objetivo, estimar el número máximo de vehículos que una carretera puede acomodar con seguridad razonable, durante un período de tiempo. Además la estimación de la capacidad de las vías sirve para varios propósitos importantes: definir la anchura de la vía mediante, lo que conduce al número de carriles y su dimensión, así como otros elementos. También contribuye a lograr mejores determinaciones respecto al alineamiento. Los flujos de tránsito se caracterizan por tres elementos: velocidad, intensidad de tránsito y densidad, los cuales se pueden relacionar de forma teórica, considerando la circulación de vehículos en una fila y a velocidad constante (Dobles, 2013).

El flujo del tránsito máximo en una carretera sucede cuando se alcanza la densidad crítica y el tránsito se mueve a la velocidad crítica, lo que ocurre generalmente en la hora pico (es el período más crítico) del volumen del tránsito. La capacidad comúnmente se mide en vehículos por hora (veh/h) (SIECA, 2011).

Según el Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de Carreteras (MCNDGC) (2011), las condiciones ideales para la capacidad en carreteras de dos vías, son las siguientes:

- Flujo ininterrumpido
- 3.60 m de ancho de carril
- 1.80 m de distancia mínima lateral (ancho del hombro)
- Sin vehículos pesados
- Velocidad de diseño ≥ 90 km/h
- Sin restricciones en la distancia de visibilidad de rebase.
- Sin interferencia de paso de peatones
- En ambas direcciones, el tránsito se considera igual (50%/50%).

Los Niveles de Servicio (LOS)

El flujo vehicular de servicio para diseño implica que no se alcance el grado de congestión preseleccionado por el diseñador, sin embargo, se puede tolerar un mínimo de éste. Se debe entender que congestión en una vía no es sinónimo de paralización de todo el movimiento. El congestión empieza con la creciente interferencia entre los vehículos en la corriente del tránsito, la cual comienza a perder la calidad de flujo libre (SIECA, 2011).

El Manual de Capacidades de Carreteras dispuso seis niveles de servicio, los cuales son un concepto cualitativo que describe las condiciones de circulación, dentro de una corriente de tránsito, según las perciben los conductores y pasajeros. Los niveles se identifican con la letra A hasta la F, donde A representa la condición de flujo vehicular totalmente libre y F una circulación forzosa o de congestión (Dobles, 2013).

Las condiciones de operación para cada nivel de servicio, se muestran a continuación:

CUADRO 1. CONDICIONES DE OPERACIÓN SEGÚN NIVEL DE SERVICIO	
Nivel de Servicio	Descripción
A	Flujo libre de vehículos, bajos volúmenes de tránsito y relativamente altas velocidades de operación (90 km/h o más). La demora de los conductores no es mayor del 35% del total de tiempo de viaje y la razón de flujo total para ambas direcciones es de 490 veh/hr.
B	Flujo libre razonable, pero la velocidad empieza a ser restringida por las condiciones del tránsito (80 km/h). La demora de los conductores no es mayor al 50% del total del tiempo de viaje y la razón de flujo total para ambas direcciones es de 780 veh/hr.
C	Se mantiene en zona estable, pero muchos conductores empiezan a sentir restricciones en su libertad para seleccionar su propia velocidad (70 km/h). La demora de los conductores alcanza el 65% del total del tiempo de viaje y la razón de flujo total para ambas direcciones es de 1,190 veh/hr.
D	Acercándose a flujo inestable, los conductores tienen poca libertad para maniobrar. La velocidad se mantiene alrededor de 60 km/h. La demora de los conductores es cercana al 80% del total del tiempo de viaje y la razón de flujo total para ambas direcciones es de 1,830 veh/hr.
E	Flujo inestable, suceden pequeños embotellamientos. La velocidad cae hasta 40 km/hr. La demora de los conductores es mayor al 80% del total del tiempo de viaje.
F	Flujo forzado, condiciones de "pare y siga", congestión de tránsito.

Fuente. MCNDGC, 2011.

Por otra parte, la AASHTO (2004) recomienda usar la guía que se muestra en el Cuadro 2 para elegir el nivel de servicio de una vía, en función de la tipología y las condiciones del terreno.

CUADRO 2. GUÍA PARA ELEGIR EL NIVEL DE SERVICIO PARA DISEÑO				
Tipo de carretera	Tipo de Área y Nivel de Servicio Apropiado			
	Rural Plano	Rural Ondulado	Rural Montañoso	Urbano y Suburbano
Autopista	B	B	C	C
Arterial	B	B	C	C
Colectora	C	C	D	D
Locales	D	D	D	D

Fuente: AASHTO, 2004.

El Highway Capacity Manual (HCM) (2011) establece una relación entre los Niveles de Servicio y las demoras promedio por vehículo, los cuales se muestran en el Cuadro 3.

CUADRO 3. CLASIFICACIÓN SEGÚN EL TIEMPO DE DEMORA PROMEDIO POR VEHÍCULO	
Nivel de Servicio	Demoras (s)
A	< 10
B	> 10.1 hasta < 20
C	> 20.1 hasta < 30
D	> 30.1 hasta < 40
E	> 40.1 hasta < 75
F	> 75

Fuente: HCM, 2011.

Señalización en cruces a nivel

Un cruce de nivel carretera-ferrocarril difiere de una intersección carretera-carretera en que el tren siempre tiene el derecho de paso. Desde esta perspectiva, el proceso para decidir qué tipo de dispositivo de control de tráfico en la carretera se instalará, o incluso para permitir que exista un cruce a nivel de ferrocarril de carretera, es esencialmente un proceso de dos pasos: 1) ¿Qué información necesita el conductor del vehículo para poder cruzar con seguridad? y, 2) ¿Es la respuesta del conductor resultante a un dispositivo de control de tráfico "compatible" con las características operativas del sistema vial y la instalación ferroviaria? (USDT, 2002).

El primer paso involucra tres elementos esenciales requeridos para un paso "seguro" a través del cruce, que son los mismos elementos que un conductor necesita para cruzar una intersección carretera-carretera:

Distancia de visibilidad

El primer elemento se refiere a la distancia de visión de "parada" o "frenado", que es la capacidad de ver un tren y / o el dispositivo de control de tráfico en el cruce con suficiente antelación para que el conductor pueda llevar el vehículo a un lugar seguro y controlado. Los vehículos se deben detener por lo menos a 4,5 m del riel más cercano, si es necesario, (SIECA, 2000) y se aplica a un cruce controlado pasivo o activo. La distancia de la vista de parada se mide

a lo largo de la carretera y es una función de la distancia requerida para el vehículo de "diseño", que se desplaza al límite de velocidad establecido, pueda detenerse de forma segura. Una distancia de visión de detención insuficiente a menudo se debe a la mala geometría de la calzada y / o la topografía circundante.

Sistemas de control de tráfico

El segundo elemento es una función del tipo de dispositivo de control de tráfico en el cruce de la vía férrea. Por lo general, existen tres tipos de dispositivos de control, cada uno de los cuales requiere una respuesta de cumplimiento distinta según el Manual Centroamericano de Dispositivos Uniformes para el Control del Tránsito (MCDU) (2000):

1. Señal R-1-6 (Cruz de San Andrés): el conductor debe estar preparado para detenerse al menos 4.5 m antes del eje de la vía férrea más cercana si es necesario, hasta que el conductor pueda tomar una decisión razonable de que no hay trenes en peligro. proximidad al cruce, y es seguro cruzar.
2. Los semáforos intermitentes tienen la misma función que una señal de ALTO (R-1-1): se requiere que un vehículo se detenga completamente a por lo menos 4.5 m del riel cercano. Son útiles para llamar la atención de los conductores, cuando se cambia la prioridad de paso.
3. Los semáforos intermitentes con agujas son equivalentes a una indicación de señal de tráfico de vehículo rojo: se requiere que un vehículo se detenga antes de la aguja y permanezca detenidos hasta que las agujas suban.

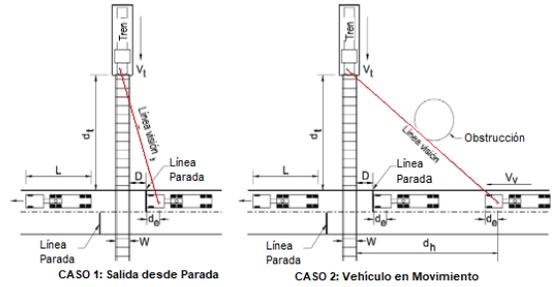
Decisión de proceder

El tercer elemento se refiere a la decisión del conductor de proceder con seguridad a través del paso a nivel. Implica la distancia de visibilidad

disponible, tanto en la aproximación como en el cruce mismo.

Sin embargo, las obstrucciones de la vista a menudo existen dentro del triángulo visual, generalmente, causadas por estructuras, topografía, cultivos u otra vegetación (de manera continua o estacional), objetos móviles o clima. Donde existan distancias de visión menores, el conductor debe reducir la velocidad y estar preparado para detenerse no menos de 4,5 m antes del riel cercano, hasta que se encuentre seguro que no se aproxima el tren.

En los casos en los que no se puede evitar la interrupción visual a los conductores, se puede hacer uso de señales reductoras de velocidad o de advertencia.



d_t = Vista a lo largo de las vías del ferrocarril (ft) V_v = Velocidad del vehículo (mph)
 d_h = Vista a la autopista (ft) f = Coeficiente de fricción
 d_a = Distancia del conductor al frente del vehículo (8ft) V_t = Velocidad del tren (mph)
 D = Distancia de la línea de parada al riel más cercano (15 ft) L = Longitud del vehículo (65 ft)
 W = Distancia entre rieles exteriores (Única vía $W=5ft$)

Notas:
 Ajustar para cruces sesgados
 Asumir pendientes de carreteras planas adyacentes y en cruces pista única

Figura 5a. Esquemas sobre distancia de visibilidad en Alto y en Movimiento.

Fuente. WSDOT, 2013

Distancia de visión de compensación

La distancia de visión requerida para el despeje a lo largo de ambas direcciones de la vía, desde la posición detenida del vehículo, depende de la velocidad máxima del tren y de las características de aceleración del vehículo de "diseño".

En la vía múltiple, los cruces de nivel de carretera y ferrocarril de dos o más vías de ferrocarril en servicio a través de la carretera, y donde dos o más trenes pueden operar simultáneamente sobre o cerca del cruce, la presencia de un tren en una vía puede restringir u oscurecer la vista de un conductor de un segundo tren que se aproxima en una vía adyacente. Dichos cruces deben tratarse de la misma manera que cualquier otro cruce que no tenga suficiente distancia de visión USDT, 2002). Las distancias de visibilidad a 4,5 m y cuando el vehículo se encuentra cercano al cruce, se pueden determinar mediante las siguientes figuras:

Velocidad Tren (mph) V_t	CASO 1: Salida de Parada	Caso 2: Vehículo en Movimiento						
		Velocidad Vehículo (mph) V_v						
		10 $f=0.40$	20 0.40	30 0.35	40 0.32	50 0.30	60 0.29	70 0.28
Distancia a lo largo del ferrocarril desde el cruce d_t (ft)								
10	240	146	106	99	100	105	111	118
20	480	293	212	198	200	209	222	236
30	721	439	318	297	300	314	333	355
40	961	585	424	396	401	419	444	473
50	1,201	732	530	494	501	524	555	591
60	1,441	878	636	593	601	628	666	706
70	1,681	1,024	742	692	701	733	777	828
80	1,921	1,171	848	791	801	833	888	946
90	2,162	1,317	954	890	901	943	999	1,064
Distancia a lo largo de la autopista desde el cruce d_h (ft)								
	69	135	220	324	447	589	751	

Diseña la distancia de visión para una combinación de velocidades de vehículos de carretera y tren y un camión de 65 pies que cruza un solo conjunto de pistas a 90°.

Fuente: A Policy on Geometric Design of Highway and Streets, 2004, by the American Association of State Highway and Transportation Officials.

Figura 6a. Valores de distancia de visibilidad en Alto y en Movimiento.

Fuente. WSDOT, 2013.

El segundo paso consiste en un proceso de selección de dispositivos de control de tráfico que tome en cuenta los requisitos operativos de los sistemas ferroviarios y viales respectivos. Desde la perspectiva vial, las preocupaciones por la capacidad de la vía y las expectativas de los conductores pueden exigir el tipo de control de tráfico presente.

Dispositivos de control de tráfico

El propósito del control de tráfico en los cruces de nivel de carretera y ferrocarril es permitir la operación segura y eficiente del tráfico ferroviario y de la carretera en dichos cruces. Los vehículos

que se aproximan a un cruce a nivel de carretera y ferrocarril deben estar preparados para ceder y detenerse si un tren se encuentra en el cruce o se acerca a él. Existen dos categorías de dispositivos de advertencia de ferrocarril: "pasivo" y "activo" (USDT, 2002).

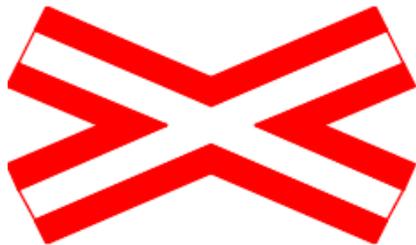
Dispositivos Pasivos

Todos los cruces de nivel ferroviario que incluyen todas las señales y marcas en el pavimento como dispositivos de control de tráfico que no son activados por los trenes. A continuación, se muestran algunos elementos pasivos a utilizar.

Señalización vertical

Los siguientes elementos de señalización se muestran en el MCDU, Capítulo 2, Señales verticales (2000):

R-1-6: indica un cruce a nivel ferroviario y establece la prioridad de paso al tren. Las aspas deben ser rectangulares de 1.30 m de ancho por 75 cm de altura, el largo mínimo es 1.20 m, fijando la relación 1:6 a 1:10 entre largo y ancho. Los ángulos menores entre aspas serán entre 45° y 55°. En cuanto al color de fondo debe ser blanco y el ribete de la cruz rojo. Se debe ubicar al lado derecho de la carretera a una distancia de 4.5 m o menos del eje de la vía férrea más cercano entre 1.5 m y 2.40 m del borde del pavimento.

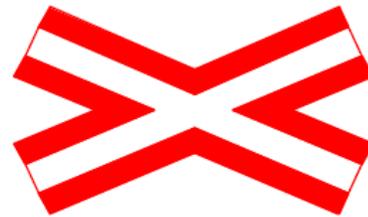


R-1-6

Figura 7. Señal de "Cruz de San Andrés".
Fuente. SIECA, (2000).

R-1-1: Indica a los conductores que se deben detener por completo antes de entrar a un cruce ferroviario. Debe tener forma de octágono

regular, con ancho mínimo de 60 cm y las letras de 20 cm de altura con la serie estándar C. Esta dimensión mínima se aplica a calles locales de bajo volumen vehicular y velocidad, sin embargo, en vías rápidas se recomienda un mayor tamaño. La dimensión estándar corresponde a 76x76cm. Respecto al color, el ribete, y las letras deben ser blancas, sobre un fondo rojo. En muchos casos esta señal acompaña la R-1-6 en la parte posterior como se muestra en la Figura 8a.



R-1-1y R-1-6

Figura 8a. Señal de "Cruz de San Andrés" y señal de ALTO.
Fuente. SIECA, (2000).

R-1-2 y R-1-8: "CEDA EL PASO" se utiliza para asignar la prioridad de paso en cruces ferroviarios. Debe tener forma de triángulo equilátero de 75 cm de lado, con uno de sus vértices apuntando hacia abajo. En carreteras de alto flujo vehicular se recomienda que las dimensiones mínimas deben ser 90 cm de lado. Respecto al color, el fondo será blanco, con ribete rojo (ancho igual 6 cm) y las letras de color negro. Esta señal se puede acompañar por la R-1-6 y la R-1-8 (Figura 9), pero no se debe utilizar para los cruces de ferrocarril convencionales, en estos casos se utiliza R-1-1 y R-1-6 (Figura 8), únicamente. La señal R-1-8 será de fondo blanco, con símbolo y ribete de color negro.



R-1-2,R-1-6,R-1-8

Figura 9. Señalización de "CEDA EL PASO"
Fuente. SIECA, (2000).

R-7-19: indica "No vehículos en la vía férrea" y se debe utilizar en zonas urbanas para mostrarles a los conductores que no se permite circular sobre la vía del ferrocarril o el derecho de vía férrea. Se recomienda su uso en las calles donde varios modos se comunican por el mismo derecho de vía (Figura 10).

R-7-20: muestra que está prohibido cruzar la vía férrea en los sitios donde los conductores podrían girar a través de la vía. Se utiliza comúnmente en carreteras paralelas a vías del tren (Figura 10).



Figura 10. Señales de "NO VEHÍCULOS EN LA VÍA FÉRREA"
Fuente. SIECA, (2000).

P-8-1 a P-8-5: La P-8-1 se utiliza para indicar la proximidad de un cruce a nivel de carretera con

una vía férrea secundaria, aunque esté protegido por luces. No obstante, en los cruces protegidos por barreras se utiliza la señal P-8-2.

Las señales de P-8-3 a P-8-5 se usan para mostrar la localización de un cruce de vías férreas con respecto a la intersección próxima. Dicha señalización se observa en la siguiente figura.

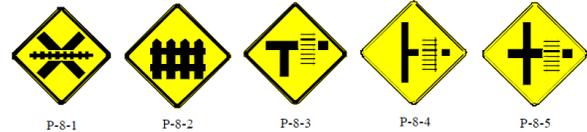


Figura 11. Señales de cruces de ferrocarril y tranvía
Fuente. SIECA, (2000).

Señalización horizontal

Los siguientes elementos de señalización se muestran en el MCDU, Capítulo 3, Demarcación en el pavimento (2000):

Aproximación a cruces ferroviarios: las marcas sobre el pavimento al acercarse el conductor a un cruce con la vía ferroviaria, está conformado por una cruz y las letras FC como se observa en la Figura 12^a. Además, debe pintarse marcas de color blanco que indiquen el no adelantamiento y algunas líneas transversales en las aproximaciones de cruces a nivel con el tren (Figura 13). El símbolo y letras deben ser, alargadas respecto al ángulo en que se observan.

Estas demarcaciones con un complemento a las señales de avance y alerta de ferrocarril (P-8-1) y la señal R-1-6, así como las señales para aquellos cruces que están protegidos de forma activa (P-8-2), cuando corresponda.

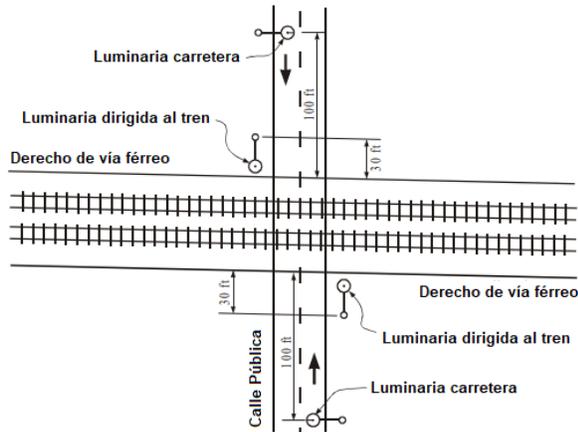


Figura 14. Iluminación de cruce ferroviario a nivel.
Fuente. Wooldridge, et al., (2000).

Dispositivos Activos

Todos los cruces de nivel de carretera y ferrocarril equipados con dispositivos de advertencia y / o control de tráfico que advierten sobre la aproximación o presencia de un tren. Estos dispositivos incluyen señales de luz intermitente, barreras de advertencia de ferrocarril y sistemas de advertencia de avance activo, los cuales se activan al acercarse los trenes.

Semáforos de luz intermitentes: se indica la aproximación de los trenes mediante dos luces rojas intermitentes, colocadas de forma vertical, que se encienden y apagan en forma alterna a intervalos de tiempo predeterminados y las cuales al pasar el tren quedan ambas luces rojas de forma permanente, hasta que se aleja el tren. Se colocan frente al tránsito que se aproxima al cruce ferroviario, donde se tenga la mayor visibilidad posible.

Se debe colocar un semáforo en cada acceso de la calle al cruce de las vías férreas, excepto aquellas que tienen un solo sentido de circulación, en la cual se coloca sólo al lado derecho del tránsito que se aproxima. Además, en muchas ocasiones se encuentran acompañados por las señales R-1-6 y/o R-1-1 (Figura 15), en el mismo poste. Si existe la presencia de agujas, se colocan sobre el soporte de estas en la parte superior.

Respecto a la distancia, esta se medirá a lo largo de carretera, entre la parte más próxima del semáforo y el riel más cercano, debe ser igual a 3 m como mínimo. Asimismo, se colocarán a no menos de 60 cm de la calle, tomados a partir de la orilla de la calzada.

En cuanto a la altura, la parte inferior de los lentes de los semáforos deberá quedar a no menos de 2.5 m ni mayor de 3 m sobre el nivel de la orilla de la calzada o de la acera, cuando se instalen en soportes tipo poste (SIECA, 2000).



Figura 15. Señalización activa/pasiva colocada en un cruce de la GAM.
Fuente. Elaboración propia.

Sistema de alarmas: se debe proporcionar dispositivos audibles que se colocan sobre los postes de soporte en los semáforos y/o en las barreras, de modo que los peatones y conductores que se encuentren en el cruce o se acerquen a él reciban una advertencia adecuada del cierre del cruce. Los dispositivos deben ser capaces de ajustar el volumen para adaptarse a los requisitos locales.

Cuando el tren activa el sistema el carácter del sonido de advertencia corresponde a pitidos intermitentes que informan que el tren se

acerca a los 300 m del cruce, a los cinco segundos posteriores, se activan bocinas intermitentes con un sonido más elevado, y a su vez se activan las luces rojas intermitentes de los semáforos. El sonido continúa hasta que automáticamente se apagan las luces rojas intermitentes (Bravo, 2018).

Además, las bocinas de los trenes que se aproximan a los cruces también proporcionan una advertencia audible.

Sistema de barreras: se deben instalar en mismo soporte del semáforo y la parte inferior de la barrera, cuando se encuentre en posición horizontal, quedará a una altura de 1 m como mínimo o a 1.4 m como máximo sobre la calzada. Deberán ser automáticas y se pintarán con franjas diagonales de 40 cm. de ancho, de color blanco reflejante y rojo, de manera alternada, con una inclinación de 45 grados descendiendo hacia la izquierda, así como cubrir el ancho de carril para evitar el paso de los vehículos (SIECA, 2000). Asimismo, se deberán acompañar por semáforos de luces intermitentes, las señales R-1-1 (en la parte superior) y R-1-6 (entre el semáforo y la barrera), y el sistema de alarmas (Figura 16).



Figura 16. Señalización completa activa/pasiva colocada en un cruce de la GAM.

Fuente. Elaboración propia.

Sistemas de advertencia para el maquinista: sobre el derecho de vía férrea, se encuentran semáforos con luces de color verde y amarilla, en forma vertical. Este semáforo se debe colocar a no menos de 60 cm de la orilla exterior pavimentada sobre los rieles, de tal forma que

sea visible para el maquinista. La luz verde le indica al maquinista que el sistema de alarma, barreras y semáforos se activaron de manera adecuada, por lo tanto el cruce es seguro y no debe disminuir la velocidad. Por el contrario la luz amarilla indica un fallo en el sistema y el maquinista debe bajar la velocidad y prestar mayor atención al pasar el cruce. Estos sistemas de seguridad a su vez se acompañan de dispositivos sonoros intermitentes (Conrado, 2019).

Funcionamiento de los dispositivos activos, según empresa FAPCOM

La empresa de origen español, llamada FABCOM es la encargada de instalar los dispositivos activos de seguridad en Costa Rica. Este sistema de seguridad se basa en las normas CENELEC UNE EN 50126, 50128 y 50129, las cuales describen los conceptos, métodos y herramientas que deben tomarse en cuenta en el momento de la especificación y demostración de requisitos RAMS (Fiabilidad, Disponibilidad, Mantenimiento y Seguridad), a lo largo del todo el ciclo de vida, tanto del material como de la infraestructura (Cetren Formación, 2018). Asimismo, cumple con el Nivel de Seguridad Integral (SIL), que representa el nivel de especificación de los requisitos en integridad de las funciones de seguridad que se asignará a los sistemas de seguridad eléctricos y electrónicos (Applus Velosi, 2017). Para el caso específico de FABCOM, trabajaban con el SIL 5, es decir, es el máximo nivel de seguridad y en caso de una falla, el sistema fallará a favor de la seguridad de los usuarios (Nadal, 2019).

El sistema que se ha colocado en el GAM funciona de forma automática en la mayoría de los cruces, con excepción de aquellos que se encuentran cerca de las estaciones férreas. Cuando el tren se encuentra a 300 m del cruce, se activa el sistema sonoro de forma intermitente que advierte a los peatones y conductores el acercamiento del tren. Los siguientes cinco segundos se activan las bocinas con sonidos más fuertes, y al mismo tiempo se activan los semáforos intermitentes. Los 12 ó 15 segundos posteriores, se activa el sistema de agujas (durante 57 segundos), evitando el paso de los vehículos y peatones, en el momento que el tren

se encuentra avanzando sobre el cruce. Una vez que el último vagón del tren se aleja del cruce, se desactiva el sistema de seguridad, primero se levantan las agujas y segundos más tarde se desactivan los semáforos y bocinas. El tiempo total desde su activación hasta la desactivación de un cruce corresponde a 80 segundos aproximadamente, sin embargo, este valor depende de la cantidad de vagones y la velocidad del tren (Bravo, 2018).

La activación de los dispositivos se lleva a cabo mediante pedales con sensores, los cuales mediante cables subterráneos transmiten la información a todo el sistema (agujas, bocinas y semáforos), que se ubican sobre los rieles a 300 m aproximadamente antes y después de cada cruce (Figura 17). Al pasar el tren sobre el primer pedal, activa el mismo de forma tal que los sensores almacenan la velocidad y cantidad de ejes del tren. Esta información permite que el sistema se mantenga activo el tiempo necesario, durante el paso de la máquina sobre el cruce. El segundo pedal recopila la información sobre el paso del tren, desactivando el sistema de seguridad. No obstante, en las terminales ferroviarias la activación de los dispositivos se realiza manualmente por el maquinista. Debido a que al acomodar la maquinaria y al estar el cruce tan cerca de la terminal, se puede activar el sensor sobre el riel, ocasionando que inicie el funcionamiento del sistema, generando molestias y atrasos innecesarios a los usuarios. Por lo tanto, el sistema se activa de forma manual justo en el momento que el tren sale de la estación y al regresar la activación se realiza automáticamente (Conrado, 2019).



Figura 17. Pedales con sensores ubicados en los rieles que se activan cuando pasa el tren. Está ubicado en Barrio Escalante, San José.
Fuente. Bravo (2018).

Asimismo, el maquinista recibe alerta sobre el funcionamiento del sistema de seguridad en los cruces, mediante un semáforo localizado a un extremo del derecho de vía férrea (Figura 18). Al pasar el tren por el primer sensor, se activan los semáforos que presentan una luz verde y amarilla. En caso de que exista algún fallo en los dispositivos se enciende la luz amarilla, indicándole al maquinista que debe disminuir la velocidad porque el cruce no es seguro. Por el contrario, si el funcionamiento es correcto se enciende la luz verde, demostrando que el cruce es seguro (Nadal, 2019).



Figura 18. Semáforo preventivo para maquinista del tren previo al cruce férreo.
Fuente. Bravo (2018).

Por otra parte, si el sistema detecta algún tipo de falla por diferentes razones, éste ocasionará que las agujas permanezcan en posición horizontal impidiendo el paso de los vehículos a través del cruce. Esto se debe a que funciona con un nivel de seguridad cuatro, lo que significa que siempre se mantendrá a favor de la seguridad para los usuarios (Nadal, 2019).

Selección de dispositivos de advertencia en cruces a nivel

Los dispositivos de advertencia pasiva notifican a los conductores que se están acercando a un cruce de nivel y que deben estar atentos a los trenes. En general, se debe considerar los dispositivos de advertencia pasiva necesarios en los cruces de nivel con bajos volúmenes y

velocidades, tanto en la carretera como en el ferrocarril, y donde existan distancias de visión adecuadas. Los dispositivos de advertencia activos deben considerarse en todos los demás cruces. Además, debido a la gran cantidad de variables significativas que deben considerarse, no existe un sistema único de dispositivos de control de tráfico activo universalmente aplicable para los cruces a nivel (WSDOT, 2013).

Dispositivos de advertencia pasivos

En caso de requerir aplicaciones suplementarias de control de tráfico pasivo, se encuentra sujeto a evaluación de ingeniería:

1. Distancia visibilidad de parada inadecuada (distancia):
 - a. Mejorar la geometría de la calzada.
 - b. Instalar señales de advertencia adecuadas (incluida la consideración de tipos activos).
 - c. Reducir la velocidad de la carretera antes del cruce.
 - d. Cerrar el cruce.
 - e. Reconfigurar o reubicar el cruce.
 - f. Desnivelar el cruce.
2. Distancia de visión inadecuada del enfoque (esquina):
 - a. Retirar la obstrucción de la distancia de visión.
 - b. Instalar señales de advertencia adecuadas.
 - c. Reducir la velocidad de la carretera antes del cruce.
 - d. Instale una señal de ALTO (R-1-1) y la señal de R-1-6, con una señal de advertencia anticipada antes del cruce (P-8-1 a P-8-5) donde esté garantizado por el Manual Centroamericano de Dispositivos Uniformes para el Control del Tránsito (la visibilidad restringida requiere que los conductores se detengan en el cruce).
 - e. Además, la marca en el pavimento de ALTO.
 - f. Instalar dispositivos activos.
 - g. Cerrar el cruce.

h. Reconfigurar o reubicar el cruce.

3. Las deficiencias en la distancia de la vista de parada y de la esquina pueden tratarse inmediatamente con señales de advertencia o de control de tráfico reglamentarias, como una señal de ALTO, con señales de advertencia anticipadas apropiadas. Sin embargo, hasta que se implementen medidas correctivas permanentes para corregir la distancia de visión deficiente, se deben tomar medidas provisionales que pueden incluir:
 - a. Colocar dispositivos activos.
 - b. Cerrar temporalmente el cruce.
 - c. Restringir temporalmente el uso de la carretera por las clases de vehículos.

Dispositivos de advertencia activos

Los semáforos intermitentes y/o señalización pasiva, sin barreras automáticas, son opcionales cuando el cruce se encuentra en un lugar que no sea una intersección, donde las velocidades de tránsito del tren ligero no excedan los 40 km / h (25 mph), y cuando la carretera es una calle de bajo volumen donde prevalecen las velocidades menores a 40 km / h (25 mph) (USDT, 2003).

Son de uso obligatorio los semáforos cuando las velocidades del tren ligero superan los 60 km/h (35 mph). Las señales de luz intermitente deben ser claramente visibles para los automovilistas, peatones y ciclistas.

Cuando los cruces de nivel se encuentra en un lugar que no sea una intersección, donde las velocidades de tránsito del tren ligero son iguales o menores a los 40 km / h (25 mph), se pueden instalar barreras automáticas y señales de luces intermitentes (USDT, 2003).

Asimismo, se requieren marcas en el pavimento del ferrocarril en todos los cruces donde hay dispositivos de advertencia activos o el límite de velocidad es de 60 km/h o más (WSDOT, 2013).

Los dispositivos activos con barreras o agujas automáticas deben considerarse en los cruces a nivel de carreteras cuando un estudio de ingeniería realizado por un equipo de diagnóstico

determine que una o más de las siguientes condiciones existen, según (USDT, 2002):

Si existe una distancia visual de limpieza inadecuada en uno o más cuadrantes de enfoque. Y se determina que TODO lo siguiente se aplica:

- a. No es factible ni física ni económicamente corregir la deficiencia de la distancia visual.
- b. No existe un acceso alternativo aceptable.
- c. Sobre la base del costo del ciclo de vida, el costo de proporcionar un acceso alternativo aceptable o una desnivelación del cruce excedería el costo de instalar dispositivos activos con agujas.

1. Los trenes de pasajeros programados regularmente operan cerca de instalaciones industriales, por ejemplo: canteras de piedra, molinos de troncos, plantas de cemento, plantas químicas y rellenos de tierra.
2. En las proximidades de escuelas, plantas industriales o áreas comerciales donde el uso de autobuses escolares, camiones pesados o camiones que transportan materiales peligrosos sea considerablemente mayor que el normal.
3. Según el número de trenes de pasajeros y / o la cantidad y el tipo de camiones, un equipo de diagnóstico determina que existe un riesgo significativamente mayor que el riesgo normal de que una colisión entre un tren y un vehículo pueda causar la muerte o lesiones graves a los pasajeros del tren.
4. Múltiples pistas principales o de carrera a través del cruce.
5. Muy cerca de una intersección de la carretera u otros cruces de ferrocarril de la carretera, en los cuales los dispositivos de control de tráfico en la intersección cercana hacen que el tráfico haga cola en o sobre las vías. (En tales casos, si una intersección cercana tiene control de la señal de tráfico, debe estar interconectada para proporcionar una operación anticipada y considerar el control de la señal de tráfico, si no hay).

6. Según lo recomendado por un estudio de ingeniería o equipo de diagnóstico.

Otros factores que se pueden considerar para colocar las barreras automáticas son (USDT, 2007):

- Múltiples líneas de ferrocarril de la línea principal.
- Múltiples vías donde un tren en o cerca del cruce puede ocultar el movimiento de otro tren que se acerca al cruce.
- Funcionamiento del tren de alta velocidad combinado con una distancia de visión limitada.
- Una combinación de tráfico por carretera y ferrocarril de alta velocidad y moderadamente alto volumen.
- Presencia de autobuses escolares, autobuses de tránsito o vehículos agrícolas en el flujo de tráfico.
- Presencia de camiones que transportan materiales peligrosos, especialmente cuando se obstruye la vista desde la vía de un vehículo detenido (curva en la vía, etc.).
- Continuación de colisiones después de la instalación de luces intermitentes.
- Presencia de trenes de pasajeros.

Software PTV VISSIM

VISSIM es una herramienta que no sólo facilita el modelado muy preciso de la infraestructura vial, sino que también ofrece grandes posibilidades para el ajuste de las propiedades de los vehículos. Permite la simulación de vehículos de dos ruedas, tranvías, e incluso peatones, lo cual es bastante raro para los simuladores microscópicos. Además, es posible realizar un procedimiento iterativo de asignación dinámica de tráfico. Además, VISSIM tiene enormes capacidades gráficas que permiten la creación de animaciones 2D / 3D con un alto nivel de detalle (Maciejewski, 2010)

A continuación se presentan algunos usos en casos reales, para los cuales se ha utilizado VISSIM:

Qin y Xiong (2006) utilizan VISSIM para evaluar algunos esquemas en la investigación científica de renovación de tráfico en Kunming, que se ubica en el sur de China. Mediante la aplicación de simulación de esquemas unidireccionales, presentaron una nueva idea para evaluar los esquemas de gestión del tráfico en las complejas condiciones del tráfico y demostraron que VISSIM puede ofrecer alguna base de toma de decisiones para los departamentos de gestión del tráfico.

Michael P. Hunter y Richard (2006) exploran la capacidad de crear una estimación precisa utilizando datos de carreteras en tiempo real agregados en varios intervalos de actualización. Para determinar el impacto de la simulación local que refleja la gran simulación de red basada en los diferentes intervalos de agregación en diferentes condiciones de tráfico, modelan cuatro escenarios no congestionados y cuatro escenarios congestionados, y luego descubren que las mejoras percibidas son más pronunciadas bajo condiciones no congestionadas mientras mínimo bajo condiciones congestionadas.

Lin, Yang y Gao (2013) construyen un modelo de red vial en VISSIM, para evaluar la red de carreteras del área del CBD de Beijing, China. Para ello se comparan cuatro diferentes planes de organización de tráfico. Dado que los comportamientos de conducción en Beijing son significativamente diferentes de los de EE. UU. O Europa, se realizan estudios de comportamiento para calibrar los parámetros antes de la construcción del modelo para obtener resultados más precisos. Este documento utiliza el tiempo de viaje, la velocidad de viaje, la longitud de la cola y el retraso como indicadores de evaluación para realizar la comparación. Los resultados obtenidos muestran que el plan de organización de calle de una sola vía dentro del área de CBD es el que mejor se desempeña.

Jolovic, Stevanovic, Sajjadi y Martin (2016) utilizan VISSIM y FREEVAL para determinar los Niveles de Servicio (LOS) en una autopista, de forma tal que se comparan las metodologías detrás de las dos herramientas. Estos softwares representan lados bastante opuestos en el modelado de autopistas: VISSIM como representativo de las herramientas de microsimulación, requiere una preparación y calibración del modelo que consumen mucho tiempo, pero generalmente, proporciona una

mejor granularidad de los resultados. FREEVAL requiere menos en los aspectos de entrada y calibración, pero sus resultados pueden no ser tan completos y precisos como VISSIM.

En general, VISSIM permite el modelado y la simulación más precisos, con énfasis en proporcionar un alto nivel de realismo, tanto en una red como en vehículos / conductores. Sin embargo, tal precisión está a un precio de baja velocidad de simulación y, en última instancia, de alcance territorial muy limitado. También presenta las desventajas que no es un software de código abierto, por lo tanto, se desconoce cómo se calculan o determinan los resultados que se obtienen de este y que es un software comercial costoso.

Cabe destacar, si se desea obtener resultados de simulación confiables, es extremadamente importante llevar a cabo un proceso de calibración exhaustivo que conduzca a la identificación de la estructura del modelo y sus parámetros. Normalmente, el proceso de calibración es iterativo y depende en gran medida de las propiedades del modelo (Maciejewski, 2010).

Criterios para justificar una desnivelación

El Libro AASHTO (2011) describe seis condiciones, o garantías, que deben considerarse al determinar si una desnivelación o un intercambio está justificado en un sitio en particular:

1. Designación del diseño: la determinación de desarrollar una carretera con control de acceso completo entre ubicaciones seleccionadas se convierte en la garantía para proporcionar desnivelaciones o intercambios para todas las carreteras que se cruzan en la carretera.
2. Reducción de cuellos de botella o congestión en el punto: la capacidad insuficiente en la intersección de rutas muy transitadas da como resultado una congestión intolerable en uno o todos los enfoques.
3. Reducción de la frecuencia y severidad de los choques: algunas intersecciones a nivel tienen una tasa o frecuencia desproporcionada de choques graves. Si es probable que los métodos económicos para reducir los choques sean

ineficaces o poco prácticos, se puede justificar una desnivelación o un intercambio.

4. Topografía del sitio: en algunos sitios, los diseños de desnivelación son el único tipo de intersección que se puede construir económicamente.

5. Beneficios para el usuario de la carretera: los costos de los usuarios de la carretera por demoras en las intersecciones congestionadas son grandes. Tales costos, como el uso de combustible y aceite, el desgaste de los neumáticos, las reparaciones, el retraso de los conductores y los choques que resultan de los cambios de velocidad, las paradas y la espera, son muy superiores a los de las intersecciones que permiten un funcionamiento ininterrumpido o continuo.

6. Orden de volumen de tráfico: una orden de volumen de tráfico para el tratamiento de intercambio puede ser la más tangible de cualquier orden de intercambio. Aunque un volumen de tráfico específico en una intersección no se puede usar como el único criterio para garantizar un intercambio, es una variable importante, particularmente cuando se combina con el patrón de distribución del tráfico y el efecto del comportamiento del tráfico.

Además AASHTO informa que convertir una intersección señalizada en un intercambio desnivelado, reduce los choques por lesiones en un 28 por ciento.

La Autoridad Metropolitana de Transporte, en su Política de cruce a nivel para el transporte en tren ligero (2003), establece tres metodologías para justificar la desnivelación de un cruce a nivel. La primera como una fase preliminar, consiste en utilizar el nomograma mostrado en la Figura 19, de forma tal que se pueda trazar una línea para determinar en cuál de las tres zonas se ubica el cruce. En el caso de que un cruce se encuentre muy cerca de una de las dos líneas de umbral, el cruce se puede considerar en la categoría más restrictiva, ya que los recuentos de tráfico existentes están sujetos a la fluctuación diaria y los pronósticos son sólo estimaciones.

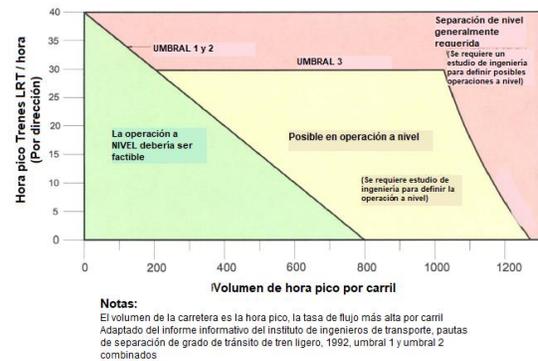


Figura 19. Nomograma para estimar la necesidad de desnivelar un cruce ferroviario.
Fuente. MTA, 2003.

La segunda metodología sobre la fase de análisis más detallado se explica a continuación:

- **Cruce a nivel:** si la selección inicial fue A nivel debería ser factible, y el cruce se propone como una señal de tráfico controlada, baja velocidad y no hay problemas de seguridad importantes, entonces el resultado de la fase de análisis detallado es Disposición Preliminar A Nivel. Se debe tener en cuenta que dos puntos de decisión adicionales pueden desencadenar el análisis operativo y de seguridad: 1) cruces cerrados, para los cuales se debe realizar un análisis de colas para determinar la necesidad de evitar las señales de tráfico u otras colas técnicas de control, y 2) ubicaciones donde las condiciones del sitio o el uso de cruces indican la necesidad de una revisión de seguridad en esta etapa del proceso.
- **Desnivelación:** si la evaluación inicial indica Desnivelación generalmente requerida y el cruce se propone como un acceso cerrado, se requiere un cruce con preferencia de la señal de tráfico adyacente (si está presente) o sin obstáculos. Además, son necesarias las operaciones ferroviarias de alta velocidad, entonces el resultado del

análisis detallado es Separación preliminar del grado de disposición. Si, por otro lado, la operación a una velocidad más baja a través del cruce con el uso de una señal de tráfico para controlarlo es aceptable, entonces, como se muestra en la siguiente fase, se puede hacer un análisis de seguridad para este enfoque alternativo.

La tercera metodología de la fase de verificación se muestra seguidamente:

- Ingeniería preliminar: si se proporciona, la ingeniería preliminar debe demostrar la configuración de una solución factible que incluye el diseño propuesto, el derecho de paso requerido, el costo y los impactos secundarios (por ejemplo, ruido y visuales, distancia visual, etc.).
- Modelado de simulación: si se proporciona, los estudios de simulación de tráfico deben probar métodos alternativos de temporización de la señal de tráfico e identificar los tiempos de viaje, la demora y la cola que podrían afectar el tráfico y las operaciones del tren.
- Operaciones ferroviarias: los resultados del modelo de simulación se pueden utilizar para revisar la estimación del retraso de la señal de tráfico y del tiempo de viaje total para la línea ferroviaria. Si la operación a nivel a través de una cantidad de cruces resultaría en tiempos de viaje de extremo a extremo sustancialmente diferentes, puede ser apropiado evaluar el posible impacto sobre el patrocinio proyectado de la instalación y la rentabilidad resultante (costo por nuevo usuario).
- Estudios de seguridad: se deben realizar estudios de ingeniería adicionales de acuerdo con los problemas de seguridad pendientes.

Gitelma, Shalom, Doveh y Cohen (2006), realizaron un artículo llamado "*Herramientas de detección para considerar la desnivelación en los*

cruces de ferrocarril-carretera" y mediante un estudio de literatura determinaron que el parámetro más extendido que prescribe la eliminación de cruces a nivel en la mayoría de los países es la velocidad de operación de los trenes de 160 km / h o más. Cuando el criterio de alta velocidad sigue siendo inaplicable, en algunos países se aplica un parámetro de decisión, que combina las medidas del tráfico de vehículos y la cantidad de trenes por cruce. Por ejemplo, a principios de la década de 1990, algunos estados de EE. UU. Aplicaron el parámetro que era el producto del tráfico diario de vehículos y el número de trenes por día: cuando el valor es superior a 20,000–35,000 para un cruce rural o de 50,000–75,000 para una urbana, una separación de grado se requiere (Katz y Guttman, 1991). De manera similar, en Japón, el criterio establecía: si el producto del tráfico diario de vehículos y el número de horas de cierres de cruces por día superan los 10,000, el cruce es un candidato para ser desnivelado (Katz y Guttman, 1991). En un estudio anterior sobre los cruces a nivel en Israel (Hakkert y Gitelman, 1997) se desarrolló un criterio simplificado para seleccionar los cruces para la desnivelación. El criterio israelí se parecía a los japoneses en su forma, pero tenía un valor de umbral más alto, de 13,000 horas de vehículo.

Los dos factores principales considerados en el artículo fueron los retrasos en los vehículos y los problemas de seguridad asociados con los cruces a nivel. Siguiendo mediciones detalladas realizadas en una muestra representativa de cruces, se obtuvieron estimaciones y se desarrolló un modelo para evaluar las pérdidas económicas debidas a retrasos de vehículos en cualquier cruce, según sus parámetros, tales como volúmenes de tráfico, tipo de carretera, número de trenes. Utilizando los datos de accidentes y el inventario de cruces durante 5 años, se construyó un modelo de predicción de accidentes que, junto con los costos actualizados de los accidentes, proporcionó una base para evaluar las pérdidas debidas a problemas de seguridad en los pasos a nivel. Sobre la base de las estimaciones de la muestra, se desarrolló un criterio cuantitativo para la desnivelación.

Tanto los modelos como el criterio proporcionaron un marco para considerar todos los cruces existentes desde el punto de vista de la desnivelación.

El estudio elaborado por la compañía IDOM (2018), existe una sección dedicada a los pasos a nivel. En esta sección se explica que es necesario realizar un análisis de cada una de las intersecciones donde se tome en cuenta las características geométricas y operativas como lo es la capacidad y giros permitidos, así como las futuras intervenciones, entre otros.

Los criterios de evaluación para determinar si es necesaria la desnivelación de un cruce, son el análisis de los volúmenes y capacidades en cada cruce, una vez que en el tren rápido se encuentre en funcionamiento.

Por lo tanto, se aplicó el método del HCM (2000) y se estableció la capacidad máxima permitida de la intersección como 1008 veh/h. Esto indica que cualquier cruce que presente un volumen mayor o igual a este, se considera con niveles de servicio F. En síntesis de manera referencial, se determinaron los criterios de evaluación que se muestran a continuación:

- **Volumen de tránsito < 1.000 veh. /h:** no requiere estudio.
- **Volumen de tránsito entre 1.000 y 2.000 veh. /h:** requiere de estudio de microsimulación.
- **Volumen de tránsito > 2.000 veh. /h:** es necesario desnivelar la intersección.

Asimismo, se mencionan algunos factores que se deben tomar en cuenta a la hora de proponer una desnivelación del cruce, como son los elementos que se pueden ver afectados, a saber, los servicios existentes, las viviendas, instalaciones, entre otros; al igual que el tamaño de la sección vial y el número de carriles que tenga disponible. Además, en aquellos casos donde la sección vial es más reducida se considera como solución más apropiada, el desnivelar las vías férreas en lugar de hacerlo con la carretera, de tal modo que se minimice las afecciones en las propiedades colindantes y el flujo vehicular.

Estudios de caso sobre desnivelación

Estudio de viabilidad de la separación del ferrocarril en la Autopista 47 (Ferry St.)

El Departamento de Transporte de Minnesota, (2016) realizó un estudio con el objetivo mejorar la carretera 47 (Ferry Street) BNSF Cruce de Ferrocarril, en cuanto a la seguridad y movilidad de los automovilistas, peatones, ciclistas y trenes. La principal necesidad de este proyecto fue abordar los problemas de seguridad en el cruce de ferrocarriles identificados en la autopista 47 y las instalaciones ferroviarias de BNSF (Figura 20). Las necesidades secundarias incluyen abordar las colas y los retrasos relacionados con el cruce de ferrocarriles, la geometría horizontal y vertical no deseable en el cruce de ferrocarriles, la administración de acceso cerca del cruce de ferrocarriles y los problemas de seguridad a lo largo de la carretera 47 dentro del área del proyecto.

Primero se hizo un análisis que permitió conocer sobre el área de estudio y sus antecedentes, así como la operación del tren. Además, se recopilaron datos de los volúmenes de vehículos y trenes en las intersecciones de estudio, los datos de colisiones y estudio sobre tiempos de señal para la colocación de semáforos, que permitieron una mejor caracterización del sitio.

En consecuencia, se consideraron dos conceptos de alternativas para abordar la necesidad primaria de este estudio de factibilidad. Estos incluyen la construcción de un puente sobre el ferrocarril (Figura 20) o desnivelar la carretera por debajo del paso de ferrocarril (Figura 21). Ambas alternativas mantienen la ubicación actual del cruce. Posteriormente, se realizaron simulaciones en el software VISSIM planteando dos escenarios con y sin trenes, utilizando los volúmenes existentes al año en que se llevó a cabo el estudio y valorando la desnivelación por arriba o debajo de la carretera.



Figura 20. Concepto de alternativa con la carretera sobre el ferrocarril.
Fuente. MNDT, 2016.



Figura 21. Concepto para Alternativa con la carretera bajo el ferrocarril.
Fuente. MNDT, 2016.

El proceso de evaluación de las alternativas propuestas, se llevó a cabo mediante una tabla de evaluación, en donde se

establecieron ciertos criterios, se ponderaron dichos criterios y se asignó una escala de puntuación para calificar cada alternativa. Una vez que se completó la puntuación de rendimiento se dividió por el costo total estimado para determinar el valor general de cada alternativa.

Algunos de los criterios de evaluación utilizados en este estudio, corresponden al impacto de la constructibilidad, interrupción al servicio de ferrocarril, riesgos o contaminación que produce, impactos de la capa de agua y manejo de aguas pluviales.

Una vez elegida la propuesta más factible, se refinó aún más la alternativa, para ello se toma en cuenta los parámetros de diseño, el impacto del proyecto y los problemas de diseño, tales como: cierre de calles, impacto residencial, reconfiguración de estacionamientos, entre otros. Seguidamente, se realizó un estudio sobre los tipos de puentes que se podían construir y su respectivo costo, los cuales son: 1. Separación de viga de concreto pretensado simple, 2. Múltiples tramos de viga de concreto pretensado (Figura 22), 3. Viga de acero simple, 4. Tramo de viga con placa única. Por último, se analiza las fases de construcción, la duración total de la construcción y una estimación del costo.

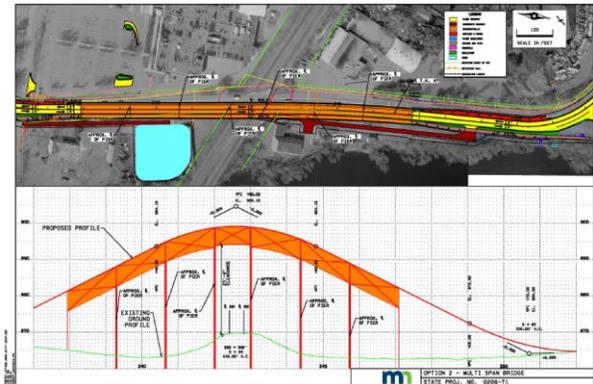


Figura 22. Metodología de construcción con múltiples de viga de concreto pretensado.
Fuente. MNDT, 2016.

Proyecto de desvío de Point Defiance-Evaluación del Concepto de Desnivelación

El WSDOT (2012) realiza una evaluación para examinar los costos, efectos y beneficios

potenciales de separar el tráfico de vehículos y trenes en cuatro ubicaciones a lo largo de la ruta de desvío de Point Defiance entre Tacoma y DuPont. El propósito del proyecto es proporcionar un servicio de tren de pasajeros interurbano de alta velocidad más frecuente y confiable entre Tacoma y Nisqually.

La metodología utilizada para llevar a cabo esta evaluación, consistió en realizar un estudio del área, como lo es las ubicaciones de las intersecciones y la respectiva creación de mapas, a partir de la información de LIDAR y GIS. Seguidamente, se establecieron las diferentes alternativas de intervención vial, como lo es desnivelar las vías del tren (Figura 23) o elevar las calles sobre las vías del tren (Figura 24), en las diferentes intersecciones.

El análisis potencial de los efectos se realizó a nivel conceptual para cada intersección y se muestran los impactos de llevar a cabo estos proyectos en aspectos como: uso de suelo (afectación a zonas comerciales y expropiaciones (Figura 25), transporte (accesos y parqueos), seguridad (niveles de servicio, reducción de accidentes), bicicletas, peatones y tránsito en general, construcción, ruido que se produzca, calidad visual, socioeconomía y justicia ambiental, servicios públicos, geología y suelos, recursos históricos y culturales; humedales, calidad del agua y llanuras de inundación, vegetación, calidad del aire, costo y efectos constructivos.



Figura 23. Concepto de elevación de las vías del ferrocarril en Berkeley Street SW. Fuente. WSDOT, 2012



Figura 24. Elevación de la calle en S. 56th Street, sobre las vías del tren. Fuente. WSDOT, 2012

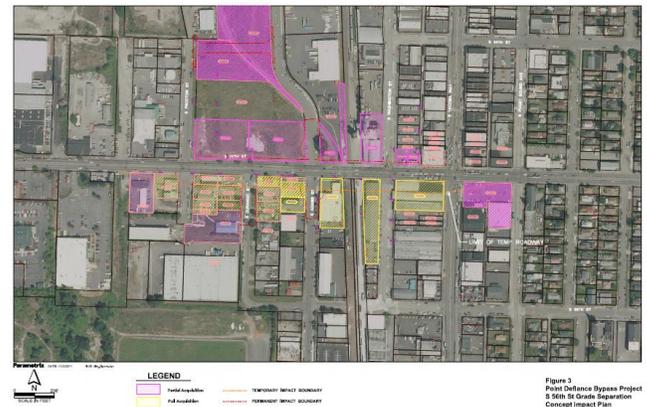


Figura 25. Impacto a nivel de expropiaciones del concepto de desnivelación de la calle en S. 56th Street. Fuente. WSDOT, 2012

Después de determinar los criterios de diseño de la calzada, se establecieron los conceptos de diseño preliminares para las alternativas de desnivelación en MicroStation e Inroads. El proceso de diseño incluyó la disposición de alineaciones horizontales, perfiles verticales (Figura 26), canalización, caminos temporales para mantener el tráfico durante la construcción, ubicaciones de puentes y muros de contención y modelado de movimientos de tierras. Los resultados de la huella del diseño preliminar se utilizaron para estimar los costos e impactos para la construcción y la adquisición del derecho de paso.

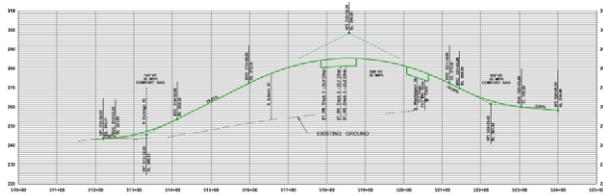


Figura 26. Ejemplo de perfil vertical para el concepto de elevación de la calle en S. 56th Street.
Fuente. WSDOT, 2012

Casos de estudio sobre sistemas constructivos para estructuras elevadas

Kenter, R (2010), lleva a cabo una revisión de literatura y estudio preliminar sobre la estructura elevada del metro en concreto, como parte de una tesis de maestría. Con el objetivo de establecer las dimensiones y las verificaciones estructurales de la estructura de metro elevada hecha de concreto convencional, concreto de alto rendimiento o polímeros reforzados con fibra y comparar estos diseños entre sí. En consecuencia, se muestra un resumen sobre la literatura estudiada, a nivel de sistemas constructivos.

Vancouver SkyTrain

El Vancouver SkyTrain es un sistema de tránsito rápido urbano en el área metropolitana de Vancouver, Columbia Británica, Canadá. Utiliza trenes completamente automatizados que se ejecutan principalmente en vías elevadas (de ahí el nombre).

La parte elevada del SkyTrain en Vancouver es un puente segmentario soportado en columnas. Las columnas se chorrean in situ (Figura 27) y tienen una altura de aproximadamente 12 metros. Las vigas ferroviarias están compuestas por vigas tipo cajón segmentadas de concreto prefabricado y están post-tensadas. La primera línea, fue construida utilizando grúas para levantar los segmentos prefabricados. Estas grúas eran tan grandes y pesadas que a veces dañaban las

calles en las que trabajaban. Para minimizar la interrupción del tráfico en el vecindario durante la construcción, se utilizaron grúas de instalación lateral tipo cerchas (Figura 28) para la construcción de las vigas ferroviarias de las Líneas Millennium y Canadá. Las vigas tipo cajón tienen una longitud aproximada de 37 metros (línea Millennium) y son compatibles con una o dos vías (Figura 29). La mayor parte del sistema utiliza doble vía y el conjunto está separado de otros modos de transporte.

Los cimientos que sostienen las columnas se crearon utilizando la tecnología de perforación pilotes. En las áreas donde era apropiado, se utilizaron cimientos de zapatas en lugar de pilotes perforados. La construcción de las Líneas Millennium y Canadá se llevó a cabo bajo estrictas reglas para proteger el medio ambiente. Los monitores funcionaron en todos los sitios de trabajo para garantizar que las medidas de protección fueran efectivas y se implementaran correctamente.

Donde la construcción se llevó a cabo cerca de arroyos, se tomaron medidas para asegurar que no ocurriera algún tipo de contaminación. Todas las áreas que fueron perturbadas durante la construcción fueron restauradas. Algunas áreas incluso fueron mejoradas como hábitat de aves, peces y vida silvestre.



Figura 27. Columnas chorreadas en el sitio.
Fuente. Kenter, 2010



Figura 28. Construcción de las vigas tipo cajón utilizando las grúas de instalación lateral, tipo cerchas.
Fuente. Kenter, 2010



Figura 29. Una viga ferroviaria de vía única.
Fuente. Kenter, 2010

Sistema de transporte público de Bangkok

La estructura ferroviaria elevada consiste principalmente, en un ferrocarril de 9 metros de ancho que soporta doble vía, fijado directamente a pedestales de concreto. Solo en la estación de intercambio Siam, las pistas se dividen, lo que da como resultado un viaducto más pequeño que admite una sola vía. Las vigas ferroviarias son vigas tipo cajón segmentadas de concreto prefabricado y se levantaron en su lugar mediante la grúa de instalación lateral tipo cercha. Se instalan tendones de pretensado, externos para conectar los segmentos (Figura 30). La vía elevada tiene un soporte de una sola columna y, cuando esto no era posible, se aplican las estructuras del marco del portal (Figura 31). La vía se eleva a 12 metros sobre el nivel de la calle. Las columnas de concreto se chorrean en sitio y la extensión de las vigas tipo cajón son de aproximadamente 30 a 35 metros. La cimentación está formada por pilotes perforados que alcanzan una profundidad de 50 metros. En algunas secciones, una pasarela peatonal está integrada con el sistema de metro elevado.

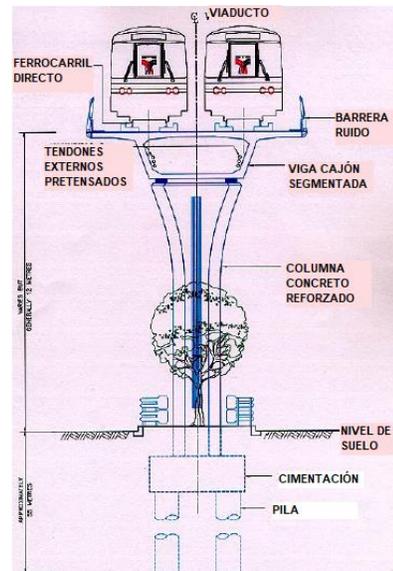


Figura 30. Sección transversal de la estructura del metro elevada.
Fuente. Kenter, 2010.



Figura 31. Estructura de concreto tipo marco, en lugar de una sola columna.
Fuente. Kenter, 2010

Nesselandelijj

El viaducto de Nesselandelijj es un puente de canal y se chorrea en sitio. Un puente de canal consiste en dos vigas paralelas con el piso en medio (Figura 32). Ambas vigas de soporte también sirven como conducto de cables, pasarela de emergencia y blindaje acústico. Mediante la integración de estas funciones, el viaducto se puede hacer muy delgado. La distancia de la columna es de 20 metros. Sin embargo, un tramo más pequeño no reduciría la profundidad de las vigas, ya que los pasillos de emergencia deberían tener la misma altura. Además, un tramo más pequeño aumentaría el número de columnas, lo que también aumenta el obstáculo visual del viaducto.

Las vías se fijan en el piso intermedio. El ferrocarril elevado está fundido en secciones de 60 metros y está reforzado con barras de acero (sin pretensado). Es soportado por tres filas de columnas y tiene en ambos extremos un voladizo. El grosor del piso y la profundidad de la viga de soporte no son constantes y se reducen hacia la mitad del tramo. Esto reduce el peso propio del ferrocarril y permite abarcar 20 metros en lugar de 12 metros. También crea una estructura más esbelta y estética. No era conveniente utilizar vigas transversales como soporte para los viaductos y, por lo tanto, las vigas de soporte estaban sobre las columnas. Las columnas verticales bajo un viaducto de doble vía conducen a un gran espacio debajo del ferrocarril y entre las columnas. Con dos viaductos de vía única, esto llevaría a cuatro columnas seguidas una

cerca de la otra. Por lo tanto, se eligió para colocar las columnas inclinadas, la columna en V (Figura 33). Esto reduce el espacio requerido en la superficie y da una percepción más espacial.

Las columnas en V están soportadas por una tapa de pila con cimientos de pila. Para la construcción del viaducto hicieron uso de faldones semi mecánicos temporales que se apoyaron en las tapas de los pilotes. En ese momento había algunos grandes proyectos de infraestructura en el mercado que hicieron subir los precios. Había una gran demanda de concreto prefabricado que lo hacía caro. Se decidió construir la estructura con concreto en sitio para ser independiente del concreto prefabricado y poder involucrar a más contratistas con la realización, todo orientado a ahorrar costos.

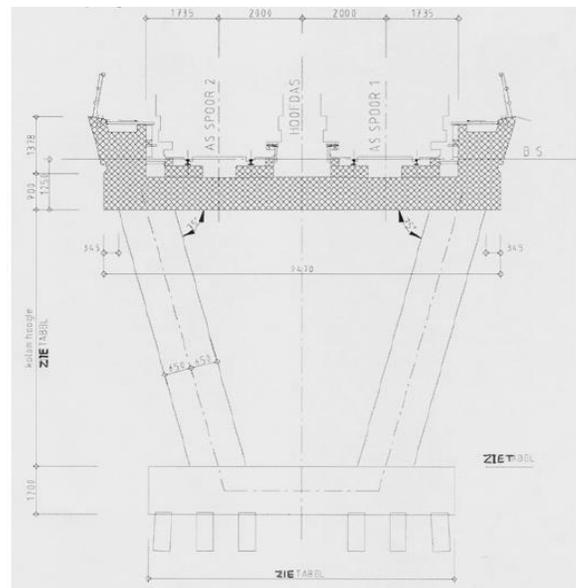


Figura 32. Sección transversal del viaducto de doble vía.
Fuente. Kenter, 2010



Figura 33. Refuerzo de las columnas en V.
Fuente. Kenter, 2010

Como parte de la tesis se realiza un estudio sobre los tipos de puentes que se pueden utilizar para elevar las vías del tren. La estructura de un ferrocarril elevado es similar a la de un puente, las obstrucciones ferroviarias son, por ejemplo, carreteras, edificios y ríos. Por lo tanto la elevación del ferrocarril permite a los metros conducir de forma rápida y segura sin obstáculos.

Una estructura de puente se puede dividir en una parte superior (la superestructura), que consiste en la cubierta, el sistema de piso y las vigas o vigas principales, y una parte inferior (la subestructura), que consta de pilotes, columnas, bases, entre otros. La superestructura proporciona tramos horizontales y transporta la carga de tráfico directamente. La subestructura soporta los tramos horizontales que se elevan sobre la superficie del suelo.

Para el tipo de estructura de un ferrocarril elevado hay muchas posibilidades. El tipo de puente generalmente está determinado por factores tales como cargas, características circundantes, propiedades del suelo, dimensiones del puente, estética, transporte de materiales de construcción, procedimientos de montaje, costo de construcción y tiempo de construcción. La elección para un tipo de puente es, por lo tanto, dependiente de muchos factores y, además, está relacionada integralmente con el material elegido. Los diferentes tipos de puentes tienen sus propias ventajas y desventajas. Estas cualidades juntas determinan el rango de espacio apropiado para un cierto tipo de puente. Las longitudes de tramo adecuadas para el tipo más común de puentes se muestran en el Cuadro 4.

CUADRO 4. RANGO DE TRAMOS PARA TIPOS DE PUENTES COMUNES

Tipo de Puente	Rango de tramo (m)
Viga de concreto pretensado	10-300
Viga tipo cajón	15-300
Arco de concreto	40-425

Fuente. Kenter, 2010

Los rangos de tramos dados en el Cuadro 4 son muy amplios y se superponen entre sí. Por lo tanto, esta tabla no proporciona información sobre qué tipo de puente debe elegirse. Para elegir el tipo de puente deseado, los tipos de puente más comunes se describen brevemente a continuación. Esto también resultará en una visión general más refinada del rango de espacio de los tipos de puentes. Junto con la información sobre los métodos de construcción y el mantenimiento, esto debería dar una mejor comprensión de los tipos de puentes y sus posibilidades.

Puentes en Concreto Reforzado

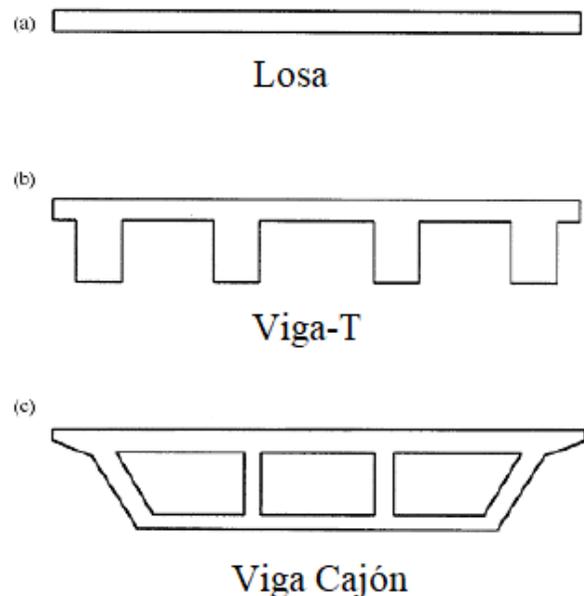


Figura 34. Secciones de concreto armado típicas en superestructuras de puentes: (a) losa maciza; b) viga en T; y (c) viga cajón.

Fuente. Kenter, 2010

Losa

Una losa de concreto armado es la superestructura de puente más económica para tramos de hasta aproximadamente 12 metros. Por lo general, requieren más acero de refuerzo y concreto estructural que puentes de viga del mismo tramo. Sin embargo, los detalles de diseño y los encofrados son más fáciles y menos costosos. La losa está limpia y tiene una apariencia agradable (Figura 34a). Los tramos comunes varían de 5 a 13 metros, con relaciones de separación estructural en un rango de 0.06 para tramos simples y 0.045 para tramos continuos.

Vigas en T

Las vigas en T son generalmente económicas para tramos de 12 a 18 metros (Figura 34b). Sin embargo, requieren un encofrado más complicado, especialmente para puentes inclinados. Las relaciones estructurales de separación en rango son 0.07 para intervalos simples y 0.065 para intervalos continuos. El espaciado de las vigas en un puente de vigas en T depende del ancho total del puente, del grosor de la losa y del costo del encofrado. Como regla general, el espaciado de las vigas en T se puede tomar como 1.5 veces la profundidad estructural. El espacio más utilizado es entre 1,8 y 3,1 metros.

Viga cajón chorreada en sitio

Las vigas cajón a menudo se utilizan para abarcar de 15 a 36 metros (Figura 34c). Su encofrado para estructuras inclinadas es más sencillo que el requerido para la viga en T. Debido al exceso de deflexión de la carga muerta, el uso de vigas de cajas de concreto reforzado para tramos simples de más de 30.5 metros puede resultar antieconómico. Las relaciones de separación en rango son 0.06 para tramos simples y 0.055 para tramos continuos con las vigas espaciadas a 1.5 veces la profundidad estructural. La alta resistencia a la torsión de la viga de la caja lo hace especialmente adecuado para alineaciones curvas.

Puentes en Concreto Pretensado

Losa

Las losas de concreto pretensado coladas en sitio y que usan materiales de alta resistencia son más caras que las losas de concreto reforzado. Sin embargo, una losa pretensada puede transportar cargas más grandes y / o abarcar distancias más grandes que una losa reforzada. Una losa pretensada prefabricada es económica cuando están involucrados muchos tramos (Figura 35). Los tramos comunes van desde 6 a 15 metros. Las relaciones estructurales de separación en intervalo son de 0.03 para intervalos simples y continuos.

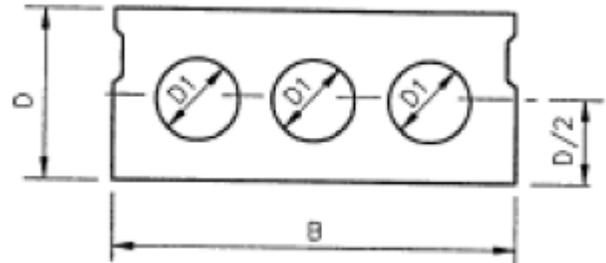


Figura 35. Sección prefabricada de losa hueca pretensada.
Fuente. Kenter, 2010

Viga prefabricada en I

Las vigas prefabricadas en I compiten con las vigas de acero y generalmente, cuestan más que las vigas de concreto reforzado con las mismas relaciones de profundidad a extensión (Figura 36). El encofrado para esta viga es complicado, especialmente, para estructuras inclinadas. Las vigas prefabricadas en I son económicas para tramos de 9 a 36 metros. Estas vigas están disponibles hasta una longitud de unos 50 metros. Las relaciones estructurales de separación en rango son 0.055 para intervalos simples y 0.05 para intervalos continuos.

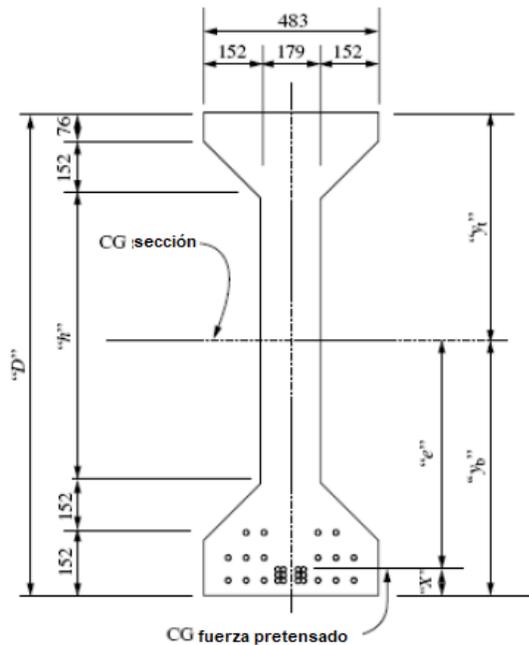


Figura 36. Sección prefabricada de viga en I
Fuente. Kenter, 2010

Viga tipo cajón

La forma de una viga cajón de concreto pretensado colada en sitio es similar a la viga cajón de concreto reforzada convencional. El espaciado de las vigas puede tomarse como el doble de la profundidad estructural. Las vigas cajón pretensadas pueden alcanzar vanos de 300 metros, pero se usan principalmente, para tramos de 30 a 183 metros. Una vez que el tramo se vuelve demasiado grande, la viga cajón se convierte en una viga segmentaria colada en sitio. La relación de la separación de la estructura es de 0.045 para los intervalos simples y 0.04 para los intervalos continuos. Las vigas cajón pretensadas prefabricadas están disponibles para tramos de hasta aproximadamente 50 metros (Figura 57).

Para vanos más grandes, varios elementos de viga cajón prefabricados están conectados entre sí mediante postensado. La selección entre colado en sitio y segmento prefabricado depende de las características del proyecto, las condiciones del sitio, las limitaciones ambientales y públicas, el tiempo de construcción y el equipo disponible. El Cuadro 5 enumera la gama de aplicaciones de algunos puentes de vigas de caja pretensados por

longitud de tramo. La alta resistencia a la torsión de la viga de la caja lo hace especialmente adecuado para alineaciones curvas.

CUADRO 5. RANGO DE APLICACIÓN DE ALGUNOS PUENTES DE VIGA CAJÓN PRETENSADOS POR LONGITUD DE TRAMO

Tipo de Puente	Rango de tramo (m)
Viga cajón post-tensada colada en sitio	30-91
Voladizo-equilibrado prefabricado, ancho constante	30-91
Voladizo-equilibrado prefabricado, ancho variable	61-183
Voladizo colado en sitio	61-305

Fuente. Kenter, 2010

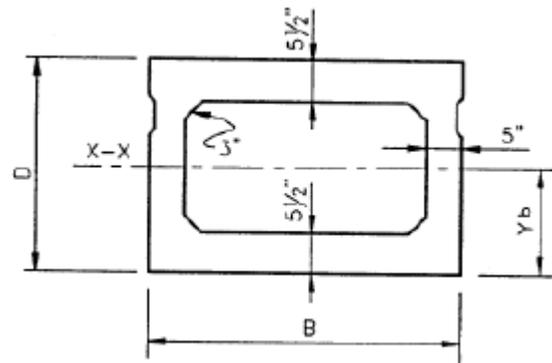


Figura 37. Ejemplo de viga tipo cajón pretensada.
Fuente. Kenter, 2010

Kenter, R (2010), menciona que existen diferentes métodos para construir un puente. La determinación del método de construcción y el tipo de puente requiere tener en cuenta la longitud del tramo requerido y las restricciones existentes del sitio.

Además, el cronograma de construcción, el equipo del contratista o el tamaño del proyecto también pueden ser factores determinantes para preferir un método sobre otro. Las ventajas y desventajas de los diversos enfoques deben analizarse al principio de la fase de diseño conceptual para determinar cuál es la mejor. Por lo tanto, a continuación se presenta un resumen de los distintos métodos.

Construcción en sitio

La construcción en sitio es un método en el que el concreto se vierte en el encofrado en el sitio de construcción. El concreto se entrega en camiones o se produce en el sitio. De esta manera no hay necesidad de transporte complicado de elementos de puente grandes y, al verter continuamente, se puede construir una gran estructura monolítica. Este método se usa comúnmente para puentes de corta duración y es rentable para la construcción de puentes de losa de concreto armado sólido. Es un método de construcción flexible que puede realizar formas geométricas inusuales. Un tramo se moldea en un vertido continuo y es comúnmente soportado por una estructura temporal estándar con encofrado.

Las estructuras temporales semi o totalmente mecánicas requerirá un contratista especializado. Tomará aproximadamente de 2 a 6 semanas construir un tramo con un sistema semi mecánico y de 1 a 2 semanas con un sistema totalmente mecánico.

Voladizo equilibrado

La construcción de un método de voladizo equilibrado comienza en las pilas del puente. Desde allí se vierten en el encofrado especial segmentos de colados en sitio de 3 a 5 metros de longitud. El encofrado se desplaza en tándem con cada segmento. De esta manera la estructura se mantiene en equilibrio (note el nombre de este método).

Los segmentos completados se utilizan como plataforma de montaje y base de inicio para los segmentos subsiguientes. La construcción continúa hasta que alcanza el punto medio del tramo donde se cerrará con el voladizo desde otra pila. El voladizo final se soporta temporalmente, para tener estabilidad antes de que se complete el voladizo final (Figura 38). Es un método flexible y eficiente que da poca perturbación a su entorno. Sin embargo, es un método de construcción relativamente lento. Mediante la utilización de segmentos prefabricados esta restricción puede mejorarse. Este método de construcción se elige cuando un puente tiene pocos tramos que van desde 50 a 250 metros.

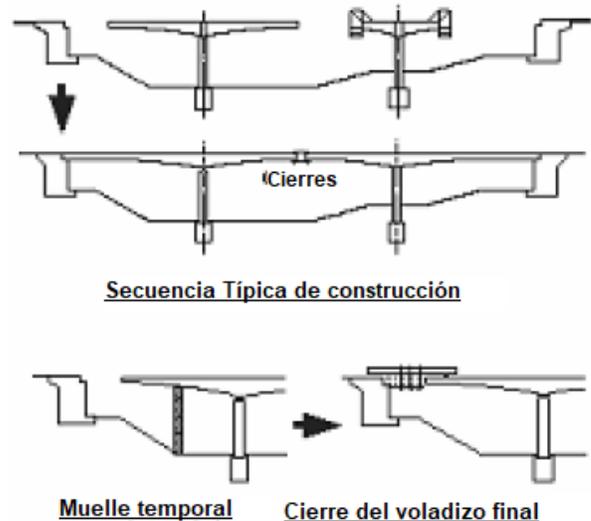


Figura 38. Método de voladizo equilibrado.
Fuente. Kenter, 2010

Construcción prefabricada

Cubiertas segmentarias prefabricadas

La construcción de la cubierta segmentada prefabricada se utiliza para puentes largos donde la profundidad de la cubierta es difícil para la construcción en sitio. Para este sistema generalmente se utilizan segmentos de viga cajón. Estos segmentos pueden tener una profundidad de 2 metros, una longitud de 2,5 a 4 metros y una cubierta de hasta 15 metros de ancho. Los segmentos están conectados ya sea por pretensado interno o externo. La construcción tiene un carácter repetitivo que puede ser muy eficiente en caso de un calendario ajustado. El método de voladizo equilibrado o libre sobre una pila es una opción preferida. Con este método, una grúa de instalación lateral tipo cerchas pueden colocar hasta seis segmentos por día. El número de intervalos construidos por semana para los segmentos pretensados internamente se considera uno y para los segmentos pretensados externamente es tres.

Construcción Tramo-por-Tramo

Tramo-por-tramo es una técnica de construcción relativamente nueva. Se considera el método de construcción más económico, y rápido disponible para puentes largos y viaductos con tramos individuales de hasta 60 metros. Este sistema hace uso de segmentos prefabricados que se colocan continuamente de un pilar a otro. Los segmentos pueden posicionarse mediante un sistema de mástil permanente o mediante un sistema de grúa de instalación lateral tipo cerchas. Este último es más común. La grúa de instalación lateral tipo cerchas con almohadillas deslizantes se apoya en dos pilares. Los segmentos son transportados por camión o barco al tramo en construcción. Cada segmento se coloca en almohadillas deslizantes y se desliza a su posición correcta. Una vez que todos los segmentos están en posición, los segmentos se conectan mediante pretensado longitudinal.

Finalmente, las juntas de la cubierta se moldean y se cierran y los conductos de pretensado se inyectan. Cuando se completa el tramo, la grúa de instalación lateral tipo cerchas se mueve al siguiente tramo en el que comienza nuevamente el ciclo de construcción hasta que se completa el puente.

Respecto al mantenimiento de este tipo de estructuras en la tesis de Kenter, R (2010), se explica que la vida útil de un puente es de unos 100 años. Durante la operación, el puente necesitará mantenimiento y ocasionalmente reemplazo. Cuatro áreas del puente cuya vida útil funcional es menor que la de la estructura del puente y, por lo tanto, requerirán reemplazo en alguna etapa son: superficies, impermeabilización, juntas de movimiento y rodamientos. En general, los rodamientos y las juntas de movimiento deben reemplazarse al menos una vez durante la vida útil del puente. Por lo tanto, es importante diseñar el puente de manera que se pueda inspeccionar y mantener adecuadamente. La inspección se puede hacer usando provisiones de acceso permanentes o temporales. Las disposiciones de acceso permanente deben incorporarse en la estructura del puente y son caras. Más común es la inspección utilizando una plataforma hidráulica.

Esto es aplicable hasta una altura limitada. Si esto no es posible, la inspección se

puede hacer usando cuerdas de rappel. Sin embargo, esto requiere mucho tiempo, pero aún puede ser mucho más económico que una disposición de acceso permanente. Desde un punto de vista económico, un ferrocarril de metro elevado en tierra probablemente, será inspeccionado con plataformas hidráulicas.

Cuando la elevación es demasiado grande, se debe aplicar una solución alternativa. Para reemplazar una parte del puente, es mejor tener una estructura que se pueda desmontar fácilmente. Se recomienda no usar medias juntas, ya que son difíciles de inspeccionar y mantener, y el postensado externo debe diseñarse para permitir la inspección y las pruebas sin restricciones de tráfico.

Ventajas/Desventajas de señalización activa/pasiva vs desnivelación

Con base en lo anterior, los Cuadro 6, 7 y 8 muestran un resumen de ventajas y desventajas que presenta cada una de las soluciones propuestas. Esto facilitará la selección de la solución más factible a desarrollar en el futuro, cuando el TRP inicie su operación.

CUADRO 6. FACTIBILIDAD DE LA SEÑALIZACIÓN ACTIVA/PASIVA	
Ventajas	Desventajas
Costo capital bajo en comparación a las alternativas de intervenciones viales propuestas.	Costo de mantenimiento y operación (mano de obra especializada), aunado a la administración del sistema.
Compatible con la señalización utilizada, actualmente.	Impacto en el tiempo de traslado vehicular y peatonal (se generan colas)
No se altera la dinámica en general del sitio.	Aunque se aumenta la seguridad, se producen accidentes que dañan la infraestructura y la vida humana.
Rápida implementación de los dispositivos activos y pasivos.	Se producen fallos en el sistema que ocasionan molestias y atrasos a los usuarios.
No afecta el paisajismo, como ocurre con una intervención vial.	-
Es compatible con la infraestructura actual y los derechos de vía.	-
No es necesario realizar expropiaciones de ningún tipo.	-
Los costos de mantenimiento son menores, respecto a una infraestructura desnivelada.	-
Mejora la seguridad en los cruces de manera considerable.	-
Con la implementación de los dispositivos se interrumpe parcialmente el flujo vehicular y por poco tiempo.	-

Fuente. Elaboración propia.

CUADRO 7. FACTIBILIDAD DE LA DESNIVELACIÓN DE LA RED VIAL	
Ventajas	Desventajas
Se eliminan las colas y demoras en los cruces, por la separación de las líneas férreas y viales.	Implica expropiaciones, inhabilitaciones de accesos a muchas propiedades y la desconfiguración de gran parte de la red vial, de Paraíso.
Se descarta la posibilidad de accidentes con el tren, debido a la separación de las líneas férreas con el eje vial.	Afectación considerable al paisajismo.
-	En caso de la desnivelación subterránea existe la amenaza potencial de inundación en la estructura.
-	Costo elevado debido a los muros de contención y la estructura de puentes.
-	Afectación en general de la dinámica en el sector de análisis.
-	La construcción de alguna desnivelación de la red vial, implica la interrupción en todos los sentidos.
-	La topografía no permite la construcción de este tipo de infraestructuras en el sentido Norte-Sur.

Fuente. Elaboración propia.

CUADRO 8. FACTIBILIDAD DE LA DESNIVELACIÓN DE LAS LÍNEAS FÉRREAS	
Ventajas	Desventajas
Se eliminan las colas y demoras en los cruces, por la separación de las líneas férreas y viales.	Inhabilitaciones de accesos y parqueos a ciertas propiedades.
Se descarta la posibilidad de accidentes con el tren, debido a la separación de las líneas férreas con el eje vial.	Afectación considerable al paisajismo, con ambos conceptos propuestos.
No es necesario realizar expropiaciones.	La construcción de alguna desnivelación de la red vial, implica la interrupción en todos los sentidos.
No implica la desconfiguración de la red vial de en sitio de estudio.	Este tipo de intervención tiene un costo elevado.
No se afecta la dinámica en general del área en análisis.	Implicaría el cierre de los cruces involucrados únicamente.
La topografía permite la construcción de este tipo de infraestructuras en el sentido Oeste-Este.	-
No existen problemas de drenaje, al ser estructuras elevadas	-
Respecto al concepto con sistema de vigas y columnas, tiene un menor costo y mayor facilidad constructiva (modular)	-
Esta solución es compatible con la establecida por el EIV	-

Fuente. Elaboración propia.

Metodología

El proyecto propuesto se desarrolló basándose en análisis de campo e investigación relacionada al tema, con la finalidad de brindar las soluciones más factibles para los seis cruces que se generan entre la trayectoria del tren eléctrico de INCOFER y la trama vial existente en el cantón de Paraíso.

OE1: Identificar los cruces existentes entre la trama vial Norte-Sur con el eje ferroviario, en Paraíso, y someterlos a análisis.

Definición de los cruces a estudiar

El primer paso para la investigación fue conocer los cruces a estudiar, para ello se realizó una reunión, el 12 de febrero de 2019, con el encargado del Departamento de Topografía y Geodesia de la Municipalidad de Paraíso, el cual indica los seis cruces que son de interés para este gobierno local (Figura 39). Esto con el fin de localizar geográficamente los cruces para posteriormente investigar y hacer visitas de campo.

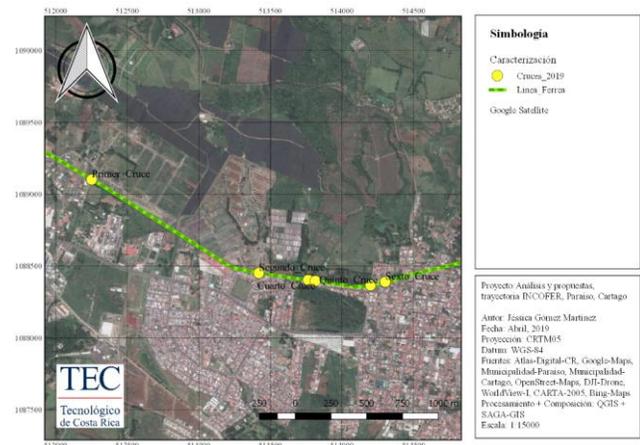


Figura 39. Propuesta de cruces a estudiar en el cantón Central de Paraíso (Anexo 2).

Fuente. Elaboración propia, QGIS.

Seguidamente, se llevó a cabo el estudio de la información existente de la zona en análisis, facilitada por el profesor guía y por el gobierno local. Dicho material consiste en informes técnicos, tesis sobre la rehabilitación del tren, capas de información espacial, entre otros. El análisis de esta información permitió identificar el estado de la cuestión o tema y el avance actual del mismo. Para localizar geográficamente los cruces a estudiar, se utilizó el software QGIS. Este software es un Sistema de Información Geográfica de Código Abierto licenciado bajo GNU, que permite ver y sobreponer datos vectoriales y raster en diferentes formatos, componer mapas y explorar datos espaciales, crear, editar, administrar y exportar capas vectoriales y raster en diversos formatos, analizar datos, entre otras funciones (QGIS.ORG, 2019).

Al mismo tiempo, se utilizó este software para elaborar los mapas necesarios de acuerdo a la metodología mostrada en la Figura 40. Estos mapas tienen como objetivo presentar la información espacial relevante de acuerdo a

necesidades específicas de visualización, ubicación y análisis de forma dinámica según corresponda. Dichos mapas se generan con estándares tales que permiten su exportación digital en alta resolución e impresión física a escala. De la misma manera, estos productos pueden ser modificados o actualizados.

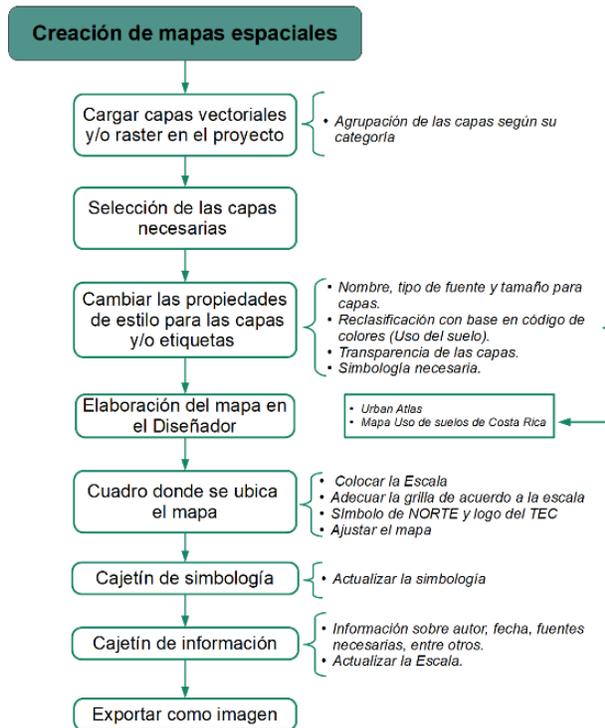


Figura 40. Diagrama de flujo sobre la metodología utilizada en la elaboración de mapas espaciales (Anexo 1). Fuente. Elaboración propia, Libre Office.

Estado físico de la infraestructura vial y férrea

Con el objeto de caracterizar la condición física de la infraestructura férrea y vial en el presente, se realizaron visitas de campo donde se tomaron fotografías a nivel de superficie. Asimismo, mediante una visita de campo realizada el 14 de febrero de 2019, con el Ingeniero Sergio Arriola de la Escuela de Ingeniería Electrónica del TEC, se ejecutó un levantamiento de los seis cruces involucrados mediante el uso de Sistemas Aéreos no Tripulados (unmanned aerial systems UAS). Para ello, se utilizó un UAS comercial marca DJI, modelo Phantom 3 Professional, el cual posee

abordo un sensor de imagen pasivo RGB, marca SONY, modelo EXMOR-IMX117 de tecnología CMOS.

El sistema de proyección cartográfica utilizado corresponde al Costa Rica Transversal de Mercator (CRTM05). Para la referencia vertical de los puntos se tienen en cuenta las diferencias verticales de los puntos o elevaciones elipsoidales sobre el sistema GPS obtenidas de los ajustes de observaciones sobre el elipsoide WGS-84. A las elevaciones elipsoidales se les aplicó el modelo regional de ondulación CARIB-97, obteniendo así las elevaciones ortométricas.

En cuanto a la generación orto-imágenes, se seleccionó un total de 8 imágenes georeferenciadas las cuales fueron recolectadas a partir un solo vuelo fotogramétrico todos configurado a una altura promedio de 35 m, con un ISO de 200 y velocidad de obturación de 1/2500 s.

Posteriormente, se procedió a ortorectificar las imágenes mediante el uso del software ILWIS-GIS utilizando una proyección transformal basada de Puntos de Control de Terreno (Ground Control Points GCPs) extraídos de las imágenes PRUGAM del año 2005. Finalmente las orto-imágenes fueron exportadas a formato ráster GeoTIFF e importadas en QGIS para su procesamiento final.

Por otra parte, se tomó como referencia la tesis denominada “*Diagnóstico Técnico y Análisis de Costos para la Rehabilitación de la Red Ferroviaria en la Sección Cartago-Páez-Yas*” (Pérez, et al., 2012) y estudio sobre las intersecciones en Paraíso elaborado por INCOFER (Gerencia de Proyectos INCOFER, 2018), con el objeto de identificar aspectos técnicos sobre los diferentes componentes de los puentes y la vía férrea. De esta forma, se determina el estado actual de la infraestructura existente.

Uso del suelo

Haciendo uso de QGIS, se realizó el análisis histórico del Uso de Suelo, donde se lleva a cabo una comparación de la información espacial de uso de suelo del actual Plan Regular de Paraíso y la propuesta del nuevo plan que se analiza actualmente en el seno del gobierno local y la Federación de Municipalidades de Cartago. El actual Plan Regulador, publicado en octubre del

2012 (Municipalidad de Paraíso, 2012) se basó fundamentalmente, en los estudios de zonificación y uso del suelo identificados y caracterizados por PRUGAM (2008). Al mismo tiempo, PRUGAM utilizó imágenes aéreas orto-rectificadas de la compañía BLOM (2009). Una vez procesadas, tales imágenes produjeron un mosaico con resolución espacial de 0.25X0.25 m referidas al sistema CRTM05. En consecuencia, el Uso del Suelo y la zonificación del Cantón de Paraíso estipuladas en el Plan Regulador, obedecen a dichas imágenes, tomadas entre los años 2004 y 2005. De esta forma se logró tener información sobre los cambios que ha sufrido la zona de estudio y permite una mejor caracterización de la misma.

Características de los suelos

Con el propósito de identificar las características de los suelos presentes en los cruces de interés, se utilizó el sistema de información global de suelo SoilGrids (Hengl, et al., 2014). Este sistema, con una resolución espacial 1x1 km contiene predicciones espaciales raster para ciertas propiedades del suelo a seis diferentes profundidades; pH, porcentaje de limos, arena y arcilla, densidad aparente, porcentaje de fragmentos gruesos, capacidad de intercambio catiónico, entre otras propiedades. Los resultados que se obtienen mediante este sistema se basan en modelos de predicción espacial global que se ajustan por variable de suelo, utilizando una recopilación de las principales bases de datos internacionales de perfiles de suelos (aproximadamente 110 000 perfiles) y una selección 75 co-variables ambientales globales (índices climáticos y de biomasa) que representan factores de formación del suelo.

En consecuencia, se ubicó el punto de cada cruce en los mapas espaciales de SoilGrids para un perfil de profundidad de suelo de 1 m. Posteriormente, se seleccionaron las celdas relevantes para ser luego transferidos a QGIS; en el cual se extrajeron los parámetros deseados en los seis cruces de estudio. Lo anterior con el propósito de contar con una composición aproximada del suelo, proponiendo a su vez una caracterización física más detallada para cada cruce de ser posible, lo cual va más allá de los alcances de este proyecto.

Caracterización del flujo vehicular

Con el fin de obtener los valores de las mayores intensidades vehiculares que se presentan en la actualidad en los cruces 5 y 6 del cantón de Paraíso, se procedió a llevar a cabo un conteo vehicular manual en las horas pico, a saber, de 6:00 a 8:00 am y de 5:00 a 7:00 pm los días 18 y 19 de febrero de 2019. Para ello, se recopilaban los datos en una plantilla donde se dividen por franjas horarias y de acuerdo a una clasificación vehicular (Anexo 6). Seguidamente, se realizó la suma de la cantidad total de vehículos en cada cruce y se dividió entre las horas de conteo (2 horas), para finalmente estimar las intensidades matutinas y vespertinas. En este caso, se realizó el conteo una única vez en cada cruce.

De forma alternativa, y por recomendación del Arq. Carlos Ugalde Hernández, se propuso un análisis basado en la similitud que existe entre los Usos de Suelo de sectores clave del cantón Central de Cartago y que pudieran reflejar características similares en los cruces bajo estudio en el sector de Paraíso. Dicho análisis de similitud, pretende comparar sectores análogos de los cruces de Paraíso en relación con sus contrapartes de Cartago. Con ello se busca obtener proyecciones vehiculares más confiables sobre el crecimiento urbano futuro que se pueda presentar en el sector de Paraíso. Lo anterior, se fundamentó en información espacial proveniente de los mapas de Uso de Suelo y el Plan Vial actual del cantón Central de Cartago contra la propuesta de Uso de Suelo del cantón de Paraíso actualmente en discusión. Seguidamente, fue necesaria la normalización y estandarización de las diversas clases de Uso de Suelo los Planes involucrados. Esto debido a que existen diferencias en la nomenclatura, descripción, significado, presentación y simbología de las clases de Uso de Suelo (Copernicus "Urban Atlas", 2012; Mata, et al., 2013).

En el planteamiento de opciones comparativas por similitud para los cruces desde el 1 hasta el 4, los cuales son directamente afectados por zonas residenciales en desarrollo, se propusieron dos hipótesis de investigación (Figura 41).

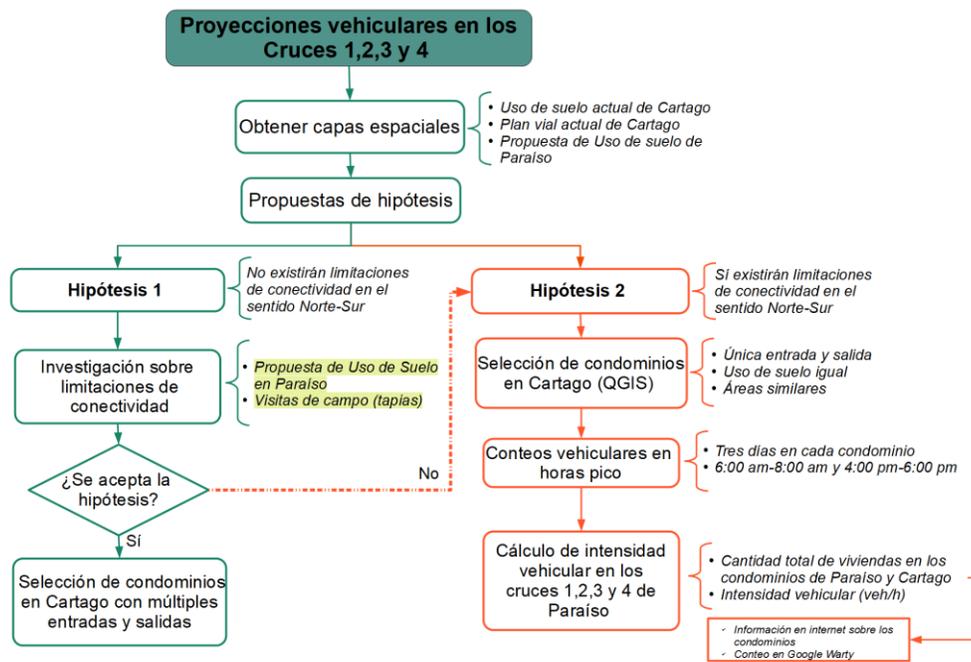


Figura 41. Diagrama de flujo sobre la metodología utilizada para la estimación de proyecciones vehiculares entre el Condominio Albacete y la urbanización Hacienda El Rey de Cartago y el Residencial Los Lagos y el Condominio Arrabarará de Paraíso (Anexo 1). Fuente. Elaboración propia, Libre Office.

La primera hipótesis estipula que no existirán limitaciones de conectividad/continuidad del flujo vehicular en el sentido Norte-Sur de tales cruces, es decir, que las urbanizaciones que actualmente se encuentran perimetralmente cerradas dejarían de serlo en un futuro. Por ende, se realizaría una caracterización de zonas residenciales seleccionadas en el cantón de Cartago que resulten análogas a las clases de Uso de Suelo de las urbanizaciones en Paraíso y que a su vez presenten múltiples accesos.

La segunda hipótesis, dictamina que existirán limitaciones de movilidad vehicular en el sentido Norte-Sur, infiriendo que las urbanizaciones que actualmente se encuentran perimetralmente cerradas se mantendrán igual en el futuro y con un único acceso, por lo que la selección de zonas residenciales análogas en el cantón de Cartago debería obedecer a criterios y características similares.

Para la segunda hipótesis, se seleccionaron dos zonas residenciales análogas en Cartago; el Condominio Albacete y la urbanización Hacienda El Rey (Figura 42), las cuales presentan respectivamente atributos de Uso de Suelo y áreas similares (Figura 43 y 44)

al Residencial Los Lagos y el Condominio Arrabarará de Paraíso (Figura 45), todas caracterizadas por un único acceso.

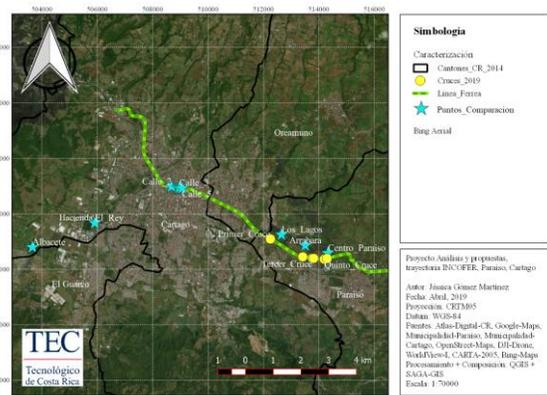


Figura 42. Ubicación espacial del Condominio Albacete y la urbanización Hacienda El Rey, en Cartago; y Residencial Los Lagos y el Condominio Arrabarará, de Paraíso (Anexo 2). Fuente. Fuente. Elaboración propia, QGIS.

Posteriormente, se llevaron a cabo conteos vehiculares manuales los días 18, 19 y 20 de marzo de 2019 en el Condominio Albacete. Para la urbanización Hacienda El Rey, dichos conteos se realizaron los días 21, 22 y 25 de mayo de 2019. Todos los datos se recopilieron en la

misma plantilla utilizada para los conteos en los cruces de Paraíso (Anexo 6).

Con ello, se logró determinar cuál es la cantidad total de vehículos que transita en el horario matutino y vespertino a lo largo de los días seleccionados para estas zonas residenciales. Posteriormente, se obtuvo la Intensidad en las horas pico para la mañana y la tarde, de las cuales se eligió la mayor de ellas y la que resulta predominante de los tres días. Lo anterior, debido a que esto representa la máxima cantidad de vehículos por zonas residencial.

Para determinar el TPDA se aplicó el concepto de la treintava hora, para la cual se divide la intensidad de la hora pico entre 10% (Medina, 2019; SIECA, 2011), lo que significa que la intensidad resultante de los conteos corresponde al 10% del TPDA.

Paralelamente, en lo que respecta a la proyección vehicular de los cruces 1 y 2 de Paraíso, se cuantificó la cantidad máxima de viviendas que se construirán en el Residencial Los Lagos (380 lotes residenciales) y el Condominio Arrabarará (724 lotes residenciales) una vez desarrollados por completo (Rono Bienes Raíces, 2016; 7DG, 2017). De la misma forma, para el Condominio Albacete y la urbanización Hacienda El Rey, se realizó un conteo manual de las viviendas existentes, basado en las imágenes de Google-Earth más actualizadas (GOOGLE, 2018), que corresponde a 162 viviendas y 491 viviendas, respectivamente; evidenciando estas un desarrollo casi total del terreno.

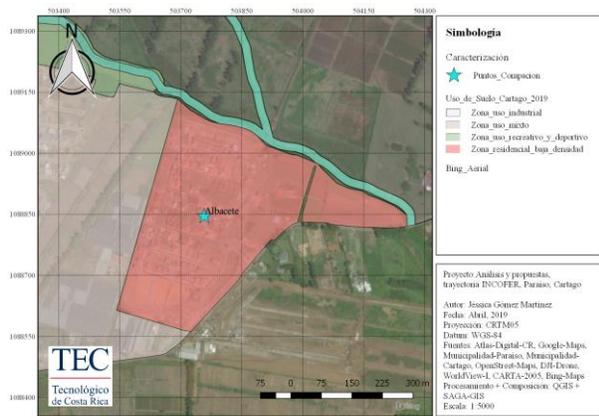


Figura 43. Uso de Suelo del Condominio Albacete, ubicado en Cartago (Anexo 2).
Fuente. Fuente. Elaboración propia, QGIS.

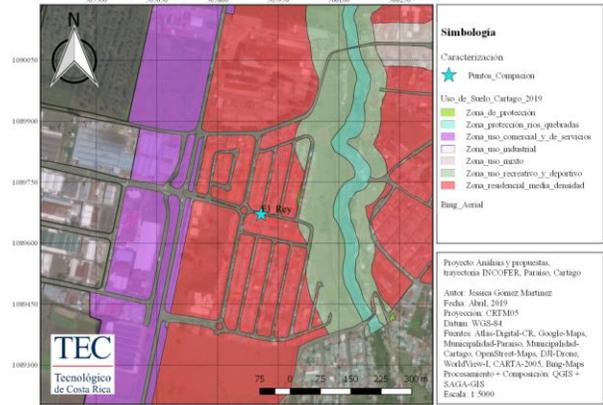


Figura 44. Uso de Suelo del Condominio El Rey, ubicado en Cartago (Anexo 2).
Fuente. Fuente. Elaboración propia, QGIS

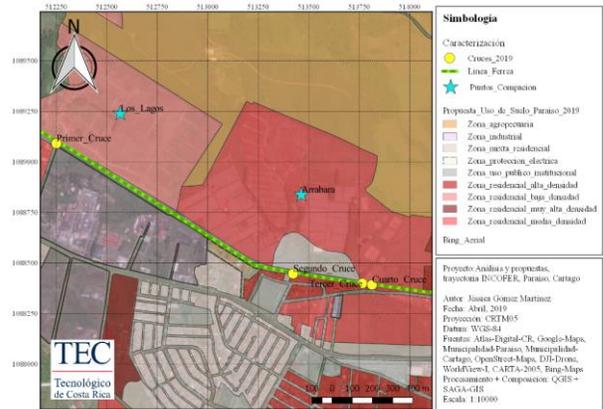


Figura 45. Uso de Suelo del Condominio Los Lagos y Arrabarará, ubicado en Paraíso (Anexo 2).
Fuente. Fuente. Elaboración propia, QGIS.

Finalmente, se llevó a cabo una estimación proporcional (regla de tres) entre las actuales viviendas de las zonas residenciales de Cartago (con su correspondiente intensidad vehicular) respecto de la cantidad total de viviendas que se espera existan en el Residencial Los Lagos y el Condominio Arrabarará una vez desarrollados totalmente.

De esta manera, se obtuvo la proyección vehicular para los cruces 1 y 2. Además, con este mismo procedimiento se logra estimar el volumen vehicular futuro para los cruces 3 y 4; donde actualmente existen una finca y una casa habitación de forma respectiva.

En cuanto a la proyección de flujo vehicular en los cruces 5 y 6, se aplicaron tres metodologías distintas (Figura 49) con el objetivo de tener diversas opciones que permitiesen a su vez, una mejor estimación de los mismos, dado que las

soluciones sobre los cruces ferroviarios dependen en gran medida de tales estimaciones.

La primera metodología consiste en comparar los cruces 5 y 6 de Paraíso (Figura 46) con cruces análogos del sector central de Cartago, para lo cual fueron seleccionadas tres intersecciones que cumplen con características similares, siendo estas los cruces de las Calles 2, 3 y 5 que intersectan la vía férrea Cartago-Paraíso (Figura 47). Posteriormente, se realizaron los conteos vehiculares manuales en las horas pico, es decir, de 6:00 a 8:00 am y de 4:00 a 6:00 pm, los días 26, 27 y 28 de marzo del 2019 en cruce de la Calle 2 y 3. Para el cruce de la calle 5, los conteos se efectuaron los días 1, 2 y 3 de abril. De estas intensidades vehiculares se eligieron las dos mayores, para ser utilizadas como proyecciones vehiculares futuras de los cruces 5 y 6 de Paraíso.

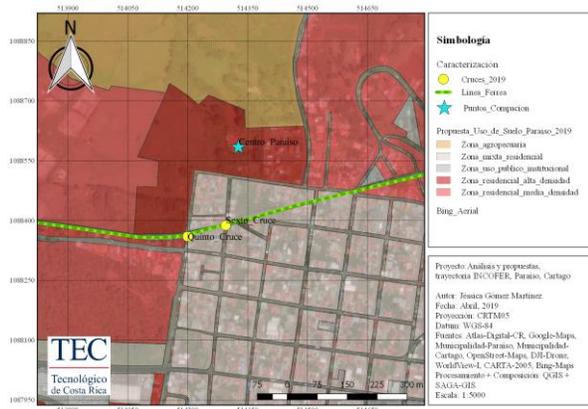


Figura 46. Uso de suelo en los cruces 5 y 6, ubicados en el centro de Paraíso (Anexo 2). Fuente. Fuente. Elaboración propia, QGIS.

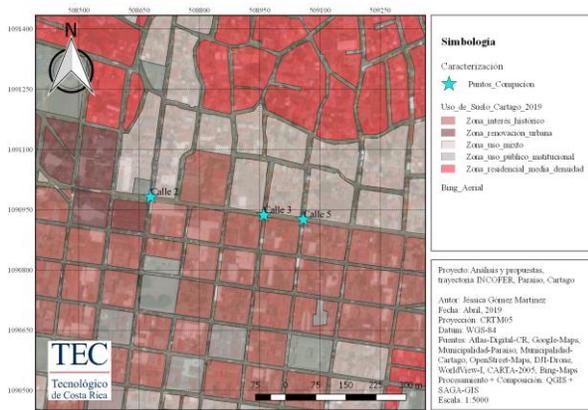


Figura 47. Uso de suelo en los cruces de Calle 2, 3 y 5, ubicados en el centro de Paraíso (Anexo 2). Fuente. Fuente. Elaboración propia, QGIS.

La segunda metodología, se basó en supuestos de crecimiento poblacional. Para ello, se tomó el valor de la población total de los distritos Carmen (Norte) y Oriental (Sur) de Cartago (Figura 48) para el año 2011 (INEC, 2011), los cuales abarcan espacialmente los cruces de las Calles 2, 3 y 5, para posteriormente proyectarlos al año 2050.

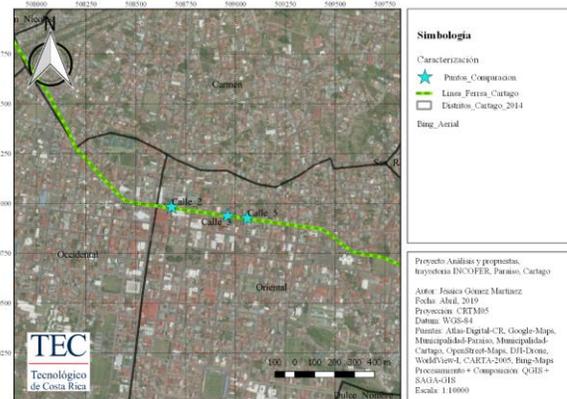


Figura 48. Distritos que abarcan espacialmente los cruces de la Calle 2,3 y 5, en Cartago (Anexo 2). Fuente. Elaboración propia, QGIS.

Con base en el documento “Estimaciones y Proyecciones de Población por sexo y edad de 1950-2050” (INEC, 2013), se determinó el cociente de crecimiento poblacional anual. Partiendo de la estimación del 2011 para la población en estos distritos y del cociente de crecimiento a nivel nacional, se obtiene la proyección para cada distrito desde el año 2011 hasta el año 2050.

Seguidamente, para determinar el valor de la población por cruce, se dividió el valor total de la población por distrito entre cada cruce. Conociendo los valores de población actual (2019), la población futura (2050) y la intensidad actual (2019) en cada cruce de Cartago, se procedió a estimar la intensidad vehicular de los cruces 5 y 6 de Paraíso para el 2050 mediante una estimación proporcional (regla de tres).

En la tercera metodología se utilizaron las estaciones de conteos de TPDA que posee el MOPT en diferentes carreteras nacionales del país (MOPT, 2019). Para ello, se identificó la estación de conteo más cercana a los cruces de las Calles 2, 3 y 5 en Cartago y se realizó la respectiva proyección de este valor al presente año. Lo anterior se llevó a cabo aplicando la fórmula establecida por la AASHTO y con el

factor de crecimiento vehicular para la estación elegida, el cual se obtuvo del Anuario de Información de Tránsito 2015 (PPEMSIT, 2016).

Al conocer el TPDA actual en los cruces de Cartago, se determina el porcentaje que representa este TPDA respecto al TPDA de la estación más cercana al 2019. Posteriormente, este porcentaje se multiplica por el valor de TPDA al 2019 (actualizado de la misma forma que el

anterior) de la estación más cercana a los cruces 5 y 6 de Paraíso. Con el resultado anterior, se aplicó nuevamente la fórmula de proyección vehicular a los años 2026 y 2050, estableciéndose las intensidades vehiculares y TPDA correspondientes.

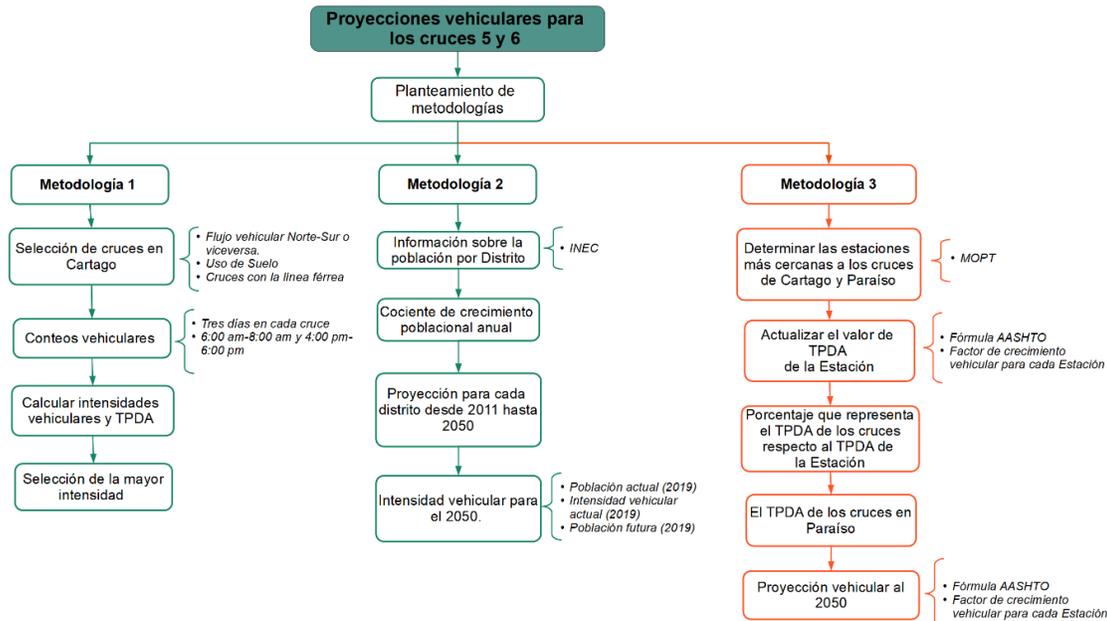


Figura 49. Diagrama de flujo de las metodologías utilizadas para las proyecciones vehiculares en los cruces 5 y 6 de Paraíso (Anexo 1).

Fuente. Elaboración propia, Libre Office.

Distancias de visibilidad (DVs)

Como parte de la caracterización de los cruces y basados en los códigos pertinentes (WSDOT, 2013), se determinaron las distancias de visibilidad de parada (DVs), las cuales representan (i) la distancia de visibilidad cuando se está avanzando hacia el cruce a lo largo de la vía (dh) y (ii) la distancia a la cual se encuentra la señal del ALTO (D) respectiva (Figura 5). Se utilizó la velocidad del TRP y la velocidad del vehículo de diseño.

Posteriormente, y sobre las imágenes georeferenciadas de Google Earth, se procedió a elaborar mapas espaciales a escala, orientados a reflejar las DVs en cada cruce mediante la aplicación de herramientas combinadas de los softwares QGIS y AutoDESK.

A manera de procedimiento, se importaron en AutoDESK mapas elaborados en QGIS, se escalaron y se procedió a dibujar la infraestructura correspondiente (líneas del tren, derechos de vía existente). Además, de esquematizar las respectivas cotas. Con esto, se logra visualizar con mayor claridad la obstrucción de visibilidad que existe en los seis cruces bajo análisis, y de esta forma determinar la solución más factible y segura para los cruces.

Microsimulación de las condiciones de tránsito

Con el propósito de simular el impacto futuro que la entrada en operación del tren rápido tendría sobre la dinámica vehicular de la red vial ligada a todos los cruces bajo análisis en el sector de Paraíso, se procedió a realizar una microsimulación considerando dos alternativas de software, cada una de ellas con sus respectivas virtudes y desventajas.

Como primera opción, se consideró SUMO, (Simulation for Urban Mobility) que es un sistema microscópico de simulación de flujo de tráfico desarrollado por el Centro Aeroespacial Alemán (DLR). El sistema permite la simulación de varios tipos de vehículos, varias intersecciones con o sin señales de tráfico, para redes con un número de enlaces que pueden exceder los 10,000. Además, SUMO incluye procedimientos para la asignación dinámica de tráfico y una aplicación gráfica que proporciona visualización gráfica 2D de la simulación de tráfico (Maciejewski, 2010).

Por otro lado, SUMO como software de código abierto, permite a los programadores ver, analizar y modificar el código, lo que facilita una integración más controlada con el software externo. Sin embargo, se requiere de conocimientos avanzados en el área de programación para su uso, lo cual dificultaría la construcción de las simulaciones propuestas para este proyecto, dado que la curva de aprendizaje del mismo tomaría más tiempo del permisible (SUMO, 2015).

Como segunda opción, se consideró el software PTV-VISSIM, la cual es una herramienta de simulación a nivel microscópico situación de tráfico y que ha sido utilizado ampliamente para analizar situaciones de tránsito complejas a nivel mundial, incluyendo interacción con sistemas ferroviarios y de control logístico (Hunter, et al., 2006). PTV-VISSIM es especialmente útil para evaluar diferentes escenarios de gestión de tráfico y a su vez elegir la mejor alternativa y las medidas de optimización antes de la implementación real (Lin, et al., 2013). Este software permite valorar el impacto de la implementación prioritaria del transporte público o de un sistema de semaforización en las intersecciones. Con PTV-VISSIM se pueden generar resultados numéricos detallados y animaciones en 3D que representan los diversos escenarios (PTV GROUP, 2019).

Por lo mencionado anteriormente y por su facilidad de uso, se seleccionó PTV-VISSIM

como herramienta para analizar el impacto sobre el flujo vehicular de las soluciones a los cruces ferroviarios propuestos. En este caso, se utilizó la versión-estudiantil, que presenta diversas limitaciones de uso, entre ellas, el hecho que únicamente se autoriza un máximo de 1000 m de extensión de red y que permite una duración máxima de 600 segundos, lo cual limita considerablemente el análisis de los resultados más allá de esa ventana temporal. La metodología general desarrollada para el uso del software PTV-VISSIM en el presente proyecto se muestra en el diagrama de flujo correspondiente (Figura 50).

En la misma línea, la red vial que se construyó sobre los mapas de OpenStreetMap (OpenStreetMap contributors, 2017) cuyos servidores son accedidos directamente mediante la GUI de PTV-VISSIM. Lo anterior corresponde (i) a las calles que se conectan con los cruces ferroviarios desde el 1 hasta el 6, en Paraíso y (ii) los derechos de vía que existen. Asimismo, se establecieron las áreas de conflicto en las intersecciones viales-férreas, las cuales permiten dar paso prioritario al transporte público, en este caso el TRP.

Respecto a los parámetros de entrada, se utilizó una velocidad de 25 km/h para los vehículos y 40 km/h como velocidad promedio del TRP. Los datos recopilados durante los conteos vehiculares en los cruces de Cartago y la tercera metodología aplicada para obtener las intensidades vehiculares descrita anteriormente, se utilizaron para suministrar el flujo vehicular en el cruce 5 y 6 (Figura 39). Mientras que los conteos realizados en los condominios de Cartago y su respectiva metodología para determinar las intensidades, también descrita con anterioridad, se usaron para alimentar el flujo vehicular en los cruces 1, 2, 3 y 4 (Figura 39).

Seguidamente, se llevó a cabo la simulación para dos proyecciones diferentes, (i) cuando el tren rápido inicie su funcionamiento en el año 2026 y (ii) al año 2050, con los respectivos volúmenes vehiculares obtenidos según el año de proyección. Además, para el año 2026 y 2050 se simuló dos conceptos de solución, que corresponden (i) la señalización activa-pasiva y (ii) la desnivelación de las líneas férreas.

En cuanto a la programación de los semáforos se usaron ciclos de 300 segundos, debido a que se espera que el tren rápido transite

con una frecuencia de 5 minutos en ambos sentidos. Para ello se colocaron dos semáforos para cada tren, programados de acuerdo al paso del mismo en cada cruce. La duración de los semáforos en rojo consta de 70 segundos para el cruce 1 que se conforma únicamente por semáforos y señalización pasiva. Mientras que para el cruce 2, 5 y 6 se utilizaron semáforos con una duración en rojo de 80 segundos (Figura 39). Estas duraciones se tomaron con base al tiempo que tarda el sistema de seguridad activo (agujas o semáforos), que funcionan actualmente en nuestro país (Bravo, 2018).

Finalmente, a lo interno del sistema, se trazaron polígonos de influencia por nodo de interés, alrededor de los cruces en análisis y se solicitó al software que mostrara los resultados respectivos (Figura 50). Sin embargo, se tomaron solamente los resultados necesarios para apreciar la variación en el comportamiento del flujo vehicular, con relación a los dos conceptos de solución antes mencionados. Cabe recalcar que las simulaciones se corrieron durante 600 segundos, ya que la ser una versión estudiantil es el tiempo máximo que se permite.

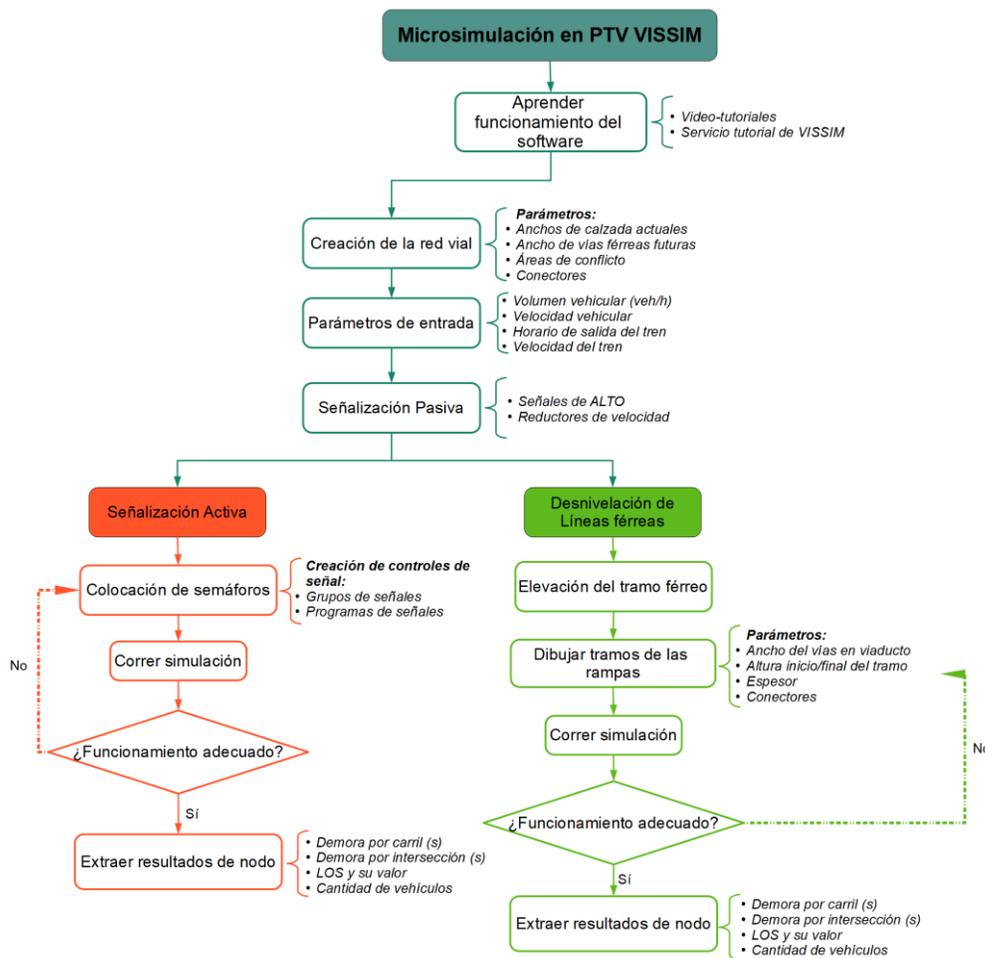


Figura 50. Diagrama de flujo de la metodología utilizada para la microsimulación en PTV VISSIM (Anexo 1). Fuente: Elaboración propia, Libre Office.

OE2: Desarrollar diferentes soluciones a los cruces entre el sector Norte-Sur con el eje ferroviario, en Paraíso, así como su respectiva evaluación.

Señalización Activa/Pasiva

Para proponer la señalización en los cruces bajo estudio fue necesario llevar a cabo una investigación a través de códigos (USDT, 2002; USDT, 2007), manuales (SIECA, 2000; WSDOT, 2013; AASHTO, 2004; SIECA, 2011) y visitas de campo guiadas (Conrado, 2019) que permitiesen conocer aspectos necesarios sobre el tema, tales como: (i) tipos de señalización a nivel horizontal y vertical (ii) la metodología para elegir la señalización que corresponde según el cruce (iii) distancias relacionadas a la colocación de los tipos de señalización y (iv) funcionamiento de la señalización activa en el país (Figura 51). Para este último aspecto se contactó al director de la empresa FAPCOM, encargada de instalar la señalización activa en la GAM. Esta compañía de origen español, se dedica a la instalación y mantenimiento de todo tipo de redes de telecomunicaciones en distintos campos.

Una vez obtenida la información necesaria y estimada las DVs para los seis cruces, se procedió a seleccionar el tipo de señalización activa/pasiva, la cual obedece a diversos criterios como lo es (i) volumen vehicular (ii) nivel de visibilidad (iii) LOS (iv) costo y (v) aspectos generales del cruce. Posteriormente, se importaron en AUTODESK los mapas espaciales elaborados con las ortoimágenes (capturadas por el UAS), se escalaron y se ilustró la respectiva señalización para cada cruce. Lo anterior, con la finalidad de visualizar con mayor claridad la señalización activa/pasiva que se propone en los seis cruces bajo estudio.

Finalmente, se realiza una estimación de costos con base en información a nivel macro brindada por el director de FAPCOM (Nadal, 2019) y estimaciones publicados por el Departamento de Transporte de Estados Unidos (USDT, 2003). Con esto, se logra tener una noción del coste general de la señalización activa/pasiva.

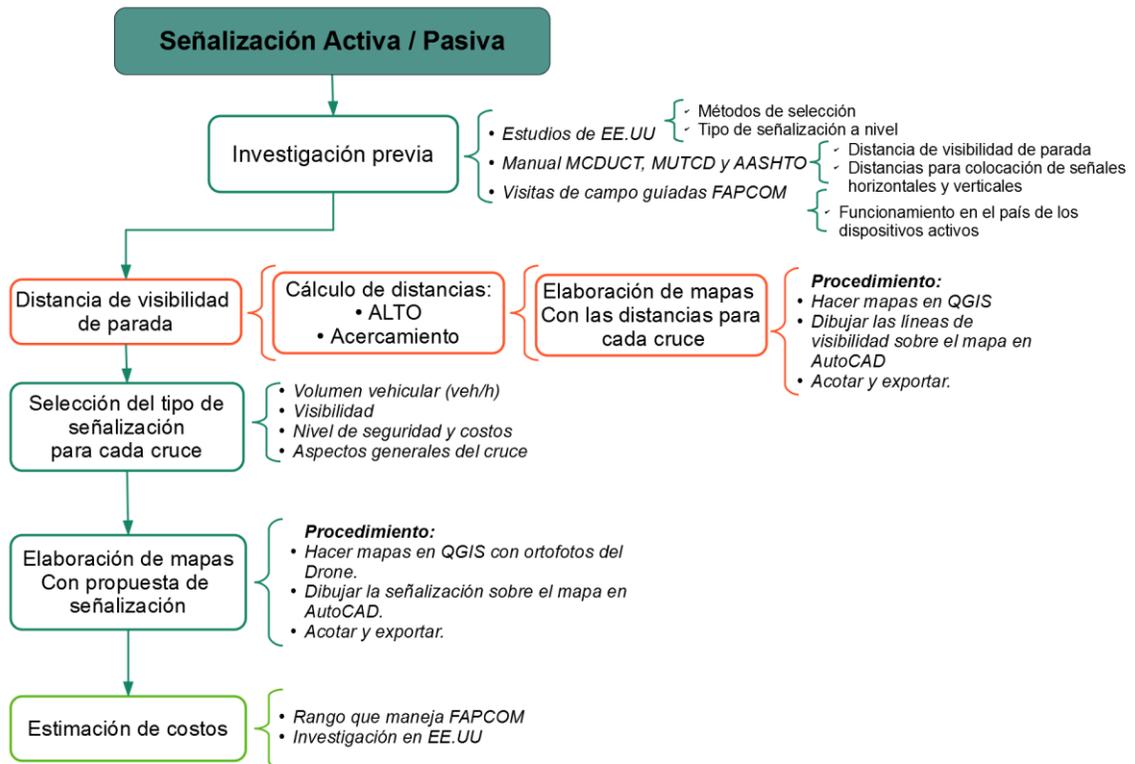


Figura 51. Diagrama de flujo de la metodología utilizada para determinar la señalización activa/pasiva, en los seis cruces de Paraíso (Anexo 1).
Fuente. Elaboración propia.

Conceptos de intervenciones viales

Como parte del análisis conceptual para las intervenciones viales, se llevó a cabo un estudio de casos para determinar la metodología a seguir y los conceptos a proponer (MNDT, 2016; WSDOT, 2012; Kenter, 2010). Seguidamente, se eligieron los cruces de Paraíso con mayor problemática a nivel vial y que pudieran requerir este tipo de intervención en el futuro, basándose en el volumen vehicular LOS e importancia de los mismos.

Posteriormente, se proponen dos tipos de intervenciones, cada uno a su vez con dos conceptos de análisis (Figura 52). Para determinar la factibilidad de estos conceptos, se realizó (i) un análisis topográfico, (ii) una identificación de los posibles terrenos a ser

Expropiados, y (iii) la consideración del impacto general de la intervención vial. Lo anterior, con el objetivo de definir el concepto que implica un menor impacto y proponerlo como posible solución en caso de ser necesario.

En lo que se refiere al estudio topográfico y la subsiguiente generación de perfiles longitudinales, se utilizó una nube vectorial de puntos de alta densidad (XYZ) georeferenciada al sistema de referencia CRTM05, derivada a partir de imágenes estereoscópicas tomadas por la constelación de satélites WorldView I y II en el año 2011 y procesadas por Méndez (2016) para la zona en estudio. Dicha nube de puntos tiene una incertidumbre de 0.5x0.5 m y que va de la mano con la calidad de los puntos de control de

terreno (GCPs) que se utilizaron en ese momento, así como la resolución espacial misma de las imágenes satelitales crudas. También, debe reconocerse que al tratarse de un producto de carácter óptico (sensor pasivo), muchos de los puntos pueden caer sobre obstáculos que no necesariamente representan la elevación del terreno (copas de árboles, techos de edificaciones, etc.), por lo que lejos de utilizar todos los puntos disponibles de la nube, se procedió a discretizar cuáles de ellos eran

representativos del área inmediata a la línea férrea (Figura 53).

Una vez seleccionada el tipo de intervención vial más factible para el área en estudio, se llevó a cabo un análisis conceptual más detallado de los impactos que podrían ocasionar la construcción de los conceptos propuestos. Lo anterior, permitió tomar la decisión de cual concepto representa la mejor opción para separar las vías del tren de la red vial, en el tramo bajo estudio.

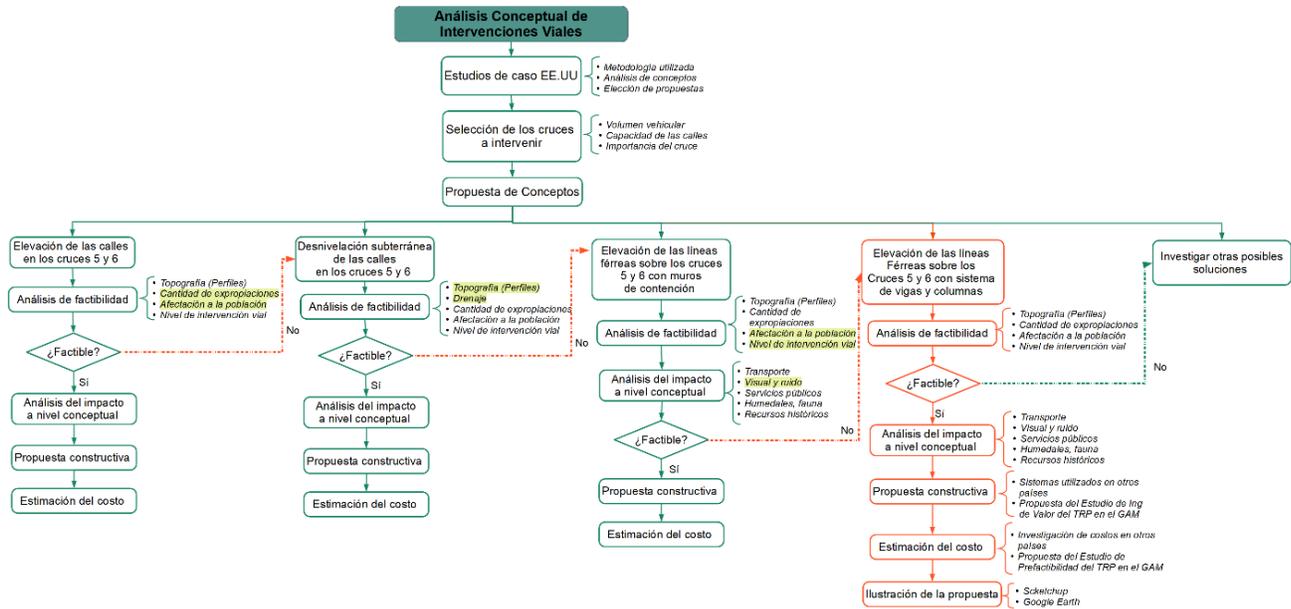


Figura 52. Diagrama de flujo de la metodología utilizada para realizar el análisis conceptual de las intervenciones viales, en los cruces 5 y 6 de Paraíso (Anexo 1).

Fuente. Elaboración propia, Libre Office.

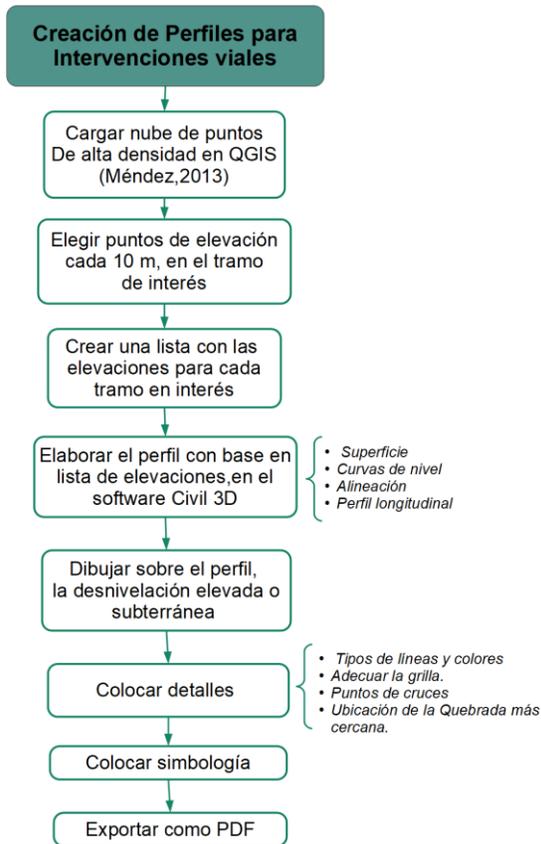


Figura 53. Diagrama de flujo de la metodología utilizada para realizar los perfiles longitudinales de las propuestas de intervenciones viales, en los cruces 5 y 6 de Paraíso (Anexo 1).

Fuente. Elaboración propia, Libre Office.

OE3: Proponer las soluciones más factibles para los cruces ferroviarios de Paraíso, con base en el producto del OE2.

Opción viable para la desnivelación

En cuanto a la propuesta de solución, se llevó a cabo un estudio de diferentes sistemas constructivos que se han utilizado en otros países para casos similares (Kenter, 2010; Mondorf, 2013; He, et al., 2011, Endicott, 2007; Shanmuga, 2018), así como el sistema que se propone en el EIVTRPGAM (IDOM, 2018). De forma tal, que se tiene conocimiento sobre las ventajas y desventajas entre un sistema constructivo y otro. Con esto, se seleccionó el sistema constructivo que más se adecua a las condiciones que se presentan en el área de análisis y el que se adecua al contexto nacional (Figura 54). Posteriormente, se investigó las metodologías constructivas que se han utilizado en otros países para este tipo de intervenciones. De forma tal, que permitiese elegir el método más práctico, económico y que se ajuste al contexto del país.

Además, para tener una estimación general del costo aproximado para el concepto propuesto como solución, se realizó una investigación sobre los costos por km de proyectos constructivos similares que existen en el mundo (L.C.R. Logística S.A, 2017; Flyvbjerg, et al., 2008; Hoback, 2008; Kerr, et al., 2010). Con esto se logra tener una idea aproximada sobre el costo que representa una intervención vial de este tipo. Lo anterior, se debe a que no se cuenta con un diseño estructural y demás, para estimar con mayor detalle el coste de la propuesta, debido a que va más allá de los alcances de este proyecto.

Por último, se elaboró un modelo 3D de forma esquemática en el software SketchUp Pro, el cual se exportó a Google Earth. Este software permite realizar diseños en 3D de alta calidad basado en caras. Además es utilizado para entornos de ingeniería civil, arquitectura, GIS, entre otros. (SketchUp, 2019). Con esto, se logró tener mayor claridad sobre la dimensión de este tipo de intervención y el impacto general que ocasionaría en el sitio de estudio. Cabe destacar, que no se cuenta con dimensiones ni detalles específicos de diseño para la propuesta factible, puesto que se requieren estudios detallados que no se encuentran en los alcances de este proyecto.



Figura 54. Diagrama de flujo de la metodología utilizada para determinar la propuesta factible para la desnivelación en los cruces 5 y 6 de Paraíso (Anexo 1).
Fuente. Elaboración propia, Libre Office.

Resultados

Caracterización del área de estudio

Definición de los cruces a estudiar

Con base en las consultas realizadas a los técnicos de la Municipalidad de Paraíso, conocedores del sistema vial y ferroviario de su cantón, se definieron como prioritarios seis cruces ferroviarios a lo largo del eje establecido dentro del territorio administrado por este gobierno local (Cuadro 9, Figura 55a). Estos cruces están distribuidos, en sentido Este-Oeste,

desde la última Estación de Paraíso (sexto cruce) hasta la entrada principal del Residencial Los Lagos (primer cruce), con una longitud total aproximada de 2240 m. No obstante, ninguno de los 6 cruces contemplados intersecta directamente la Ruta-10 Cartago-Paraíso. Además, la Municipalidad de Paraíso, definió como zona de interés un perímetro de amortiguamiento (zona buffer) de 400 m de circunferencia a lo largo de la proyección del eje ferroviario contemplado entre los cruces 1 y 6 (Figura 55a).

CUADRO 9. UBICACIÓN CRTM05 DE LOS SEIS CRUCES BAJO ESTUDIO, DEFINIDOS POR INCOFER Y LA MUNICIPALIDAD DE PARAÍSO.			
Cruce	X_CRTM05	Y_CRTM05	Z_MSNM
Primer Cruce	512250.57	1089091.86	1391.73
Segundo Cruce	513422.30	1088447.74	1384.85
Tercer Cruce	513765.45	1088400.28	1367.34
Cuarto Cruce	513813.15	1088393.31	1369.04
Quinto Cruce	514199.55	1088360.14	1354.45
Sexto Cruce	514294.96	1088387.91	1353.21

Fuente. Elaboración propia, QGIS.

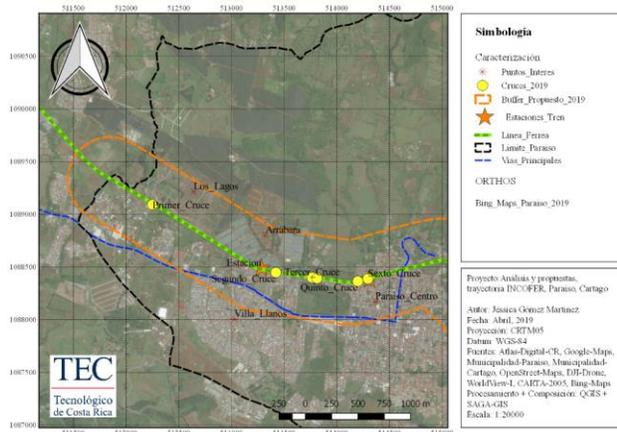


Figura 55a. Ubicación de los cruces-ferroviarios definidos por INCOFER para la Municipalidad de Paraiso (Anexo 2). Fuente. Elaboración propia, QGIS.



Figura 57a. Derecho de vía férreo con material de relleno, cruce 4 vista hacia Este. Fuente. Elaboración propia.

Estado físico de la infraestructura vial y férrea

Durante las visitas de campo realizadas en los cruces bajo estudio, se obtienen fotografías a nivel de superficie, que evidencian el estado actual del derecho vía ferroviario (Figura 56 y 57a), es decir, que únicamente se encuentra el derecho de vía ferroviario con material de relleno. Además, el estado de la infraestructura ferroviaria existente, como lo son ciertos puentes, presentan alto nivel de corrosión (Figura 58).



Figura 56. Quinto cruce ubicado en Calle 12, vista hacia el Oeste. Fuente. Elaboración propia.



Figura 58. Estructura de acero del puente ubicado sobre Quebrada Pollo. Fuente. Elaboración propia.

Asimismo, se obtienen las ortoimágenes como parte del levantamiento realizado con un UAS, el cual se llevó a cabo en los seis cruces como parte de la caracterización del área de estudio (Figura 59, 60, 61a, 62, 63 y 64). Por otra parte, se miden los derechos de vía de las calles que corresponden a: 8 m, 10 m, 4 m, 2.2 m, 4.2 m y 4.95 m, desde el cruce 1 hasta el cruce 6, respectivamente. Lo anterior, implica que se requiere una alta inversión para la reconstrucción adecuada de todos los cruces. De la misma forma, que en caso de una desnivelación es necesario expropiar el área cercana a los cruces, debido a que su derecho de vía es limitado.



Figura 59. Primer cruce ferroviario ubicado frente al Residencial Los Lagos, en Paraíso (Anexo 2). Fuente. Elaboración propia, QGIS.



Figura 62. Cuarto cruce ferroviario ubicado frente al acceso de vivienda, en Paraíso (Anexo 2). Fuente. Elaboración propia, QGIS.



Figura 60. Segundo cruce ferroviario ubicado frente al Condominio Arrabará, en Paraíso (Anexo 2). Fuente. Elaboración propia, QGIS.



Figura 63. Quinto cruce ferroviario ubicado en Calle 12, 100 al Oeste de la última Estación del tren, en Paraíso (Anexo 2). Fuente. Elaboración propia, QGIS.

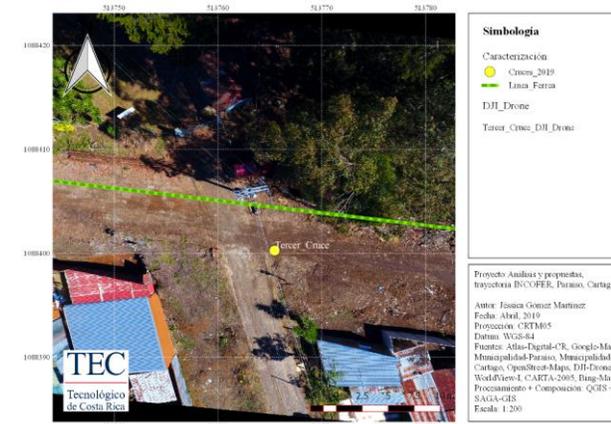


Figura 61a. Tercer cruce ferroviario ubicado frente al acceso de finca privada, en Paraíso (Anexo 2). Fuente. Elaboración propia, QGIS.



Figura 64. Sexto cruce ferroviario ubicado en Calle 10, al Oeste de la última Estación del tren, en Paraíso (Anexo 2). Fuente. Elaboración propia, QGIS.

Uso de suelo

La Figura 65 muestra el mosaico de la zona en estudio, basado en imágenes aéreas tomadas entre los años 2004 y 2005 (BIOM), del cual se derivan tanto las curvas de nivel de toda la GAM a 10 m (Figura 66a) como los mapas de Uso de Suelo para esa época (Figura 67a) y la Zonificación del Cantón de Paraíso estipuladas posteriormente en el Plan Regulador que fue publicado en el 2012.

Tales curvas de nivel indican que la pendiente natural del terreno decrece en el sentido de las líneas férreas (Noroste-Sureste), siendo una evidencia de que se favorece una desnivelación del eje ferroviario en el sentido Oeste-Este.

Por otra parte, la Figura 65 muestra la ausencia de residencias cercanas al cruce 1 y 2 y se encontraba en un Uso de Suelo de Baja y Muy Baja Densidad (Figura 67a), situación que en el futuro cambiará con el desarrollo urbano que se está presentando en la zona.

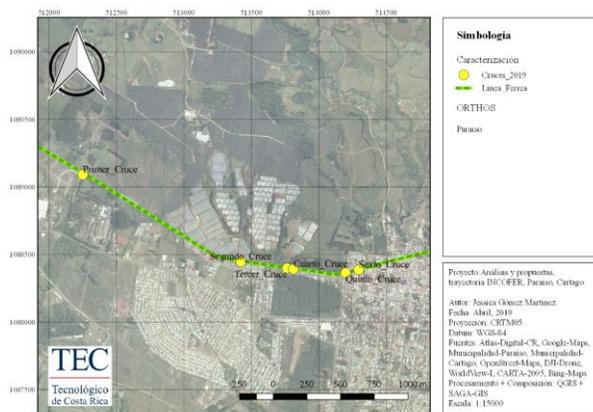


Figura 65. Orto-imagen del cantón central de Paraíso del año 2005 utilizada por PRUGAM (Anexo 2). Fuente. Elaboración propia, QGIS.

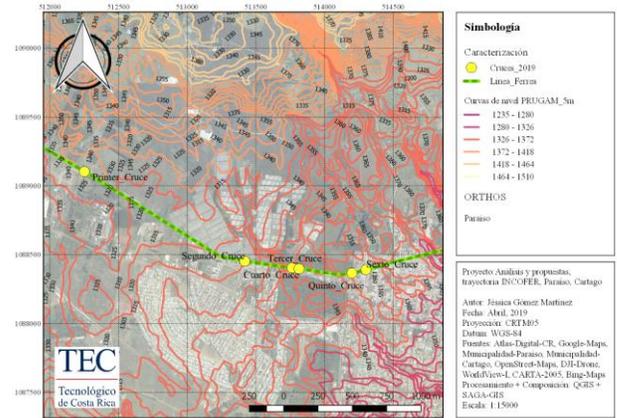


Figura 66a. Curvas de nivel para el cantón de Paraíso, PRUGAM 2012 (Anexo 2). Fuente. Elaboración propia, QGIS.

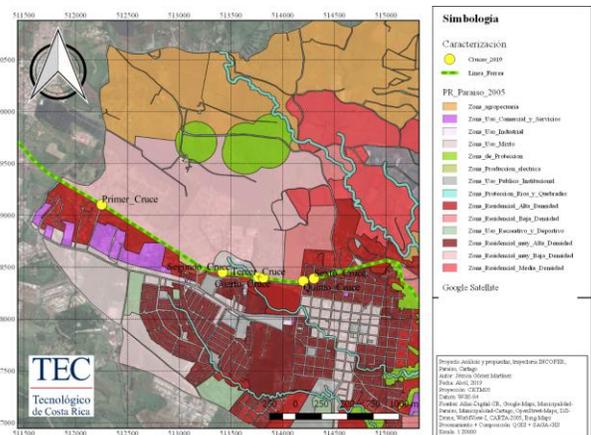


Figura 67a. Mapa de Uso de Suelo en el cantón de Paraíso, según Plan Regulador de 2012 (Anexo 2). Fuente. Elaboración propia, QGIS.

Al mismo tiempo y a manera de comparación, se muestran las imágenes satelitales Google más recientes de esta área de estudio (Figura 68), con el fin de establecer los cambios que ha experimentado el Uso del Suelo entre los años 2004 y 2019. Estos cambios se pueden apreciar en la propuesta actual de Uso de Suelo para el nuevo Plan Regulador del cantón de Paraíso (Figura 69a); los cuales muestran el crecimiento poblacional que se presentará en el futuro para las zonas aledañas a los cruces bajo estudio. Por lo tanto, se requiere de un análisis y proyección vehicular que tome en cuenta las condiciones futuras a modo de brindar las soluciones más factibles para el momento que el TRAM entre en funcionamiento.

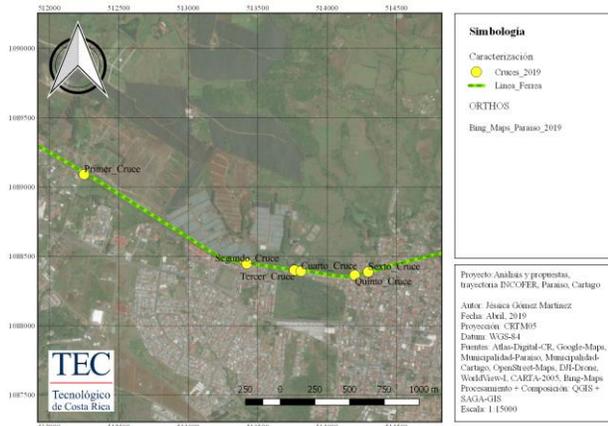


Figura 68. Orto-imagen del cambio en el Cantón Central de Paraíso del año 2019 (Anexo 2). Fuente. Elaboración propia, QGIS.

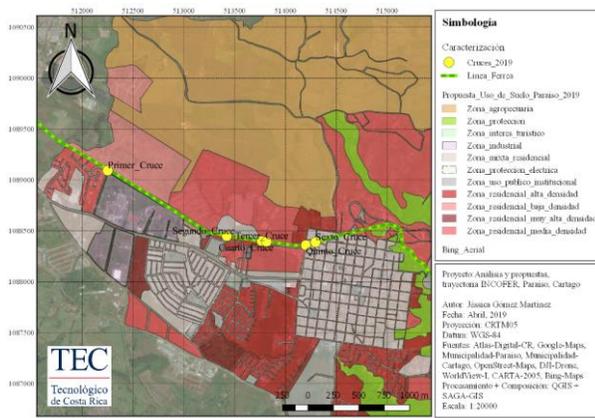


Figura 69a. Propuesta de Uso de Suelo en el cantón de Paraíso, 2019 (Anexo 2). Fuente. Elaboración propia, QGIS.

Características de los Suelos

Con base en el sistema de información global de suelos SoilGrids se logran determinar las características de composición del suelo en los puntos de estudio.

Para los seis cruces ferroviarios se obtienen los datos a 1 m de profundidad y con píxeles de 250x250 m, de la densidad aparente (Figura 70), el porcentaje de arcilla, limos, arenas y gruesos, que se presentan en el Cuadro 10. El componente que se presenta en mayor cantidad es la arcilla, siendo esto un indicador que el suelo tiene un comportamiento distinto en presencia de agua y por ello se requiere un estudio geotécnico

detallado de los seis cruces, de forma tal que se prevengan situaciones de riesgo sobre todo en caso de llevar a cabo una desnivelación entre las líneas férreas y la red vial. Cabe destacar, que los porcentajes mostrados en el Cuadro 10 son una aproximación, que pueden ser útiles a modo de referencia general.

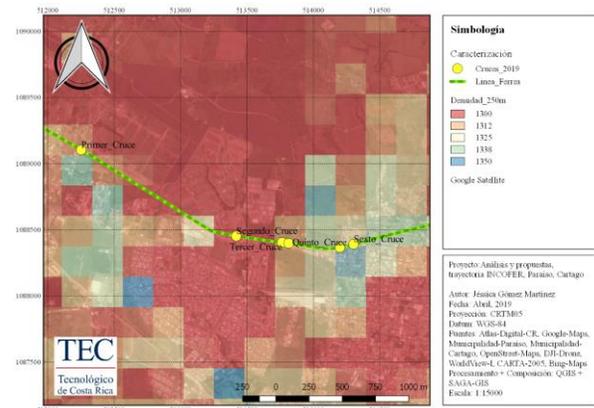


Figura 70. Mapa espacial para determinar la Densidad aparente a 1 m de profundidad (Anexo 2). Fuente. Elaboración propia, QGIS.

CUADRO 10. CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS, PARA LOS CRUCES DE PARAÍSO.					
Cruce	Porcentaje de características del suelo				
	Densidad (kg/m³)	% Limos	% Arcilla	% Arena	% Gruesos
1	1308	31	44	25	5
2	1258	27	34	39	12
3	1310	31	42	27	7
4	1310	31	42	27	7
5	1344	29	37	33	6
6	1322	34	39	27	5

Fuente. Elaboración propia.

Caracterización del flujo vehicular

En el Cuadro 11 y 12 se presentan los conteos vehiculares, intensidades y TPDA realizados en el Condominio Albacete y El Rey en Cartago, durante tres días. Estos resultados son de utilidad para caracterizar de forma análoga las proyecciones a futuro del volumen vehicular en los cruces 1, 2, 3 y 4, de Paraíso (Cuadro 13a). Estas proyecciones futuras son un indicador del tipo de señalización activa/pasiva necesaria para los cuatro cruces, es decir, para el cruce 1 es necesario colocar señalización activa debido a que se tendrá un flujo relativamente elevado. Mientras que para el cruce 2, se considera necesario colocar señalización activa/pasiva completa porque el flujo será elevado (Cuadro

13a). Caso contrario para los cruces 3 y 4 en donde se proyecta un flujo vehicular bajo, por lo que sería necesario únicamente la señalización pasiva.

CUADRO 11. CONTEOS, INTENSIDADES VEHICULARES Y TPDA ACTUALES EN EL CONDOMINIO ALBACETE									
Día	Horario	Automóviles	Motos	Carga Liviana	Camiones 2 Ejes	Otros	Total	Intensidad (veh/h)	TPDA (veh/d)
26/03/19	Matutino	132	4	4	4	8	152	76.00	760
	Vespertino	84	3	3	1	5	96	48.00	480
27/03/19	Matutino	126	6	2	2	3	139	69.50	695
	Vespertino	98	7	8	5	4	122	61.00	610
28/03/19	Matutino	102	8	5	0	1	116	58.00	580
	Vespertino	78	5	6	3	1	93	46.50	465

Fuente. Elaboración propia.

CUADRO 12. CONTEOS, INTENSIDADES VEHICULARES Y TPDA ACTUALES EN EL CONDOMINIO EL REY

Día	Horario	Automóviles	Motos	Carga Liviana	Camiones 2 Ejes	Otros	Total	Intensidad (veh/h)	TPDA (veh/d)
1/04/19	Matutino	448	4	35	7	4	498	249.00	2490
	Vespertino	366	35	12	6	10	429	214.50	2145
2/04/19	Matutino	421	16	26	7	5	475	237.50	2375
	Vespertino	345	26	8	4	10	393	196.50	1965
3/04/19	Matutino	383	21	15	3	17	439	219.50	2195
	Vespertino	405	3	11	8	7	434	217.00	2170

Fuente. Elaboración propia.

CUADRO 13a. INTENSIDADES VEHICULARES Y TPDA FUTUROS EN CUATROS CRUCES DE PARAÍSO

Cruce	Intensidad (veh/h)	TPDA (veh/d)
1	179	1790
2	368	3680
3	2	20
4	1	10

Fuente. Elaboración propia.

Como parte de la caracterización del área en estudio se realiza un conteo vehicular manual en las horas definidas como pico, el Cuadro 14, muestra los resultados obtenidos de las intensidades vehiculares y TPDA actuales para los cruces 5 y 6, de Paraíso. Las intensidades bajas obtenidas son un indicar de la necesidad de realizar proyecciones vehiculares a futuro que muestren el flujo que realmente se tendrá cuando el área de estudio se encuentre desarrollada por completo.

CUADRO 14. CONTEOS, INTENSIDADES VEHICULARES Y TPDA ACTUALES EN LOS CRUCES FERROVIARIOS DE PARAÍSO

Cruce	Horario	Automóviles	Motos	Carga Liviana	Camiones 2 Ejes	Otros	Total	Intensidades (veh/h)	TPDA (veh/d)
5	Matutino	8	3	4	1	0	16	8.00	80
	Vespertino	10	4	2	1	0	17	8.50	85
6	Matutino	29	7	2	2	0	40	20.00	200
	Vespertino	26	7	4	0	0	37	18.50	185

Fuente. Elaboración propia.

Para los tres cruces seleccionados en Cartago Centro, se obtienen los resultados de conteos manuales, intensidades vehiculares y TPDA, los cuales se presentan en los Cuadros 15, 16 y 17. Estos conteos podrían representar las intensidades vehiculares que se presentarán en los cruces 5 y 6 para el futuro, por las condiciones similares que se tienen en ambas zonas de comparación. No obstante, se requiere una comparación entre las metodologías restantes para determinar la intensidad a utilizar para seleccionar las posibles soluciones en tales cruces.

CUADRO 15. CONTEOS, INTENSIDADES VEHICULARES Y TPDA ACTUALES EN EL CRUCE CALLE 2 DE CARTAGO

Día	Horario	Automóviles	Motos	Carga Liviana	Camiones 2 Ejes	Otros	TOTAL	Intensidades (veh/h)	TPDA (veh/d)
18/03/19	Matutino	447	33	59	42	6	587	293.50	2935
	Vespertino	488	54	68	26	7	643	321.50	3215
19/03/19	Matutino	513	42	65	59	8	687	343.50	3435
	Vespertino	429	68	77	40	12	626	313.00	3130
20/03/19	Matutino	461	23	47	21	11	563	281.5	2815
	Vespertino	529	48	56	34	9	676	338.00	3380

Fuente. Elaboración propia.

CUADRO 16. CONTEOS, INTENSIDADES VEHICULARES Y TPDA ACTUALES EN EL CRUCE CALLE 3 DE CARTAGO

Día	Horario	Automóviles	Motos	Carga Liviana	Camiones 2 Ejes	Otros	Total	Intensidades (veh/h)	TPDA (veh/d)
18/03/19	Matutino	279	16	28	6	28	357	178.50	1785
	Vespertino	333	29	11	14	41	428	214.00	2140
19/03/19	Matutino	287	11	23	21	39	381	190.50	1905
	Vespertino	358	34	28	11	32	463	231.5	2315
20/03/19	Matutino	270	19	35	15	51	390	195.00	1950
	Vespertino	305	33	23	25	26	412	206.00	2060

Fuente. Elaboración propia.

CUADRO 17. CONTEOS, INTENSIDADES VEHICULARES Y TPDA ACTUALES EN EL CRUCE CALLE 5 DE CARTAGO

Día	Horario	Automóviles	Motos	Carga Liviana	Camiones 2 Ejes	Otros	TOTAL	Intensidades (veh/h)	TPDA (veh/d)
21/03/19	Matutino	461	23	47	21	11	563	281.5	2815
	Vespertino	529	48	56	34	9	676	338.00	3380
22/03/19	Matutino	270	19	35	15	51	390	195.00	1950
	Vespertino	305	33	23	25	26	412	206.00	2060
25/03/19	Matutino	290	17	27	28	38	400	200.00	2000
	Vespertino	373	13	37	21	52	448	224.00	2240

Fuente. Elaboración propia.

Mediante la segunda metodología aplicada, se presentan los valores de la porción de la población total por distrito (Cuadro 18) que impactaría cada cruce en el centro de Cartago, a saber, Calle 2, 3 y 5. Mientras que la intensidad vehicular actual y al 2050 para los cruces, se muestran en el Cuadro 19, las cuales son mayores que las obtenidas con la metodología anterior.

CUADRO 18. POBLACIÓN POR CRUCE DE ACUERDO AL DISTRITO, EN CARTAGO.

Año	Carmen	Oriental	Población/cruce
2019	6397.57	4489.13	10886.70
2050	7706.76	5407.78	13114.53

Fuente. Elaboración propia.

CUADRO 19. INTENSIDADES VEHICULARES Y TPDA FUTUROS EN LOS CRUCES DE CARTAGO, CON BASE EN EL CRECIMIENTO POBLACIONAL

Cruce	Población 2019	Población 2050	Intensidad 2019 (veh/h)	Intensidad 2050 (veh/h)
Calle 2	10886.70	13114.53	343.50	413.80
Calle 3	10886.70	13114.53	231.50	278.88
Calle 5	10886.70	13114.53	338.00	407.18

Fuente. Elaboración propia.

Respecto a la metodología tres que se aplicó para determinar el volumen vehicular al año 2026 y 2050, el valor de TPDA obtenido se muestra en el siguiente Cuadro 20. Estos valores de TPDA son los mayores en comparación a los obtenidos con las anteriores metodologías, por lo tanto se consideran los adecuados para establecer el tipo de señalización activa/pasiva a utilizar en estos curces de Paraíso. Asimismo, se determina que al ser los cruces con mayor flujo vehicular e impacto social en el futuro, se puede considerar la separación de la red vial y férrea en estos cruces.

CUADRO 20. TPDA FUTUROS EN PARAÍSO, RESPECTOS A LAS ESTACIONES DEL MOPT								
Ruta	Estación	TPDA 2015	% crecimiento	TPDA 2019	% Flujo respecto la estación	Cruce	TPDA 2026	TPDA 2050
10	749	40708	2.12	44272	7.76	5	2376	5265
	583	22776	3.52	24408	7.64	6	2413	5346

Fuente. Elaboración propia.

A modo de resumen se presenta el Cuadro 21a, donde se muestran los resultados de intensidades vehiculares y TPDA proyectadas al futuro, para el cruce 5 y 6 en Paraíso, mediante tres metodologías diferentes. En este cuadro se puede observar que la metodología tres representa las mayores intensidades vehiculares para el año 2050, esto implica la colocación de señalización activa/pasiva completa para los cruces 5 y 6. Lo anterior, se puede apreciar con mayor detalle más adelante en la sección de Propuestas de soluciones.

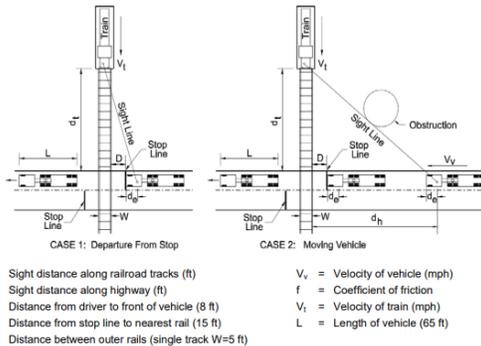
CUADRO 21a. INTENSIDADES VEHICULARES Y TPDA AL 2050, PARA LOS CRUCES 5 Y 6 DE PARAÍSO			
Cruce	Metodología	Intensidad (veh/h)	TPDA (veh/d)
5	1	338	3380
	2	407	4070
	3	527	5265
6	1	344	3435
	2	414	4138
	3	535	5346

Fuente. Elaboración propia.

Distancias de visibilidad

Con base en la Figura 5b y 6b se determinan las DVs de acuerdo a la velocidad del TRP (40 km/h) y de los vehículos (25 km/h), las cuales se presentan en el Cuadro 22. El caso 1 corresponde cuando el vehículo se encuentra detenido en la señal de Alto, implica que debe ver el tren acercándose a 185 m sin ningún tipo de obstrucción. Mientras que el caso 2 significa que cuando el vehículo se encuentra a una distancia de 30 m de los rieles más cercanos, debe visualizar el tren a 95 m sin obstrucciones.

Por lo tanto, se ilustran estas distancias en las Figuras 71, 72, 73a, 74, 75 y 76a para una mejor apreciación de la visibilidad que presentan los conductores respecto al acercamiento del tren, en los seis cruces de Paraíso. En tales figuras se puede observar que el cruce 1, 2, 5 y 6 tienen obstrucción parcial de la visibilidad, el cruce 3 y 4 presentan obstrucción por completo de la visibilidad en ambos casos. Lo anterior, es un factor a tomar en cuenta al momento de elegir el tipo de señalización a colocar en los seis cruces bajo estudio.



- Notes:
- Adjust for skewed crossings.
 - Assume flat highway grades adjacent to and at crossings.

Figura 5b. Esquemas sobre distancia de visibilidad en Alto y en Movimiento.
Fuente. WSDOT, 2013.

Train Speed (mph) V_t	Case 2: Moving Vehicle							
	Vehicle Speed (mph) V_v							
	10	20	30	40	50	60	70	70
	$f=0.40$	0.40	0.35	0.32	0.30	0.29	0.28	
Distance Along Railroad From Crossing d_t (ft)								
10	240	146	106	99	100	105	111	118
20	480	293	212	198	200	209	222	236
30	721	439	318	297	300	314	333	355
40	961	585	424	396	401	419	444	473
50	1,201	732	530	494	501	524	555	591
60	1,441	878	636	593	601	628	666	706
70	1,681	1,024	742	692	701	733	777	828
80	1,921	1,171	848	791	801	833	888	946
90	2,162	1,317	954	890	901	943	999	1,064
Distance Along Highway From Crossing d_h (ft)								
	69	135	220	324	447	589	751	

Design sight distance for a combination of highway and train vehicle speeds and a 65-ft truck crossing a single set of tracks at 90° (AASHTO).

Source: A Policy on Geometric Design of Highway and Streets, 2004, by the American Association of State Highway and Transportation Officials.

Figura 6b. Valores de distancia de visibilidad en Alto y en Movimiento.

Fuente: WSDOT, 2013.

CUADRO 22. DISTANCIA DE VISIBILIDAD DE PARADA RESPECTO A LAS VELOCIDADES				
Velocidad/Caso		Caso 1	Caso 2	
Velocidad del tren (km/h)	Velocidad del vehículo (km/h)	dt(m)	dt(m)	dh(m)
40	25	185	95	30

Fuente. Elaboración propia.

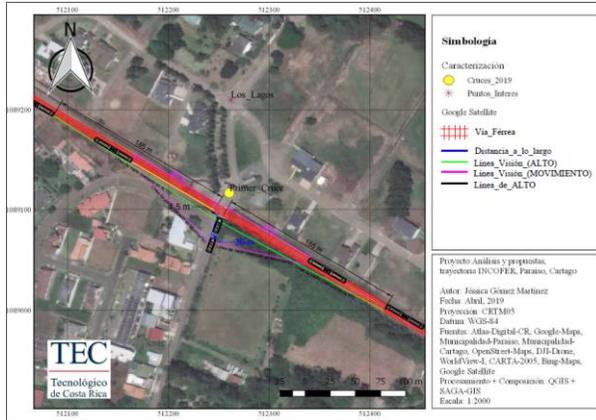


Figura 71. Distancia visibilidad de parada Caso 1 y 2 para el primer cruce, en Paraíso (Anexo 3).
Fuente. Elaboración propia, QGIS y Autodesk.



Figura 74. Distancia visibilidad de parada Caso 1 y 2 para el cuarto cruce, en Paraíso (Anexo 3).
Fuente. Elaboración propia, QGIS y Autodesk.

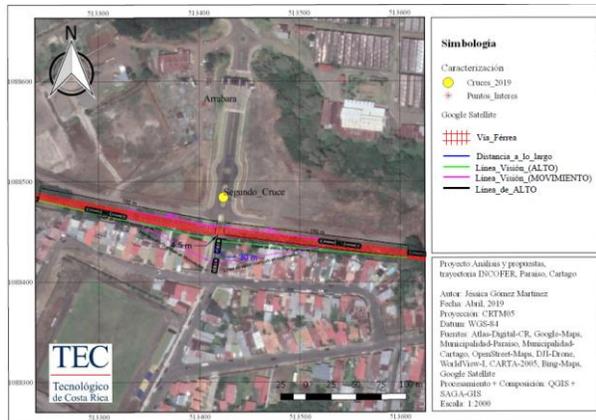


Figura 72. Distancia visibilidad de parada Caso 1 y 2 para el segundo cruce, en Paraíso (Anexo 3).
Fuente. Elaboración propia, QGIS y Autodesk.

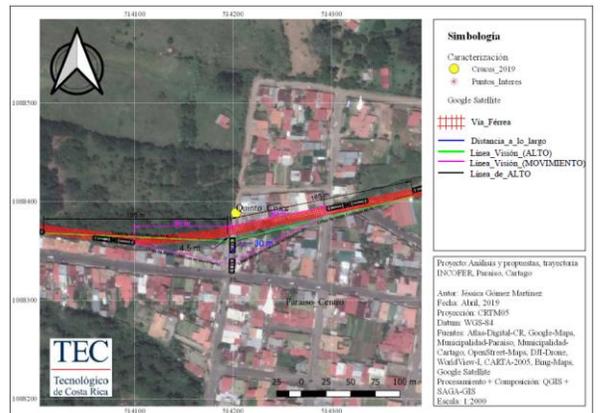


Figura 75. Distancia visibilidad de parada Caso 1 y 2 para el quinto cruce, en Paraíso (Anexo 3).
Fuente. Elaboración propia, QGIS y Autodesk.

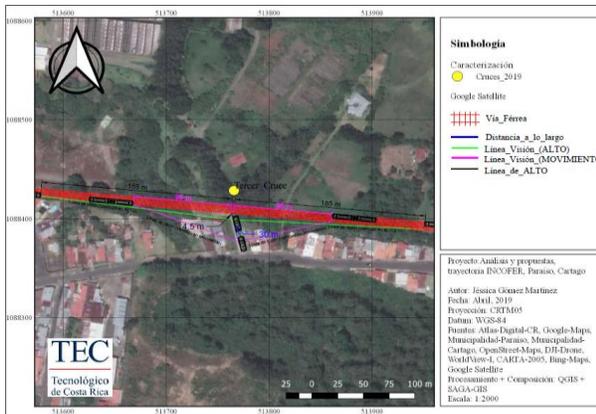


Figura 73a. Distancia visibilidad de parada Caso 1 y 2 para el tercer cruce, en Paraíso (Anexo 3).
Fuente. Elaboración propia, QGIS y Autodesk.



Figura 76a. Distancia visibilidad de parada Caso 1 y 2 para el sexto cruce, en Paraíso (Anexo 3).
Fuente. Elaboración propia, QGIS y Autodesk.

Propuestas de soluciones

Señalización activa/pasiva



Figura 8b. Señal de "Cruz de San Andrés" y señal de ALTO.
Fuente: SIECA, (2000).

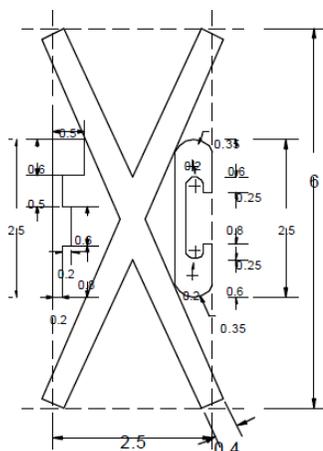


Figura 12b. Detalle de la demarcación para aproximación a cruces de ferrocarril.
Fuente: SIECA, (2000).

Con base en los resultados del Cuadro 13, se muestra la propuesta de señalización activa-pasiva para el cruce 1 (Figura 77a), constituida por la señal R-1-1, R-1-6 (Figura 8b), semáforo de luz intermitente y el sistema sonoro. Todo el sistema se coloca en un mismo poste vertical, a 4,5 m del riel más cercano y a 1.5 m de la orilla de la carretera según estipula el MDGC (SIECA, 2000). Además, se ilustra la señalización horizontal que corresponde al ALTO y el símbolo FC de advertencia sobre un cruce-férreo (Figura 12b), ambos dibujados a 4.5 m del riel más cercano.

Asimismo, se ilustra la iluminación que requiere el cruce como tal, a 9 m del derecho de vía ferroviario, para permitir una mejor visibilidad durante la noche (Wooldridge, et al., 2000).

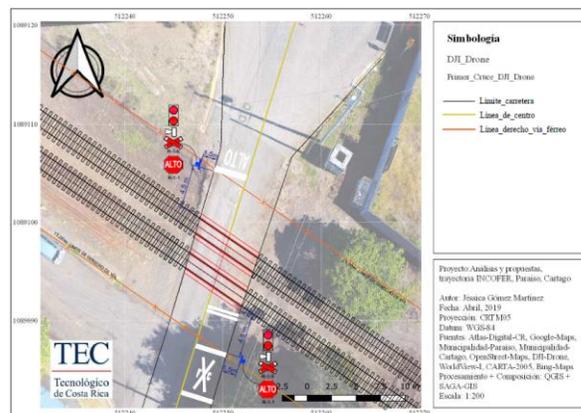


Figura 77a. Propuesta de señalización pasiva-activa para el cruce 1, en Paraiso (Anexo 4).
Fuente: Elaboración propia, QGIS y Autodesk.

Para el cruce 2, se compone de un equipo de seguridad activo completo que corresponde a las agujas, semáforos intermitentes, sistema sonoro y la señalización pasiva, a saber, la señal R-1-1 y R-1-6 (Figura 8b); todos colocados a 4.5 m del riel más cercano y a 1.5 m de la orilla de la carretera como se indica en el MDGC (SIECA,

2000). Estos sistemas se acompañan de la señalización horizontal de ALTO y el símbolo de advertencia FC (Figura 12b), a 4.5 m del riel más cercano (Figura 78). También se muestra la iluminación necesaria para mayor visibilidad durante la noche, a 9 m del derecho de vía férreo (Wooldridge, et al., 2000).

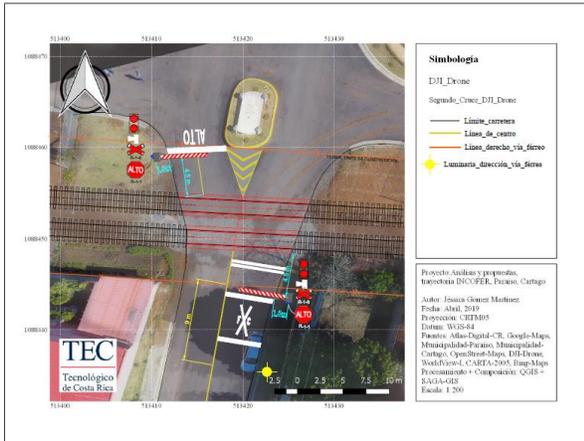


Figura 78. Propuesta de señalización pasiva-activa para el cruce 2, en Paraíso (Anexo 4). Fuente. Elaboración propia, QGIS y Autodesk.

Los cruces 3 y 4 se presentan en las Figuras 79 y 80, los cuales se conforman únicamente por señalización pasiva, es decir, señales verticales R-1-1 y R-1-6 (Figura 8b) a 4.5 metros del riel más cercano, en el sentido Sur-Norte. Mientras que en el sentido Norte-Sur se colocan las señales a 2 m y 1 m, debido a la cercanía con las entradas a las propiedades privadas. Además de la señalización horizontal de ALTO, a las distancias que se colocan las señales verticales.

Las señales verticales se proponen a 1.5 m de la orilla de la carretera para el cruce 3 (Figura 79), no obstante, para el cruce 4 en el sentido Sur-Norte se propone colocarlas cercanas a la orilla de la carretera, ya que el espacio es muy limitado (Figura 80a). También se propone la iluminación de los cruces hacia el sur de las vías férreas, a 9 metros del derecho ferroviario (Wooldridge, et al., 2000).



Figura 79. Propuesta de señalización pasiva para el cruce 3, en Paraíso (Anexo 4). Fuente. Elaboración propia, QGIS y Autodesk.

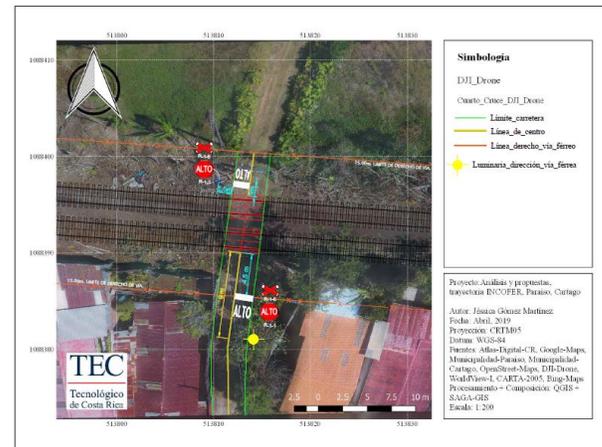


Figura 80a. Propuesta de señalización pasiva para el cruce 4, en Paraíso (Anexo 4). Fuente. Elaboración propia, QGIS y Autodesk.

Los cruces 5 y 6 mostrados en la Figura 81 y 82a muestran un sistema de seguridad completo, la propuesta incluye: agujas de seguridad, semáforos intermitentes, sistema sonoro, señales verticales R-1-1 y R-1-6 (Figura 8b). Se propone colocar las señales verticales en el mismo poste donde se coloca la aguja, a 4.5 m del riel más cercano y al borde del pavimento para el cruce 5. Mientras que en el cruce 6, en el sentido Sur-Norte se propone a 1.5 m del borde, ya que se cuenta con mayor espacio (SIECA, 2000).

También se propone la señalización horizontal, que corresponde a la advertencia del cruce ferroviario con el símbolo FC a 4.5 m del riel más cercano (Figura 12b). Además la iluminación para la noche, se coloca en ambos

lados del eje ferroviario, a 9 y Autodesk.metros del derecho de vía (Wooldridge, et al., 2000).

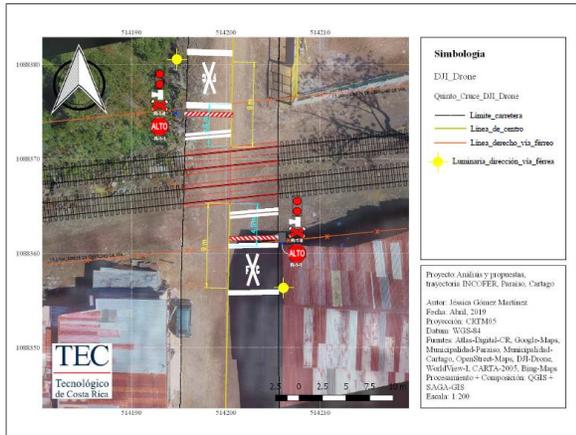


Figura 81. Propuesta de señalización pasiva-activa para el cruce 5, en Paraiso (Anexo 4).
 Fuente. Elaboración propia, QGIS y Autodesk.



Figura 82a. Propuesta de señalización pasiva-activa para el cruce 6, en Paraiso (Anexo 4).
 Fuente. Elaboración propia, QGIS y Autodesk.

El Cuadro 23, muestra una estimación de costos en forma general para la señalización activa y/o pasiva, así como los componentes necesarios para la señalización activa. Estos costos ya incluyen el mantenimiento necesario para cada uno.

CUADRO 23. RANGO DE COSTO ESTIMADO PARA LA SEÑALIZACIÓN PASIVA Y/O ACTIVA		
Elemento de costo unitario	Costo US/\$	Descripción
Cruce básico (2 carriles)	60 000 - 85 000	Incluye señalización pasiva, semáforos y dispositivos sonoros. Los detectores y controladores.
Cruce completo (2 carriles)	>100 000	Incluye barreras, señalización pasiva, semáforos y dispositivos sonoros. Los detectores y controladores.
Detectores de tren sobre rieles	14 000 -18 000	Circuito detector de tren y línea de comunicación desde el controlador de interfaz inteligente hasta la interfaz al lado de la carretera.
Controlador de cruce	7000-8000	Controlador de interfaz inteligente.
Detector de vehículo atrapado	21 000 - 25 000	Cámara de detección de vehículo atrapado, con postes y controlador.
Cruce con señalización pasiva (2 carriles)	700-900	Incluye señalización vertical y horizontal.

Fuente. USDT (2003); Nadal (2019).

Microsimulación de la señalización Activa/Pasiva

La red vial y ferroviaria elaborada en VISSIM, se muestra en las Figuras 83 y 84. En estas se puede apreciar la configuración utilizada para realizar las simulaciones. Cabe destacar que para el primer cruce, se realizó la microsimulación en un archivo por separado, debido a la limitación que presenta la versión estudiantil.



Figura 83. Configuración de red vial y férrea, para el primer cruce, en Paraíso.
Fuente. PTV VISSIM 11.



Figura 84. Configuración de red vial y férrea, para los cruces del 2 hasta el 6, en Paraíso.
Fuente. PTV VISSIM 11.

Los resultados de longitud de cola máximo y el promedio en metros, la cantidad de vehículos, las demoras y el Nivel de Servicio por carril y por cruce, se presentan en el Cuadro 24 y 25 para el 2026 (año en que se espera llegue el TRP a Paraíso) y 2050, respectivamente. Los cuales indican que aunque se generan colas y se aumentan del año 2026 al 2050, no se consideran desproporcionales para optar por una desnivelación que representa un costo muy elevado.

Por otra parte, se estima el Error Relativo de las longitudes máximas de cola y demoras, que se generan entre el año 2026 y 2050 (Cuadro 26). Estos resultados, obedecen a la microsimulación utilizando dispositivos de seguridad activos y pasivos en los seis cruces de análisis.

CUADRO 24. PARÁMETROS DE LONGITUD DE COLA, DEMORA Y NS AL 2026							
Cruce	Sentido	Longitud promedio de cola (m)	Longitud máxima de cola (m)	Cantidad de vehículos	Demora (s)	Nivel de servicio	Valor del Nivel de Servicio
1	N-S	1.90	18.85	15	15.15	LOS_B	2
	S-N	1.24	7.10	16	9.15	LOS_A	1
	Ambos	0.79	18.85	31	10.68	LOS_B	2
2	N-S	19.46	61.55	28	60.64	LOS_E	5
	S-N	8.20	30.55	20	38.94	LOS_D	4
	Ambos	6.91	61.55	48	47.63	LOS_D	4
3	N-S	0.00	0.00	0	0.00	LOS_A	1
	S-N	0.13	8.24	3	5.12	LOS_A	1
	Ambos	0.03	8.24	3	2.19	LOS_A	1
4	N-S	0.03	6.04	1	5.67	LOS_A	1
	S-N	0.00	0.00	0	0.00	LOS_A	1
	Ambos	0.01	6.04	1	1.13	LOS_A	1
5	N-S	6.22	23.68	15	48.11	LOS_D	4
	S-N	4.80	33.48	20	23.99	LOS_C	3
	Ambos	2.75	33.48	35	30.81	LOS_C	3
6	N-S	6.90	31.30	22	29.17	LOS_C	3
	S-N	6.18	44.06	21	26.32	LOS_C	3
	Ambos	3.27	44.06	43	25.41	LOS_C	3

Fuente. Elaboración propia, PTV VISSIM.

CUADRO 25. PARÁMETROS DE LONGITUD DE COLA, DEMORA Y NS AL 2050							
Cruce	Sentido	Longitud promedio de cola (m)	Longitud máxima de cola (m)	Cantidad de vehículos	Demora (s)	Nivel de servicio	Valor del Nivel de Servicio
1	N-S	1.90	18.85	15	15.15	LOS_B	2
	S-N	1.24	7.10	16	9.15	LOS_A	1
	Ambos	0.79	18.85	31	10.68	LOS_B	2
2	N-S	19.46	61.55	28	60.64	LOS_E	5
	S-N	8.20	30.55	20	38.94	LOS_D	4
	Ambos	6.91	61.55	48	47.63	LOS_D	4
3	N-S	0.00	0.00	0	0.00	LOS_A	1
	S-N	0.13	8.24	3	5.12	LOS_A	1
	Ambos	0.03	8.24	3	2.19	LOS_A	1
4	N-S	0.03	6.04	1	5.67	LOS_A	1
	S-N	0.00	0.00	0	0.00	LOS_A	1
	Ambos	0.01	6.04	1	1.13	LOS_A	1
5	N-S	26.12	87.08	35	64.28	LOS_E	5
	S-N	20.03	34.04	43	34.97	LOS_C	3
	Ambos	11.54	87.08	78	45.77	LOS_D	4
6	N-S	37.36	96.52	55	49.94	LOS_D	4
	S-N	11.24	42.46	43	22.38	LOS_C	3
	Ambos	12.15	96.52	98	36.36	LOS_D	4

Fuente. Elaboración propia, PTV VISSIM.

CUADRO 26. ERROR RELATIVO DE LONGITUD MÁXIMA DE COLA (M) LAS Y DEMORAS (S) ENTRE EL AÑO 2026 Y 2050, CON SEÑALIZACIÓN ACTIVA/PASIVA.		
Cruce	Longitud máxima de cola (m)	Demoras (s)
5	-160.10%	-48.56%
6	-119.06%	-43.09%

Fuente. Elaboración propia.

Conceptos de intervenciones viales

Las soluciones que se proponen para cada uno de los cruces se abordan a nivel conceptual, por lo tanto, los detalles tales como la duración de la construcción, las fases y los métodos no se determinan en esta etapa de diseño conceptual. Sin embargo, se asumen efectos de construcción temporales comunes para cada sitio evaluado. Los efectos de construcción comunes a todos los conceptos incluyen restricciones de tráfico, ruido, escorrentía de aguas pluviales, aumento de polvo y emisiones, afectación a los residentes y el costo.

Una de las posibilidades a estudiar corresponde a desnivelar la red vial, para la cual se tiene dos conceptos, (i) un paso superior vial y (ii) un paso inferior; con diferentes dimensiones y manteniendo a nivel la vía del ferrocarril. Estos conceptos, implican la construcción de muros de contención y relleno, en el caso del paso superior. Para el paso inferior, se debe remover una importante cantidad de material, además de buscar una solución al problema de drenaje pluvial.

Por otro lado, también se considera la viabilidad de desnivelar las líneas férreas en un tramo, mediante dos conceptos, (i) mediante la construcción de rampas de aproximación con muros de contención y relleno y (ii) la construcción de toda la sección férrea a desnivel, compuesta de vigas modulares apoyadas sobre columnas de concreto. Estos últimos conceptos implican igualmente la elevación de la Estación del tren, puesto que se encuentra en el tramo que se propone desnivelar.

Desnivelación de la red vial

Estos conceptos aplican para los cruces 5 y 6 en el cantón de Paraíso, dado que en esos puntos es donde se proyecta un mayor flujo vehicular al año 2050 (Cuadro 21) e implicaría la reconfiguración de las calles 10 y 12, sobre o bajo las vías del tren rápido. Las calles actualmente cruzan Calle Loria, Avenida 7, Avenida 3 y Avenida 1 (Figura 85).

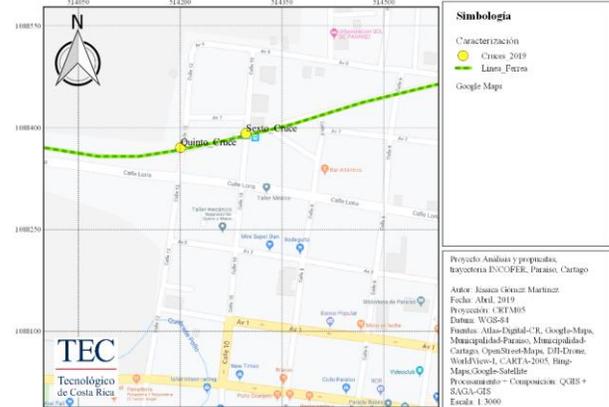


Figura 85. Configuración de la red vial en los cruces 5 y 6, de Paraíso (Anexo 2).

Fuente. Elaboración propia, QGIS.

Concepto elevación de la red vial

Este concepto implicaría la elevación de Calle 12 a partir de los 50 m al Sur de la Avenida 9, hasta 30 m al Sur de Avenida 3 aproximadamente. Mientras que la Calle 10 se elevaría desde la

Avenida 9 hasta 35 m al Sur de Avenida 3, aproximadamente (Figura 85). Además, se requiere la construcción de un puente de aproximadamente 60 m y 90 m de longitud, en la Calle 12 y 10 respectivamente, puesto que la rampa hacia el Sur interrumpe el flujo vehicular en Calle Loría. Aunado a esto, se requiere la construcción de pequeños puentes que permitan el acceso a las Avenidas 3 y 7 (Figura 86a).

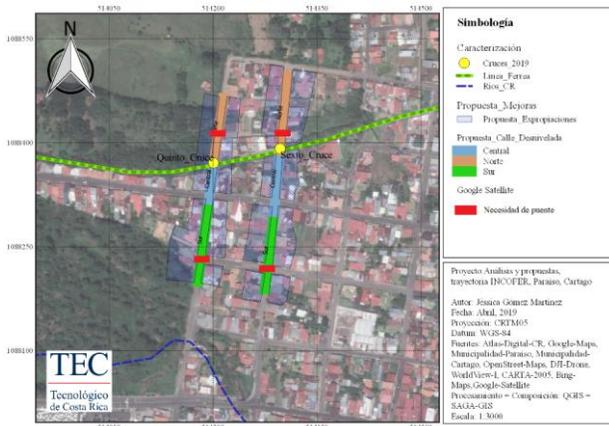


Figura 86a. Propuesta de desnivelación superior de las calles 10 y 12, en Paraíso (Anexo 2). Fuente. Elaboración propia, QGIS.

La topografía en efecto permitiría que se llevaran a cabo las intervenciones viales que se proponen, sin embargo, se debe realizar un relleno de material importante, en especial para las rampas de aproximación hacia el Norte, como se observa en los perfiles correspondientes (Figuras 87a y 88a).

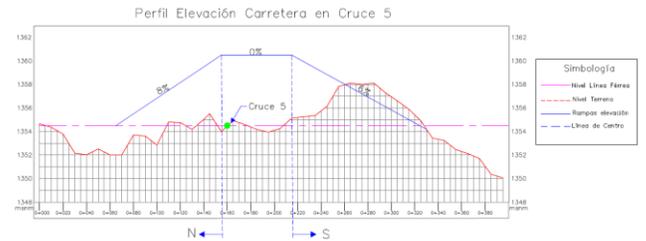


Figura 87a. Perfil longitudinal de la propuesta de elevación en el Cruce 5 (Calle 12), en Paraíso (Anexo 5). Fuente. Elaboración propia, Civil 3D.



Figura 88a. Perfil longitudinal de la propuesta de elevación en el Cruce 6 (Calle 10), en Paraíso (Anexo 5). Fuente. Elaboración propia, Civil 3D.

Para despejar las vías del ferrocarril, las nuevas carreteras tendrían una pendiente de entre 6% y 8% para velocidades menores a 40 km/h (SIECA, 2011). Las rampas de aproximación para el cruce 5 tendrían una altura de 7 m (IDOM, 2018), una distancia horizontal de 90 hacia el Norte y de 135 m hacia el Sur (Figura 87). En el caso del cruce 6 se proponen rampas de 105 m de longitud horizontal para ambos sentidos (Norte-Sur), con altura de 7 m (Figura 88).

El Cuadro 27, presenta un resumen del impacto que presenta la construcción elevada de las calles 10 y 12.

CUADRO 27. EFECTOS POTENCIALES DEL CONCEPTO DE DESNIVELACIÓN SUPERIOR DE LA CALLE 10 Y 12	
Atributo	Efectos y conclusiones
Reubicaciones de negocios	1
Residencias con acceso alterado	105
Reubicaciones residenciales	30 en Calle 12 y 50 en Calle 10, para un total de 28729.51 m ² aproximadamente (Figura 86a).
Número de calles cerradas	Calle 10, Calle 12, Avenida 7, un tramo de Calle Loría, Avenida 3.
Muro de contención	225 m para Calle 12 y 205 para Calle 10.
Topografía natural	La topografía permite la construcción elevada de las carreteras, sin embargo se debe colocar una cantidad importante de relleno.

Fuente. Elaboración propia.

Concepto desnivelación subterránea de la red vial

La desnivelación subterránea de Calle 12 se realizaría a partir de los 25 m al Sur de Avenida 9, hasta 15 m al Sur de Avenida 1, donde se encuentra el límite de la Quebrada Pollo. Por otra parte, la Calle 10 se desnivelaría desde la Avenida 9 hasta la Ruta Nacional 10 (Figura 89a).



Figura 89a. Propuesta de desnivelación subterránea de las calles 10 y 12, en Paraíso (Anexo 2). Fuente. Elaboración propia, QGIS.

Por otro lado, la topografía no permitiría que se llevaran a cabo las intervenciones viales que se proponen en este segundo concepto, debido a que quedarían zonas del túnel descubiertas, a una profundidad de los 5 m (SIECA, 2011) que se requiere tenga de altura el túnel. Esto se puede observar en los perfiles de las Figuras 90a y 91a.

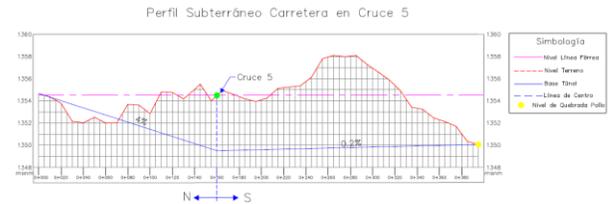


Figura 90a. Perfil longitudinal de la propuesta subterránea en el Cruce 5 (Calle 12), en Paraíso (Anexo 5). Fuente. Elaboración propia, Civil 3D.



Figura 91a. Perfil longitudinal de la propuesta subterránea en el Cruce 6 (Calle 10), en Paraíso (Anexo 5). Fuente. Elaboración propia, Civil 3D.

Las nuevas carreteras tendrán una pendiente entre 0.2% y 4% para velocidades menores a 40 km/h (SIECA, 2011) para despejar las vías del ferrocarril. Las rampas de aproximación para el cruce 5 tendrían una altura de 5 m (SIECA, 2011), una distancia horizontal de 160 m hacia el Norte y de 235 m hacia el Sur (Figura 90). En el caso del cruce 6 se proponen rampas de 110 m de longitud horizontal hacia el Norte y 370 m hacia el Sur, con altura de 5 m (Figura 91).

El Cuadro 28, presenta un resumen del impacto que presenta la construcción elevada de las calles 10 y 12.

CUADRO 28. EFECTOS POTENCIALES DEL CONCEPTO DE DESNIVELACIÓN SUBTERRÁNEA DE LA CALLE 10 Y 12	
Atributo	Efectos y conclusiones
Reubicaciones de negocios	1
Residencias con acceso alterado	130
Reubicaciones residenciales	35 en Calle 12 y 60 en Calle 10, para un total de 32936.62 m ² aproximadamente (Figura 89a).
Número de calles cerradas	Calle 10, Calle 12, Avenida 7, un tramo de Calle Loría, de la Avenida 1 y 3.
Muro de contención	395 m para Calle 12 y 480 m para Calle 10.
Topografía natural	La topografía no permite la construcción de un túnel en Calle 12 y 10.

Fuente. Elaboración propia.

Desnivelación de las líneas férreas

Los conceptos se fundamentan en elevar las líneas férreas sobre la red vial, sobre el tramo de los cruces 5 y 6 del cantón de Paraíso (Figura 92a). La estructura consiste en rampas de aproximación de 160 m hacia el Este y 130 m al Oeste, con un puente central de 100 m de longitud horizontal. Asimismo se puede apreciar que no es necesario realizar expropiaciones para llevar a cabo esta propuesta (Figura 92a).

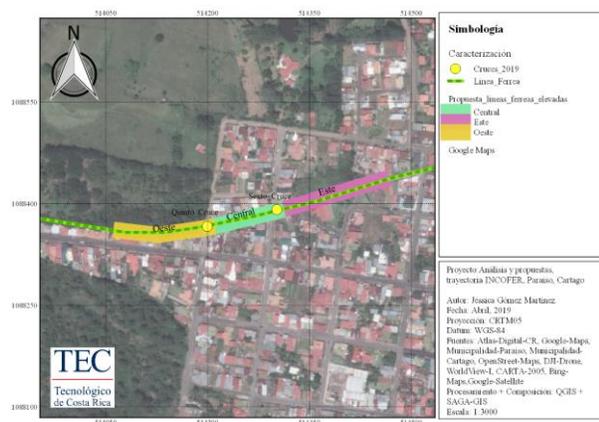


Figura 92a. Propuesta de elevación de las líneas férreas sobre cruces 5 y 6, en Paraíso (Anexo 2). Fuente. Elaboración propia, QGIS.

En cuanto a la topografía, esta es apta para llevar a cabo una intervención vial de este tipo, con una pendiente máxima de 5% y una altura mínima del puente igual a 5 metros sobre el nivel del suelo, como se muestra en el perfil que muestra la Figura 93a.

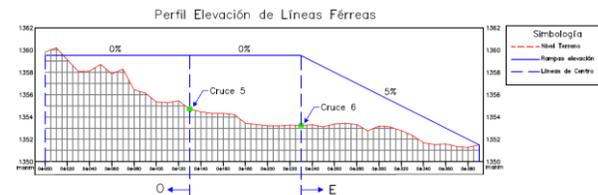


Figura 93a. Perfil longitudinal elevación de las líneas férreas sobre cruces 5 y 6, en Paraíso (Anexo 5). Fuente. Elaboración propia, Civil 3D.

Concepto con muros de contención

El primer concepto se basa en construir las rampas de aproximación con material de relleno y muros de contención de concreto.

El Cuadro 29 resume los efectos potenciales del concepto 1 sobre el perfil elevado en el tramo de los cruces 5 y 6.

CUADRO 29. EFECTOS POTENCIALES DEL CONCEPTO 1 DE ELEVACIÓN DE LAS LÍNEAS FÉRREAS SOBRE CRUCE 5 Y 6.

Atributo	Efectos y conclusiones
Reubicaciones de negocios	0
Residencias con acceso alterado	10
Reubicaciones residenciales	0 (Figura 92a)
Número de calles cerradas	2
Muro de contención	290 m lineales
Topografía natural	La topografía descendiente y regular en el sentido Oeste-Este, no favorecería este concepto porque se requeriría colocar relleno.
Transporte	La desnivelación podría reducir moderadamente las demoras en Calle 10 y 12 e intersecciones adyacentes. Además reduciría a LOS A los cruces 5 y 6. Sin embargo, la elevación en esta ubicación no es relativamente necesaria en función de las condiciones de la hora pico.
Ruido	Los muros de contención bloquearían el ruido en algunos receptores, y el nivel más alto del tren puede aumentar el ruido para los receptores que están cercanos.
Calidad Visual	La estructura elevada y el muro de contención bloquearían algunas vistas en el sentido Norte-Sur y viceversa.
Servicios públicos	No hay efectos permanentes. Las actividades de construcción a corto plazo pueden causar un retraso menor para los proveedores de servicios.
Reubicaciones de servicios públicos	Se requerirían reubicaciones de servicios públicos, incluidas las líneas eléctricas, de fibra óptica, de gas, de agua y de alcantarillado.
Geología y suelos	La geología y los suelos en el área podrían apoyar el diseño conceptual.
Humedales, calidad del agua y llanuras de inundación	No afectaría, puesto que no existen en la zona a intervenir.
Fauna y vegetación	Sin efectos medibles

Fuente. Elaboración propia.

Concepto con sistema de vigas y columnas

Este concepto se fundamenta en las pautas de diseño antes descrito, no obstante, se propone que se construyan las rampas de aproximación con vigas modulares sobre columnas de concreto en lugar de muros de contención.

El Cuadro 30 resume los efectos potenciales del concepto 2 sobre el perfil elevado en el tramo de los cruces 5 y 6.

CUADRO 30. EFECTOS POTENCIALES DEL CONCEPTO 2 DE ELEVACIÓN DE LAS LÍNEAS FÉRREAS SOBRE CRUCE 5 Y 6.	
Atributo	Efectos y conclusiones
Reubicaciones de negocios	0
Residencias con acceso alterado	0
Reubicaciones residenciales	0
Número de calles cerradas	2
Cantidad de columnas	10 columnas aproximadamente
Topografía natural	La topografía regular descendiente en sentido Oeste-Este, favorecería considerablemente este concepto.
Transporte	La desnivelación podría reducir moderadamente las demoras en Calle 10 y 12 e intersecciones adyacentes. Además reduciría a LOS A los cruces 5 y 6. Sin embargo, la elevación en esta ubicación no es relativamente necesaria en función de las condiciones de la hora pico.
Ruido	Para el segundo concepto se espera un ruido mayor puesto que no se contaría con los muros de contención, que lo disminuyan.
Calidad Visual	Menor impacto, porque no existen los muros que obstaculicen la visibilidad.
Servicios públicos	No hay efectos permanentes. Las actividades de construcción a corto plazo pueden causar un retraso menor para los proveedores de servicios.
Reubicaciones de servicios públicos	Se requerirían reubicaciones de servicios públicos, incluidas las líneas eléctricas, de fibra óptica, gas, agua y alcantarillado.
Geología y suelos	La geología y los suelos en el área podrían apoyar el diseño conceptual.
Humedales, calidad del agua y llanuras de inundación	No afectaría, puesto que no existen en la zona a intervenir.
Fauna y vegetación	Sin efectos medibles

Fuente. Elaboración propia.

Microsimulación de la desnivelación de las líneas férreas

La microsimulación para la desnivelación de las líneas férreas sobre los cruces 5 y 6, se muestra en la Figura 94. El volumen vehicular utilizado en estos cruces se presenta en el Cuadro 20, mostrado anteriormente, para el año 2026 y 2050. Los resultados extraídos del software se presentan en el Cuadro 31 y 32; mostrando que con la desnivelación se reducen las colas y tiempos de espera al mínimo, no obstante, una desnivelación implica un alto costo e impacto a nivel constructivo.

Además se estima el Error Relativo de las longitudes máximas de cola y demoras, que se generan entre el año 2026 y 2050 (Cuadro 33).



Figura 94. Desnivelación de las líneas férreas, simulado en el cruce 5 y 6 de Paraíso.
Fuente. PTV VISSIM 11.

CUADRO 31. PARÁMETROS DE LONGITUD DE COLA, DEMORA Y NS AL 2026 CON DESNIVELACIÓN DE LA LÍNEA FÉRREA							
Cruce	Sentido	Longitud promedio de cola (m)	Longitud máxima de cola (m)	Cantidad de vehículos	Demora (s)	Nivel de servicio	Valor del Nivel de Servicio
5	N-S	0	0	15	0.78	LOS_A	1
	S-N	0	0	20	0	LOS_A	1
	Ambos	0	0	35	0.3	LOS_A	1
6	N-S	0	0	23	0.52	LOS_A	1
	S-N	0	0	21	0.04	LOS_A	1
	Ambos	0	0	44	0.27	LOS_A	1

Fuente. Elaboración propia, VISSIM.

CUADRO 32. PARÁMETROS DE LONGITUD DE COLA, DEMORA Y NS AL 2050 CON DESNIVELACIÓN DE LA LÍNEA FÉRREA							
Cruce	Sentido	Longitud promedio de cola (m)	Longitud máxima de cola (m)	Cantidad de vehículos	Demora (s)	Nivel de servicio	Valor del Nivel de Servicio
5	N-S	0	0	36	1.81	LOS_A	1
	S-N	0	0	47	0.06	LOS_A	1
	Ambos	0	0	83	0.78	LOS_A	1
6	N-S	0	0	55	5.28	LOS_A	1
	S-N	0	0	43	0.03	LOS_A	1
	Ambos	0	0	98	2.86	LOS_A	1

Fuente. Elaboración propia, VISSIM.

CUADRO 33. ERROR RELATIVO DE LAS LONGITUD DE COLAS (M) Y DEMORAS (S) ENTRE EL AÑO 2026 Y 2050, DESNIVELACIÓN DE LÍNEAS FÉRREAS		
Cruce	Longitud máxima de cola (m)	Demoras (s)
5	0.00%	-160.00%
6	0.00%	-959.26%

Fuente. Elaboración propia.

Opción viable para la desnivelación

La propuesta de solución en caso de considerar una intervención vial, corresponde al concepto de la desnivelación de las líneas férreas. Para ello la Figura 95a muestra la sección transversal que se recomienda, conformada por vigas tipo cajón pretensadas prefabricadas en tramos de 35 m. Además de pilas centrales con las medidas que se pueden observar en la Figura 95a; sin embargo, la altura varía de acuerdo de 0 a 5 m por la rampa de aproximación hacia el Oeste, es por esto que se propone que se realicen en el sitio. Asimismo, las Figuras 97a y 98a muestran un modelo 3D de las propuesta de desnivelación de las líneas férreas en el tramo de los cruces 5 y 6, a modo de brindar una idea general sobre la dimensión de este tipo de obras.

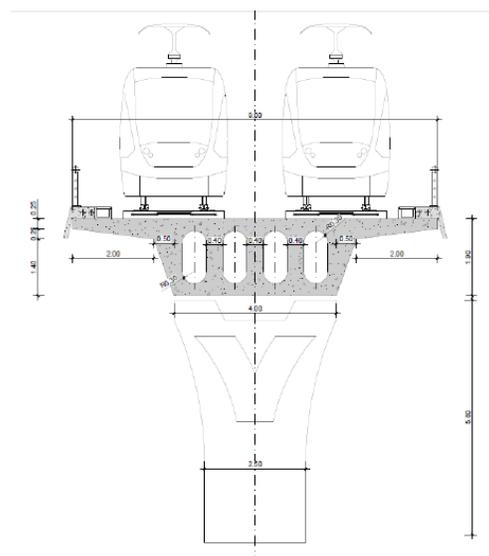


Figura 95a. Sección propuesta para el viaducto elevado.
Fuente. IDOM, 2018

En cuanto a la metodología constructiva se propone que se realice con el método de Tramo-

por-Tramo, (Figura 96a) debido a que se adecua al tipo de estructura, es rápido y económico en comparación a otros procesos constructivos. Los segmentos se instalan en bloque a lo largo de todo el tramo, luego se introduce el pretensado en la estructura a través de los tendones externos, lo que resulta en una construcción más rápida en comparación con el método de voladizo equilibrado (VSL, 2019).

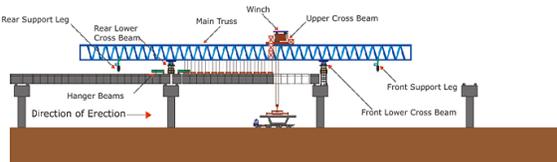


Figura 96a. Metodología de construcción propuesta, Tramo por-Tramo.
Fuente. VSL (2019)



Figura 97a. Propuesta más factible de desnivelación de las vías del tren.
Fuente. Elaboración propia en SketchUp Pro, Google Earth y Paint 3D.



Figura 98a. Propuesta más factible de desnivelación de las vías del tren, vista hacia el Oeste.
Fuente. Elaboración propia en SketchUp Pro, Google Earth y Paint 3D.

El Cuadro 34 presenta una referencia de costos estimados para viaductos elevados en Estados Unidos, Asia, América Latina, entre otros; donde se utilizaron sistemas constructivos similares al que se propone para la desnivelación las vías férreas sobre los cruces 5 y 6, en Paraíso. Por lo tanto, se muestran a modo de tener una aproximación del costo que representa la construcción de este tipo de estructuras.

CUADRO 34. COSTOS ESTIMADOS PARA VIADUCTO ELEVADO		
Localización/Sistema	Longitud (km)	Costo US\$ m/km
Vancouver Sky Train	28.8	34.88
London DLR	27.0	37.76
Seattle Monorail	22.4	37.44
KL Monorail	8.5	24.80
Las Vegas Monorail	5.0	45.92
Washington,DC Metro	97.3	114.30
Atlanta MARTA	43.1	88.00
Baltimore Sección Metro A&B	12.2	147.50
Extensión Los Ángeles Norte Hollywood	10.1	131.60
Extensión de Atlanta Línea Norte	3.7	126.90
Extensión Aeropuerto BART San Francisco	14.0	109.40
Singapore	67.0	54.50
Seoul	116.5	65.80
Calcutta	16.5	59.90
Ciudad México Línea B	23.7	43.80
Caracas Línea 3	4.4	98.40
Santiago Línea 5	2.8	71.80
Metro de Copenhague Fases 1-3	21.0	69.80
Extensión de Línea London Jubilee	16.0	329.90
Extensión Madrid	56.3	26.70
Líneas 1-2 Marseille	19.6	59.10
Fase 1 Metro Turin	9.6	71.70
Línea London Victoria	15.8	63.10
Etapa 1 Vienna	-	94.20
Berlin U-Bahn	4.6	88.30
GAM, Costa Rica	72.7	13.71

Fuente: L.C.R. Logística S.A (2017); Flyvbjerg, et al., (2008); Hoback (2008); Kerr, et al., (2010).

Análisis de los resultados

Caracterización del área de estudio

Definición de los cruces a estudiar

El desarrollo ferroviario en nuestro país es vital, por lo que se espera la implementación de un sistema de tren eléctrico, sobre el derecho de vía actual del INCOFER, que conecte un eje principal de este a oeste entre las ciudades de Cartago, San José, Heredia y Alajuela (IDOM, 2018).

En este contexto el TEC articula esfuerzos con la Municipalidad de Paraíso e INCOFER, con el fin de realizar un estudio técnico de los cruces más importantes en el tramo de Paraíso (Cuadro 6). Tales cruces fueron definidos como prioritarios debido a que el primero y segundo conectan con la única entrada al Residencial Los Lagos y El Condominio Arrabará, respectivamente. Mientras que cerca del tercer cruce se encuentra la entrada hacia una finca, el cuarto hacia una vivienda y por último el cruce cinco y seis son importantes por la continuidad vial en la zona (Figura 55b). Cabe destacar que existen dos cruces hacia el Este de la última Estación de Paraíso (sexto cruce), los cuales no se toman en cuenta para el análisis del proyecto debido a que INCOFER realizó el mejoramiento de la vía férrea hasta el sexto cruce.

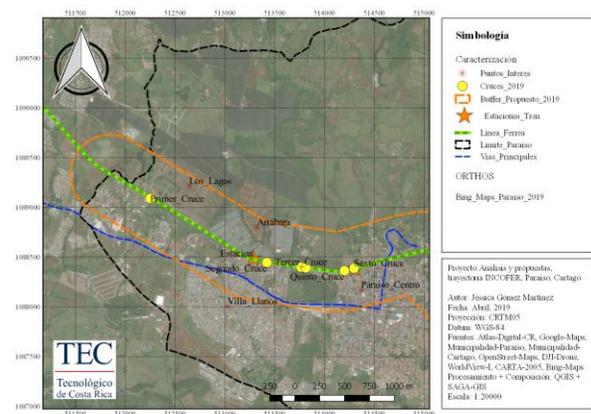


Figura 55b. Ubicación de los cruces ferroviarios definidos por INCOFER para la Municipalidad de Paraíso (Anexo 2). Fuente. Elaboración propia, QGIS.

Asimismo, se puede observar en la Figura 55b que el eje-ferroviario a lo largo del cual se ubican los cruces, corre hacia el Norte y de forma relativamente paralela a la Ruta-10 Cartago-Paraíso; misma que conecta el cantón de Paraíso con el cantón de Turrialba.

Por otra parte, el perímetro buffer mostrado en la Figura 55b, es de 400 m debido a que es la distancia máxima para evitar que el buffer invadiera los cantones que se encuentran al límite de Paraíso. Además, este perímetro es propuesto para permitir conectividad y desarrollo en los alrededores de línea férrea (Rojas, 2019). No obstante, el proceso de caracterización no se limita a tal perímetro porque es necesario tomar

en cuenta el desarrollo urbano en el Norte y Sur del cantón.

Estado físico de la infraestructura vial y férrea

En el tramo de estudio en Paraíso (desde Río Blanquillo hasta la última Estación del tren) se observa que no existe ningún componente de la superestructura ferroviaria, es decir, rieles, durmientes, sujeciones, eclisas, señalización y demás infraestructura que alguna vez existió en tales cruces durante la operación del Ferrocarril al Atlántico (Pérez, et al., 2012). Esta infraestructura ha sido removida, ya sea por INCOFER o por terceros (Figura 56), o sea, lo que existe en este momento es esencialmente el derecho de vía.

Asimismo, durante las visitas de campo fue evidente que existe material de relleno a lo largo del derecho de vía férreo, probablemente, producto de décadas de operación del Ferrocarril al Atlántico (Figura 57b). Igualmente, se observa la existencia de invasiones al derecho de vía férreo, especialmente, en el tramo del cruce 4 al 5 (Figura 56).



Figura 57b. Derecho de vía férreo con material de relleno, cruce 4 vista hacia Este.
Fuente. Elaboración propia.

En cuanto a los puentes, solamente existen dos a lo largo del tramo bajo análisis, en los cuales se evidencia que la estructura de acero presenta

corrosión superficial y algunas zonas todavía conservan la pintura (Figura 58). Cabe destacar, que no se llevó a cabo una evaluación cuantitativa de los mismos.

Con base en las fotografías aéreas, se aprecia que los seis cruces no cuentan con la infraestructura necesaria para el paso de los vehículos sobre los rieles, por lo tanto, requieren una reconstrucción total (Figura 59, 60, 61b, 62, 63 y 64). Además, en tales fotografías queda evidente que las calles que intersecan la vía férrea de los cruces 3, 4 y 5 están ausentes de capa asfáltica (Figura 61b, 62 y 63). Aunado a esto se observa que todos los cruces son directos (sentido Norte-Sur y viceversa), es decir, que no se realizan giros hacia la izquierda o derecha y que no se cuenta con diseños geométricos de los mismos.



Figura 61b. Tercer cruce ferroviario ubicado frente al acceso de finca privada, en Paraíso (Anexo 2).
Fuente. Elaboración propia, QGIS.

Por otra parte, los derechos de vía medidos durante las visitas de campo y que se encuentran entre los 2.2 m hasta los 10 m para dos carriles, no cumplen con las condiciones ideales de 3.60 m de ancho por carril (SIECA, 2011).

Respecto a las facilidades peatonales, se observó que no se cuenta con aceras, pasos peatonales y ciclovías (Figura 64) que permitan la movilidad segura de las personas, a pesar de que existe alto flujo peatonal y de ciclistas, tanto en alrededores del derecho de vía férreo como en los cruces de estudio. Lo anterior en vista de que a poca distancia se logra llegar caminando y en bicicleta a muchos centros de empleo, paradas de autobuses y escuelas locales.

Uso de suelo

Respecto a la caracterización al Uso de Suelo, las Figuras 65 y 68, en donde se puede apreciar el cambio que se generó en los últimos años, en especial hacia el Norte de los cruces 1 y 2. Estas regiones en el 2005 aproximadamente, se encontraban como zonas verdes sin la intervención del ser humano (Figura 65), mientras que en la actualidad se encuentra el terreno limpio y algunas viviendas construidas, puesto que la zona se destina para el uso residencial (Figura 68).

En el caso particular del primer cruce se experimenta un cambio de Zona residencial muy baja densidad (ZRMBD) a Zona residencial baja densidad (ZRBD), primordialmente, ligado al desarrollo del Condominio Los Lagos cubriendo un área de aproximadamente 34 Ha. En el caso del segundo cruce, se da un giro a Zona residencial media densidad (ZRMD) desde un uso de Zona residencial muy baja densidad (ZRMBD), cubriendo un área de aproximadamente 42 Ha; extendiéndose dicha área hasta los cruces 3 y 4. Estos últimos cruces (3 y 4) por el contrario no experimentan un fuerte cambio de Uso del Suelo en el sector colindante sur, donde un área de aproximadamente 13 Ha se mantiene como Zona residencial media densidad (ZRMD). Por otro lado, el cruce 2 se ve influenciado por un área designada de uso mixto (ZMR) de alrededor de 6 Ha. Por otra parte, los cruces 5 y 6, los cuales para la publicación del Plan Regulador ostentaban usos de Zonas residenciales de baja densidad (ZRBD), se proyectan en la actualidad para Zona residencial alta densidad (ZRAD), cubriendo un área de aproximadamente 9 Ha. Finalmente, para el cruce-1, un área de aproximadamente 30 Ha situado al sur-este de la misma, se proyecta para un uso de Zona de uso industrial (ZI), que para la zonificación original del Plan Regulador se dividía entre zona de uso de Zona residencial alta densidad y algunos parches de Uso comercial y de servicios. Asimismo, un sector de aproximadamente 22 Ha ubicado al sur-oeste del primer cruce pasa de una combinación de Zona residencial alta densidad (ZRAD) y uso comercial y de servicios en transición a Zona residencial media densidad (ZRMD) y Zona mixto residencial (ZMR) (Figura 67b y 65).

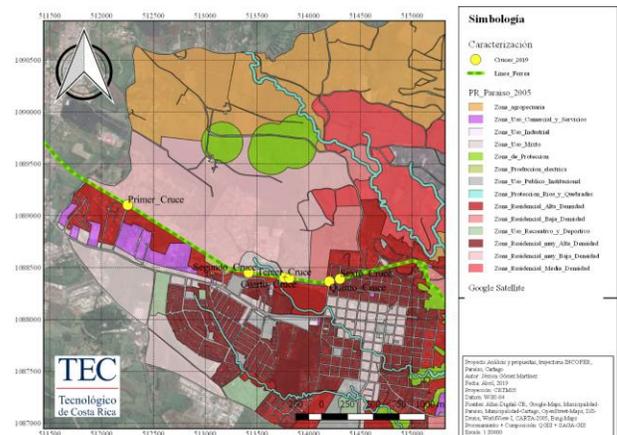


Figura 67b. Mapa de Uso de Suelo en el cantón de Paraíso, según Plan Regulador de 2012 (Anexo 2). Fuente. Elaboración propia, QGIS.

En la Figura 69b se puede observar que en el Uso de Suelo propuesto actualmente, se busca unificar más las zonas según el tipo al que corresponde, tomando como base que en cuanto la zona se encuentre más lejos de la ciudad mayor será el área por lote, es por esto que se observa que la zona en el límite de Paraíso son de Baja Densidad (200 m²), seguidamente Media Densidad (150 m²) y al llegar al centro del cantón se presenta Alta Densidad (120 m²) (Rojas, 2019).

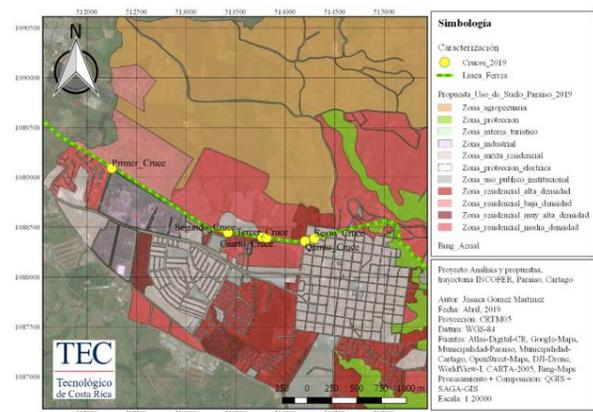


Figura 69b. Propuesta de Uso de Suelo en el cantón de Paraíso, 2019 (Anexo 2). Fuente. Elaboración propia, QGIS.

La caracterización y el cambio de Uso de Suelo se considera importante para proyectar la

estimación de tránsito vehicular en los seis cruces ferroviarios, a modo de estimar el impacto que el TRP puede generar sobre la red vial en el futuro.

Con respecto a la topografía inmediata al área de estudio, la Figura 66b, muestra las curvas de nivel elaboradas por PRUGAM a cada 10 m con curvas auxiliares a cada 5 m (BLOM, 2009). En tal figura se puede apreciar que la pendiente natural decrece de forma regular en el sentido Noroeste-Sureste (mismo de las líneas férreas), mientras que en el sentido Norte-Sur predomina una topografía más irregular con presencia de zonas llanas, valles y picos. Lo anterior evidencia que en caso de considerar una intervención vial para separar las líneas férreas del eje vial, es conveniente realizarlo en el sentido Oeste-Este, puesto que la topografía es más regular. Para mayor detalle, en la sección de Resultados, se presentan perfiles longitudinales específicos, tanto en el sentido Norte-Sur como en el sentido Este-Oeste.

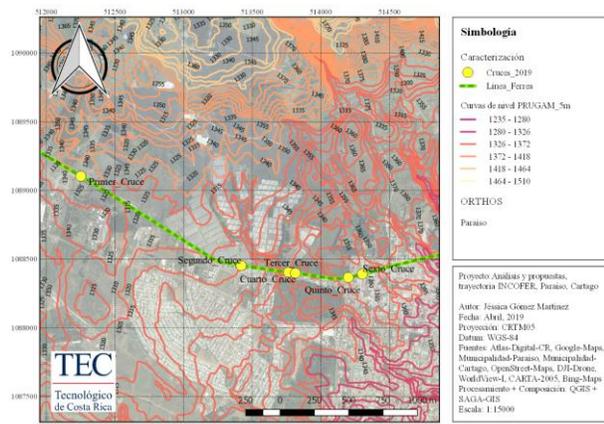


Figura 66b. Curvas de nivel para el cantón de Paraíso, PRUGAM 2012 (Anexo 2).
Fuente. Elaboración propia, QGIS.

Características de los suelos

Respecto a la zona de análisis, no se cuenta con un estudio de suelos que permitan conocer la capacidad de carga del suelo en el derecho de vía ferroviaria. Por lo tanto, se desconoce el tipo de fallas que se puedan presentar en los cruces de interés.

Sin embargo, la Figura 70, muestra la densidad aparente de los suelos que conforman el área de estudio, la cual indica que existe alta homogeneidad espacial de las características del suelo en un área muy reducida desde 1300 kg/m³ a 1350 kg/m³. Al igual con los porcentajes de acuerdo al tipo de material para cada cruce, presenta una alta similitud ente sí, siendo predominante el contenido de arcilla en los cruces. Lo anterior, es un indicador que el suelo es propenso a cambios de volumen con la presencia de agua (Cuadro 10).

Por otra parte, las características mostradas en el Cuadro 10, solo proporcionan una idea general del comportamiento del suelo con base en su composición, no así su capacidad de soporte, dado que es necesario conocer su grado de compactación. Además, se observa que predomina En síntesis, es recomendable llevar a cabo estudios específicos de capacidad de soporte del suelo a lo largo del eje ferroviario, debido a que estos resultados extraídos de SoilGrids corresponden a una aproximación de modelos de predicción espacial global.

Caracterización del flujo vehicular

Para los cruces ferroviarios desde 1 hasta el 4, de Paraíso, no se llevaron a cabo conteos manuales actualmente. Esto se debe a que las zonas inmediatas a tales cruces se encuentran con poca densidad poblacional, puesto que el Residencial Los Lagos y el Condominio Arrabará se encuentran en desarrollo. Por lo tanto, se obtendrían intensidades vehiculares bajas, que no representan la situación real a futuro.

Por lo anterior y debido a la analogía realizada, el Cuadro 11 y 12, muestran los valores que actualmente representan la capacidad máxima de ocupación en Albacete y la urbanización El Rey, por lo cual se espera sean representativos del Residencial Los Lagos y el Condominio Arribará, una vez que estos estén plenamente desarrollados. De esta forma, se consideran estas estimaciones adecuadas para su posterior uso en la proyección de intensidades vehiculares y TPDA futuros en los cruces 1, 2, 3 y 4 (Cuadro 13b).

CUADRO 13b. INTENSIDADES VEHICULARES Y TPDA FUTUROS EN CUATROS CRUCES DE PARAÍSO		
Cruce	Intensidad (veh/h)	TPDA (veh/d)
1	179	1790
2	368	3680
3	2	20
4	1	10

Fuente. Elaboración propia.

En cuanto a los cruces 5 y 6, de Paraíso, las bajas intensidades vehiculares obtenidas (Cuadro 14), lo cual a su vez se deriva en TPDA menores a 200 veh/d, se decidió profundizar en el análisis de otras metodologías que permitiesen una mejor estimación de los flujos vehiculares en estos cruces a futuro. Como parte de la primer metodología y como resultado de los conteos vehiculares, se obtienen valores máximos de intensidades igual a 343.5 veh/h, 231.5 veh/h y 338 veh/h y TPDA equivalentes a 3454 veh/h, 2315 veh/d y 3380 veh/h, para los cruces de las Calles 2,3 y 5, respectivamente (Cuadro 15, 16 y 17). Dichos valores están muy por encima que lo se muestreó en Paraíso, a través de los conteos manuales (Cuadro 14).

Con respecto a la segunda metodología, el Cuadro 18 presenta la cantidad de población que podría hacer uso de los cruces en la Calle 2, 3 y 5, según los distritos Carmen y Oriental. Estos valores permiten estimar las intensidades vehiculares para el año 2050, que corresponden a 413.80 veh/h, 278.88 veh/h y 407.18 veh/h para las Calles 2, 3 y 5, respectivamente, en Cartago (Cuadro 19). Queda evidente, que estas proyecciones vehiculares son mayores que las obtenidas con la primera metodología.

Finalmente, con la tercera metodología para los cruces 5 y 6 de Paraíso, se obtienen respectivamente valores de TPDA para el año 2026 de 2376 veh/d y 2413 veh/d, mientras que para el año 2050 corresponde a 5265 veh/d y 5346 veh/d (Cuadro 20). Cabe recalcar, que estas estimaciones vehiculares son mayores que los resultados obtenidos mediante las otras dos metodologías.

El Cuadro 21b muestra de manera resumida los resultados de las tres metodologías, en el cual se puede apreciar que las estimaciones son comparables entre sí y no existen diferencias profundas entre ellas, no obstante, al arrojar la metodología tres los valores más altos (como ya se ha mencionado) y puesto que se considera más cercana a la realidad, se decide pues utilizar tales valores para las propuestas de soluciones.

Se espera que estas estimaciones sean representativas de los cruces 5 y 6 inmersos en la zona de mayor densidad poblacional del centro de Paraíso (Figura 69b) y que por lo tanto permitan realizar un análisis más realista del potencial desarrollo a futuro en estas áreas.

CUADRO 21b. INTENSIDADES VEHICULARES Y TPDA AL 2050, PARA LOS CRUCES 5 Y 6 DE PARAÍSO			
Cruce	Metodología	Intensidad (veh/h)	TPDA (veh/d)
5	1	338	3380
	2	407	4070
	3	527	5265
6	1	344	3435
	2	414	4138
	3	535	5346

Fuente. Elaboración propia.

Distancias de visibilidad

La distancia de visibilidad de parada se considera un factor importante para definir el tipo de señalización activa o pasiva a colocar en los cruces. Lo anterior se debe a que este elemento, le permite al conductor tomar la decisión de proceder o no un cruce ferroviario (USDT, 2002). En consecuencia, el Cuadro 19, presenta los resultados obtenidos de las distancias de visibilidad disponibles cuando el vehículo se está aproximando y en el cruce mismo. Tales distancias se basan en una velocidad del TRP igual a 40 km/h (IDOM, 2018) y vehicular de 25 km/h, que corresponde a una distancia del tren perpendicular al vehículo igual a 185 m (Caso uno) y 95 m (Caso dos) (Cuadro 22).

Con base en los resultados anteriores, en la Figura 71 se puede apreciar que para el primer cruce no se presenta obstrucción para visibilidad hacia el Este, mientras que para el Oeste la vista se limita, en especial para el Caso dos, por zonas boscosas y viviendas. En cuanto al segundo cruce, la visibilidad es nula en ambos sentidos para los vehículos que se aproximan hacia este cruce. Mientras que para el Caso 1, se tiene una vista moderada (Figura 72). Para el tercer y cuarto cruce, la visibilidad se obstruye por completo para ambos Casos y sentidos (Este-Oeste), por presencia de viviendas en su mayoría (Figura 73b y 74). Por último, el quinto y sexto cruce presentan visibilidad adecuada para el Caso uno en ambos sentidos, por el contrario al Caso 2, donde por la presencia de viviendas se tiene una vista nula de la aproximación del tren en los dos sentidos (Figura 75 y 76b).

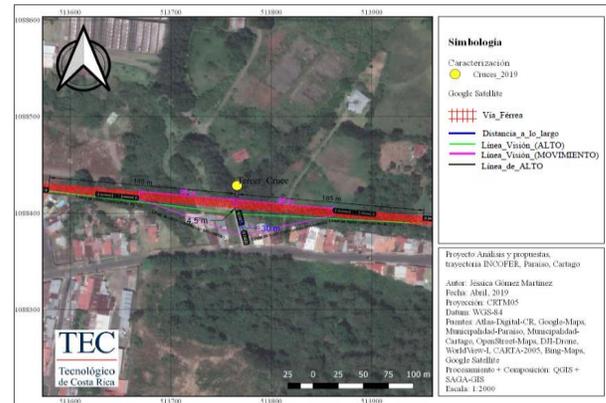


Figura 73b. Distancia visibilidad de parada Caso 1 y 2 para el tercer cruce, en Paraíso (Anexo 3).
Fuente. Elaboración propia, QGIS y Autodesk.

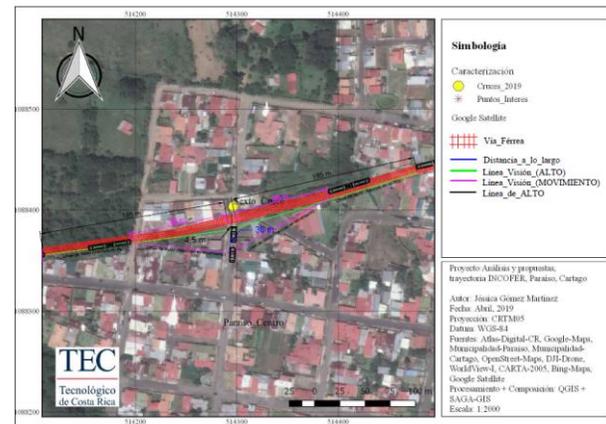


Figura 76b. Distancia visibilidad de parada Caso 1 y 2 para el sexto cruce, en Paraíso (Anexo 3).
Fuente. Elaboración propia, QGIS y Autodesk.

Propuestas de soluciones

Propuesta de señalización activa/pasiva

La señalización para el primero y segundo cruce consta de dispositivos pasivos porque son indispensables en cualquier cruce a nivel (SIECA, 2000) por otra parte, la distancia de visibilidad no es óptima para los vehículos que se aproximan a los cruces (Figura 71 y 72). Además, en este caso no es posible retirar las obstrucciones de la visibilidad, debido a que son viviendas (WSDOT, 2013).

En cuanto a la señalización activa, se propone utilizar semáforos intermitentes y sistemas sonoros para ambos cruces (Figura 77b y 78) que minimicen el riesgo de una colisión, (i) al no ser factible la corrección de la visibilidad que se presenta, (ii) al no tener un acceso alternativo (única entrada y salida del Residencial Los Lagos y Condominio Arrabarará) y (iii) no es posible considerar un paso a desnivel porque el derecho de vía férreo se encuentra inmediato a estas zonas residenciales privadas (USDT, 2002).

Para el primer cruce, no se considera necesario la colocación de agujas porque el flujo vehicular proyectado para el mismo, corresponde a 179 veh/h (Cuadro 13b), el cual es bajo en comparación al resto de los cruces. Mientras, que en el segundo cruce se propone un equipo de señalización activa completa, es decir, con agujas (Figura 78), a consecuencia de la intensidad vehicular elevada que se proyecta igual a 368 veh/h (Cuadro 13b). Aunado a esto, se tiene una visibilidad nula en ambos sentidos (Figura 72), por lo que se requiere mayor seguridad en este cruce (USDT, 2007).

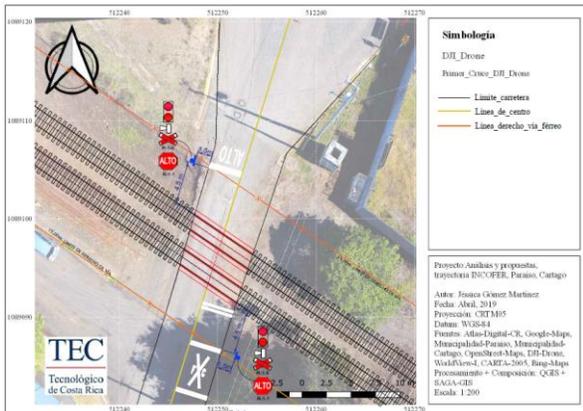


Figura 77b. Propuesta de señalización pasiva-activa para el cruce 1, en Paraíso (Anexo 4). Fuente. Elaboración propia, QGIS y Autodesk.

Respecto al tercer y cuarto cruce, se elige únicamente la señalización pasiva (Figura 79 y 80b), debido a que los flujos vehiculares son 2 veh/h y 1 veh/h, respectivamente (Cuadro 13b). Tales intensidades, son excesivamente bajas por lo que no existe la necesidad de colocar dispositivos activos (USDT, 2007). Sin embargo, aunque se presenta una obstrucción total de la distancia de visibilidad (Figura 73 y 74), estas se pueden tratar con señales de advertencia o control de tráfico que le indiquen a los

conductores el paso del TRP ((WSDOT, 2013). Aunado a esto, para la propuesta de señalización (cruces 3 y 4) se toma en cuenta el costo elevado que representa la colocación de dispositivos activos, por lo tanto, se proponen únicamente para los cruces que sea estrictamente necesario.

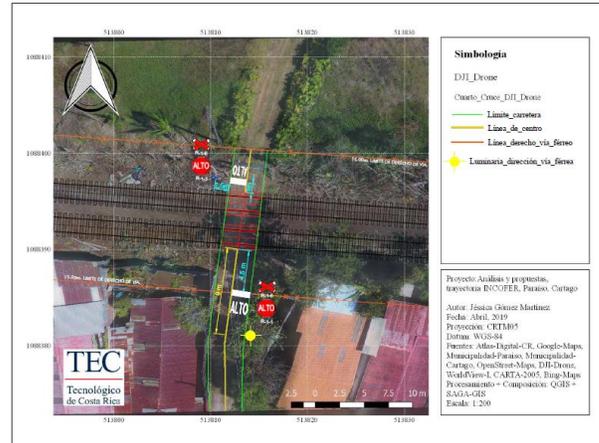


Figura 80b. Propuesta de señalización pasiva para el cruce 4, en Paraíso (Anexo 4). Fuente. Elaboración propia, QGIS y Autodesk.

Finalmente, el quinto y sexto cruce se conforma de un sistema activo/pasivo completo (Figura 81 y 82b), debido a que se proyectan intensidades vehiculares de 527 veh/d y 535 veh/d, respectivamente (Cuadro 21). Queda claro que tales estimaciones son más altas que el resto de los cruces. Asimismo, al estar los cruces ubicados en zonas de mayor densidad poblacional (Figura 69), se esperaría que sean utilizados por usuarios que requieren una mayor seguridad, tales como: autobuses escolares, camiones que transportan materiales peligrosos, camiones pesados, entre otros (USDT, 2002). Por otra parte, la cercanía con la Estación del tren hace necesaria la colocación de los dispositivos que brinden la mayor seguridad posible en estos cruces. Igualmente, la distancia de visibilidad se encuentra limitada para ambos cruces (Figura 75 y 76) y no es posible eliminar estos obstáculos porque implicaría un impacto económico y social elevado.

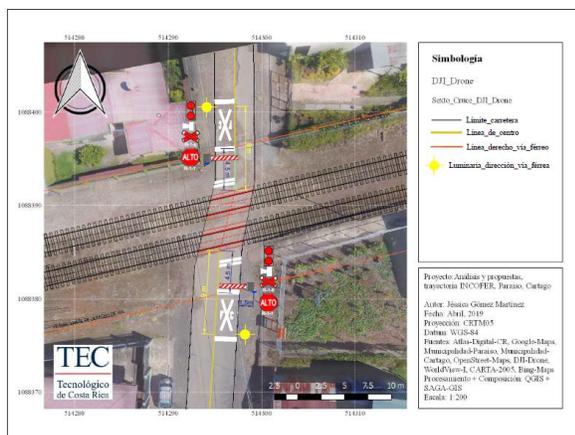


Figura 82b. Propuesta de señalización pasiva-activa para el cruce 6, en Paraíso (Anexo 4).
Fuente. Elaboración propia, QGIS y Autodesk.

La iluminación en cada cruce, se coloca a 9 m de los rieles más cercanos, como se puede observar en las figuras anteriores. Esto es necesario, porque cuando el TRP entre en funcionamiento se espera que opere en la noche, lo cual eleva el riesgo de colisiones en especial para los peatones. Del mismo modo, como ya se ha mencionado se tiene una distancia de visión restringida en todos los cruces, siendo esto una razón más para colocar iluminación (Wooldridge, et al., 2000).

La operación de los sistemas de señalización activa propuestos, debe ser acorde a los dispositivos instalados actualmente en la GAM (Conrado ,2019; Bravo, 2018). Esto porque se ha demostrado un funcionamiento aceptable del mismo, así como la disminución de colisiones contra el tren (INCOFER, 2019). Por otra parte, la señalización vertical y horizontal propuesta para los 6 cruces, debe apegarse a las dimensiones, colores y demás aspectos que demanda el MCDU (SIECA, 2000). Cabe recalcar, que en la señalización propuesta para los seis cruces no se colocó la señal de aproximación con el símbolo "FXC" a los 60 m mínimos del eje ferroviario (SIECA, 2000), debido a que la longitud de la calle no lo permitía. Asimismo, en las visitas de campo realizadas en la GAM, se observó que en muchos casos se colocan a 4.5 m del eje ferroviario.

Por otra parte, es importante mencionar que no existe un rango establecido de TPDA o intensidad vehicular que determine la selección del tipo de dispositivo activo en un cruce. Puesto que, la decisión sobre la señalización

activa/pasiva depende en gran medida del tipo de cruce, la geometría, topografía, entre otros aspectos que se encuentra sujetos a una evaluación de ingeniería de tránsito (WSDOT, 2013).

Respecto al costo de la señalización activa/pasiva el Cuadro 23, presenta los rangos de precios estimados de acuerdo al tipo de cruce, así como de algunos componentes del sistema de seguridad activo. Estos costos, pueden variar mucho según las circunstancias y la configuración del sistema instalado en el cruce. Sin embargo, los costos se encuentran desde los 60 000 US\$ para un cruce básico, sin considerar el uso de agujas y mínimo 100 000 US\$ para una señalización completa (incluyendo agujas) (Nadal, 2019). En síntesis y a modo general el costo total estimado para la señalización activa/pasiva de los seis cruces se encuentra entre los 400 000 US\$.

Microsimulación de la señalización Activa/Pasiva

Para observar el impacto sobre la red vial a nivel macro de la señalización activa/pasiva, se lleva a cabo una microsimulación para los seis cruces, en donde la configuración utilizada se presenta en las Figuras 83 y 84. Lo anterior, es similar a lo realizado por los autores Lin, Yang y Gao (2013); Jolovic, Stevanovic, Sajjadi y Martín (2016). No obstante, no fue posible realizar calibración y validación en vista de que no se cuenta con datos observados, debido a que el TRP no se encuentra operando actualmente.

Respecto a los resultados extraídos de VISSIM, en el caso de los cruces 1, 2, 3 y 4 del 2026 y 2050 los resultados no varían debido a que responden al desarrollo total del Residencial Los Lagos y el Condominio Arrabarará. Además, la longitud de cola máxima entre estos cuatro cruces se presenta en el segundo y corresponde a 61.55 m con demoras de 47.63 s (Cuadro 24 y 25) Por ende, el Nivel de Servicio es D, lo cual significa que las condiciones de operación se acercan al flujo inestable (SIECA, 2011). No obstante, se considera un Nivel de Servicio apropiado para una carretera local y urbana (AASHTO, 2004).

En cuanto a los cruces 5, se aumentaría un 160.10% la longitud máxima de cola en el año 2050 respecto al 2026, mientras que las demoras se aumenta un 48.56% (Cuadro 26). Lo anterior se debe al aumento del flujo vehicular proyectado entre un año y otro, ya que en el 2026 es igual 238 veh/h y para el 2050 es 526 veh/h (Cuadro 20). La longitud máxima de cola que se proyecta al año 2050 es 87.08 m con una demora de 45.77 s (Cuadro 25), lo cual implicaría una reconfiguración semafórica para la red vial aledaña a el área de estudio.

Para el cruce 6, la longitud de cola en el año 2050 se aumentaría un 119% respecto al año 2026 y las demoras un 43.09% (Cuadro 26). De la misma forma que en el cruce 5, estos aumentos se deben a que se proyecta un flujo vehicular mucho mayor para el año 2050 (Cuadro 20). La longitud máxima de cola que se proyecta al año 2050 es 96.52 m con una demora de 36.36 s (Cuadro 25), lo cual también implicaría una reconfiguración semafórica para las calles que conectan con este cruce.

El Nivel de Servicio para el cruce 5 y 6, también sufre un cambio de C a D para el año 2050, debido a los aumentos antes mencionados. Sin embargo, como ya se mencionó el nivel D se considera adecuado para una carretera de tipo cantonal (AASHTO, 2004). Cabe destacar, que las longitudes de cola máxima que se generan en los cruces debido a la señalización, se considera aceptable porque esta misma situación se presenta actualmente con la señalización activa/pasiva en la GAM. Con respecto a las demoras, es un tiempo que se encuentra dentro de lo que tarde el proceso de activación y desactivación de los dispositivos activos (Bravo, 2018).

Los Niveles de Servicio brindados por VISSIM son compatibles con lo establecido por El HCM (2011), por lo tanto, es una clasificación de uso confiable. Asimismo, es preciso mencionar que al utilizarse una versión estudiantil se tienen ciertas limitaciones de uso que afecta a los resultados obtenidos, aunado a las desventajas que presenta el software, a saber, (i) no es un software de código abierto, esto quiere decir que se desconoce cómo se calculan los resultados arrojados por este, (ii) requiere una preparación y calibración del modo que consume mayor tiempo, entre otras (Maciejewski, 2010). En consecuencia, es recomendable el uso de softwares más superiores como lo es SUMO, el

cual es una plataforma abierta que permite intervenir el código y simular cualquier situación (SUMO, 2015).

Conceptos de intervenciones viales

La justificación de la desnivelación de calles o las líneas férreas, resulta de la combinación de varios factores y no únicamente depende del volumen vehicular que se presente en un cruce, aunque se considera una variable importante. A continuación, se aplican criterios establecidos por algunos autores de forma tal que se concluya si es necesario separar el eje vial y ferroviario en los cruces 5 y 6 de Paraíso, debido a que son los cruces con mayor densidad poblacional y volumen vehicular.

La AASHTO (2011), señala algunas condiciones que indican la necesidad de una desnivelación (i) congestión intolerable en los cruces, (ii) frecuencia desproporcionada de colisiones graves en los cruces a nivel, (iii) la topografía del sitio favorece una desnivelación, (iv) se beneficia al usuario puesto que los costos generales son muy superiores de los cruces con funcionamiento ininterrumpido y (v) un orden de volumen de tráfico elevado.

La Autoridad Metropolitana de Transporte (2003), establece como fase preliminar utilizar el nomograma de la Figura 19 para determinar en cuál zona se encuentra el cruce de análisis. En este caso el cruce 5 y 6 se ubican en la zona verde (A nivel debería ser factible), esto porque si el TRP opera cada 5 minutos (IDOM, 2018) en una hora estarían funcionando 12 trenes por dirección y para estos cruces el volumen vehicular ronda los 300 veh/h por carril, para el año 2050 (Cuadro 20). La segunda metodología sobre la fase de análisis más detallado indica que como la selección inicial fue que a nivel debería ser factible, entonces se propone como resultado de este análisis la "Disposición preliminar a nivel". Sin embargo, es necesario llevar a cabo un análisis de colas y de seguridad, para determinar la señalización de tráfico que se requiere.

La tercera metodología de la fase de verificación consiste en realizar estudios de ingeniería preliminar, simulaciones, estudios de seguridad, entre otros, que permitan comprobar que con

señalización se puede controlar el funcionamiento del tráfico de manera aceptable. Por lo tanto, con los resultados obtenidos de las simulaciones para el año 2050, con señalización activa/pasiva (Cuadro 25), se concluye que aunque las colas y demoras aumentan, se consideran aceptables para ser tratar los cruces 5 y 6 a nivel.

En el EIV) elaborado por la compañía IDOM (2018), determina criterios de evaluación para que de manera referencial se establezca el proceso a seguir en el análisis de cruces ferroviarios:

- **Volumen de tránsito < 1.000 veh. /h:** no requiere estudio.
- **Volumen de tránsito entre 1.000 y 2.000 veh. /h:** requiere de estudio de microsimulación.
- **Volumen de tránsito > 2.000 veh. /h:** es necesario desnivelar la intersección.

Por lo anterior y con base en estos criterios, en el caso de los cruces 5 y 6 con flujos vehiculares menores a 600 veh/h para el año 2050 (Cuadro 23), no se requeriría de un estudio de tránsito.

No obstante, dado que (i) se espera que Paraíso represente un nodo intermodal importante de transporte de pasajeros en el sentido Este-Oeste a lo largo de la GAM, (ii) que al mismo tiempo y de acuerdo al Uso de Suelo que actualmente existe en el área inmediata de los cruces 5 y 6 de Paraíso (Zona residencial alta densidad), (iii) tomando en cuenta que con la nueva propuesta del Plan Regulador se potenciará un importante crecimiento urbano principalmente hacia el Norte de los cruces 5 y 6, (iv) todo esto aunado a la posible continuación del sistema ferroviario hasta el cantón de Turrialba (TRP); se toma la decisión de profundizar en el estudio de una potencial desnivelación para estos cruces a nivel conceptual, sin limitarse exclusivamente a criterios cuantitativos ligados a volúmenes de tránsito. Por lo tanto, se analizan a nivel conceptual (i) la desnivelación de las calles aledañas a los cruces 5 y 6 en el sentido Norte-Sur y (ii) la desnivelación de un tramo del eje ferroviario en el sentido Este-Oeste.

Desnivelación de la red vial

Concepto elevación de la red vial

Este concepto implica la elevación de Calle 12 (Cruce 5) y Calle 10 (Cruce 6) (Figura 85) sobre las líneas férreas en reflejo del análisis realizado por los autores MNDT (2016) y WSDOT (2012), los cuales llevan a cabo un estudio a nivel conceptual de los efectos que implica elevar ciertas calles sobre el eje ferroviario, con miras a mejorar la seguridad de los usuarios en los cruces de ferrocarriles.

La construcción de este concepto involucraría una cantidad importante de expropiaciones como se puede observar en la Figura 86b, que corresponde a 30 propiedades en Calle 12 y 50 en Calle 10, es decir, un total de 28729.51 m² aproximadamente. Lo anterior, se debe a que se dispone de un derecho de vía reducido para llevar a cabo un proyecto de esta magnitud, a saber, para la Calle 12 es igual a 4.2 m y Calle 10 corresponde a 4.95 m.

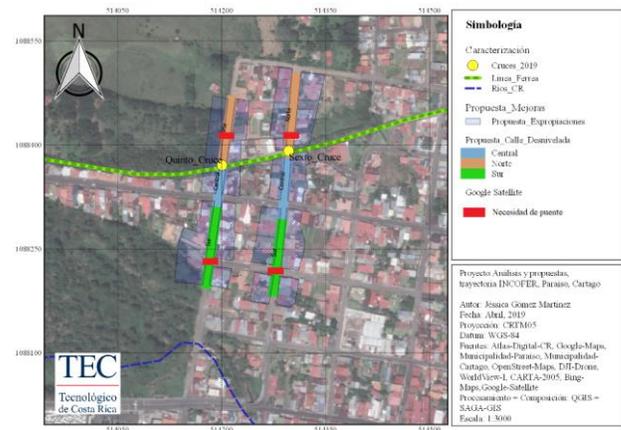


Figura 86b. Propuesta de desnivelación superior de las calles 10 y 12, en Paraíso (Anexo 2).

Fuente. Elaboración propia, QGIS.

Por otra parte, se inhabilita el acceso a 105 residencias que se encuentran inmediatas a las Calles 12 y 10, debido a que se proponen 225 m y 205 m de muro de contención, respectivamente (Cuadro 27). Aunado a esto es necesaria la construcción de cuatro puentes que permitan el acceso en Avenida 3 y en Avenida 7 (Figura 85). Todo lo anterior, resulta en una alta elevación del costo final en caso de llevar a cabo este concepto.

Para la desnivelación superior de la Calle 12, sería necesario elevar la vía hasta los 1361.5 m a partir del nivel de las líneas férreas en el cruce 5, es decir, desde los 1354.5 m (Figura 87b). Por otro lado, la Calle 10 alcanzaría una altura de 1360.5 m tomando como base el nivel del eje ferroviario en el cruce 6 (1353.5 m) (Figura 88b). Esto se debe a que se requieren 7 m de altura libre para el paso del TRP por debajo del puente elevado. (IDOM, 2018).

En cuanto a la topografía, en los perfiles longitudinales se puede apreciar la irregularidad que existe en los tramos de análisis, debido a que se tienen valles y colinas naturales. Para la Calle 12 (cruce 5), en la rampa hacia el Sur se presenta una colina que favorece la construcción de la misma, sin embargo, se debe realizar un corte de material. Por el contrario, hacia el Norte es necesario colocar relleno a razón de que se encuentra un valle en ese tramo del terreno (Figura 87b). Respecto a la Calle 10 (cruce 6), existe una situación similar en cuanto a la presencia de valles y colinas naturales; hacia el Norte y Sur se requeriría un relleno de material por completo, como resultado de la irregularidad topográfica (Figura 88b).

Asimismo, las longitudes horizontales de las rampas son resultado de las pendientes aceptables para los vehículos en este tipo de pasos elevados, la cual se encuentra entre 6%-8% para velocidad menores a los 40 km/h (SIECA, 2013). Cabe recalcar, que la cota resultante en el extremo Norte para la rampa de aproximación en Calle 10, se encuentra limitada por el derecho de vía, es decir, en caso de continuar la extensión de la misma se estaría invadiendo propiedades privadas en el sector Norte (Figura 86b y 88b). Para la calle 12, se presenta una situación similar, en este caso si se continuara la extensión de la rampa Norte, los vehículos se encontrarían con un valle seguido de la rampa elevada (Figura 87b).

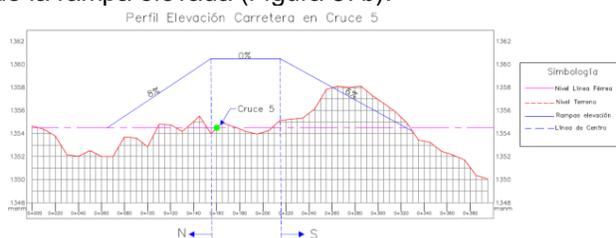


Figura 87b. Perfil longitudinal de la propuesta de elevación en el Cruce 5 (Calle 12), en Paraíso (Anexo 5). Fuente. Elaboración propia, Civil 3D.

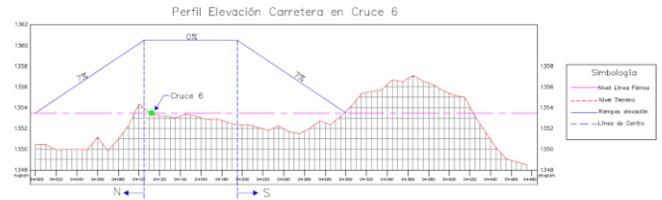


Figura 88b. Perfil longitudinal de la propuesta de elevación en el Cruce 6 (Calle 10), en Paraíso (Anexo 5). Fuente. Elaboración propia, Civil 3D.

Por último, la construcción de este tipo de infraestructura implica el cierre de muchas calles aledañas a los cruces 5 y 6 (Cuadro 27), y la afectación en la dinámica general del centro de Paraíso, ya que este sector presentará un crecimiento urbano importante. En síntesis, este concepto de elevación no se considera factible por los efectos potenciales que ocasionarían en este cantón, así pues, se recomienda analizar la opción de desnivelación subterránea de las calles a modo de identificar si brindaría mayores beneficios a la población en general.

Concepto desnivelación subterránea de la red vial

La propuesta de desnivelación subterránea de las Calle 12 (Cruce 5) y Calle 10 (Cruce 6) (Figura 89b) bajo las líneas férreas es similar al estudio realizado por los autores WSDOT (2012), los cuales llevan a cabo un estudio a nivel conceptual para identificar el impacto que conlleva la desnivelación de una calle bajo el eje ferroviario.

Para este concepto, sería necesario reubicar 35 residencias en Calle 12 y 60 en Calle 10, para un total de 32936.62 m² de expropiaciones (Figura 89b y Cuadro 28). Asimismo, durante la construcción de estos túneles se alteraría el acceso a 130 residentes, cerrando Calle 10, Calle 12, Avenida 7, un tramo de Calle Loría, de la Avenida 1 y 3 (Figura 85), lo cual representa un enorme impacto en la dinámica del cantón y una mayor inversión inicial por parte de las entidades públicas, en el caso de las reubicaciones.



Figura 89b. Propuesta de desnivelación subterránea de las calles 10 y 12, en Paraíso (Anexo 2). Fuente. Elaboración propia, QGIS.

Para el túnel de la Calle 12, sería necesario bajar la vía hasta los 1349.5 m a partir del nivel de las líneas férreas en el cruce 5, es decir, desde los 1354.5 m (Figura 90b). Por otro lado, la Calle 10 alcanzaría una profundidad de 1348.5 m tomando como base el nivel del eje ferroviario en el cruce 6 (1353.5 m) (Figura 91b). Esto se debe a que se requieren 5 m de altura libre desde el nivel de calzada hasta la parte inferior del puente (SIECA, 2013).

Respecto a la topografía, para Calle 12 y 10 queda evidente en los perfiles longitudinales que los valles naturales que existen a lo largo del eje vial, no permitirían la construcción de los túneles por el faltante de material que presenta (Figura 90b y 91b). Cabe mencionar, que la extensión de los túneles responden a (i) las pendientes naturales que permite el terreno, (ii) para dar continuidad a la red vial en sentido Este-Oeste y (iii) para drenar el agua a la Quebrada Pollo.

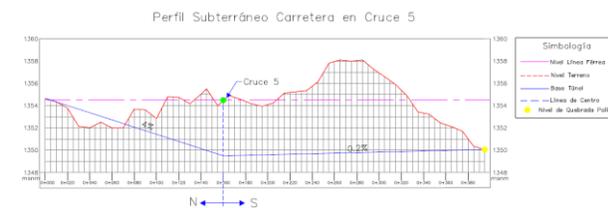


Figura 90b. Perfil longitudinal de la propuesta subterránea en el Cruce 5 (Calle 12), en Paraíso (Anexo 5). Fuente. Elaboración propia, Civil 3D.



Figura 91b. Perfil longitudinal de la propuesta subterránea en el Cruce 6 (Calle 10), en Paraíso (Anexo 5). Fuente. Elaboración propia, Civil 3D.

Otro factor a considerar es el manejo del agua pluvial, donde para el cruce 5, resultaría sumamente complejo (i) el drenaje de las aguas de lluvias y (ii) el riesgo de inundación por avenidas extremas de la quebrada Pollo. En el primer caso, los drenajes que colecten la lluvia que precipita directamente sobre el túnel, deberían llevar el flujo hasta un nivel por debajo de 1349 m (Figura 90b). A partir de ese punto, el flujo tendría que ser almacenado parcialmente en una bahía de equalización y almacenamiento hidráulico, para finalmente ser bombeado hasta la quebrada Pollo. Lo anterior impactaría considerablemente el costo capital de la solución, incurriendo en altos gastos de operación y mantenimiento de todos los equipos electromecánicos y de control necesarios para que tal sistema funcione de forma confiable. Lo anterior implicaría igualmente plantas electro-diesel de respaldo en caso de fallo del sistema eléctrico.

El segundo caso es todavía más complejo y tiene que ver con el riesgo de avenidas máximas de la quebrada Pollo que pudiesen superar la cota 1350 (Figura 90b) e inevitablemente inundar todo el túnel con el daño material y humano que ello podría considerar, máxime el potencial de tener vehículos atrapados en una situación de alto riesgo. Este escenario es evidentemente mucho más drástico para el cruce 5 que para el cruce 6, dada la cercanía de la quebrada Pollo. Si bien es cierto se necesitan estudios específicos para cuantificar el riesgo por inundación, tal amenaza en los cruces 5 y 6 supera por mucho el beneficio que tales túneles pudieran tener sobre la dinámica vehicular, ferroviaria y el beneficio de la población en general. En consecuencia, se recomienda desechar este concepto y abordar con más elementos de juicio la desnivelación de la línea férrea.

Desnivelación de las líneas férreas

La elevación de un tramo del eje ferroviario sobre los cruces 5 y 6, se propone como una solución para eliminar los atrasos que se puedan presentar cuando el TRP inicie su operación en Paraíso, así como aumentar la seguridad de todos los usuarios; siguiendo la línea realizada por los autores WSDOT, en el (2012); Kenter, R (2010).

La desnivelación de las vías férreas, presentaría la gran ventaja de que no sería necesaria la reubicación de los residentes aledaños al derecho de vía (Figura 92b). Asimismo, en la actualidad a lo largo de este tramo del derecho de vía no existen negocios comerciales ni industriales, solamente existe un vecindario residencial. Sin embargo, cabe mencionar que esta situación puede cambiar en el futuro por el crecimiento urbano que se espera en el área.



Figura 92b. Propuesta de elevación de las líneas férreas sobre cruces 5 y 6, en Paraíso (Anexo 2). Fuente. Elaboración propia, QGIS.

Además, la desnivelación de las líneas férreas sobre los cruces 5 y 6 se favorecería enormemente por la topografía natural, puesto que presenta regularidad descendiente en el sentido Oeste-Este. Por otro lado, la pendiente propuesta para la rampa de aproximación hacia el Este es del 5%, debido a que la pendiente máxima permisible por el TRP es del 6% (IDOM, 2018). En cuanto a la altura de las rampas, esta se eleva desde los 1354.5 m hasta los 1359.5 m, es decir, 5 m desde el nivel de terreno del cruce 5 (Figura 93b).

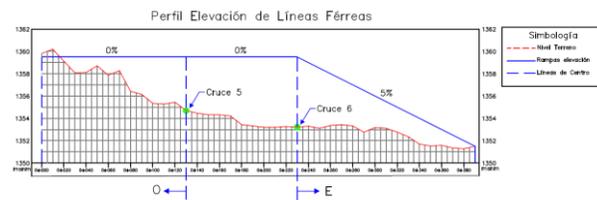


Figura 93b. Perfil longitudinal elevación de las líneas férreas sobre cruces 5 y 6, en Paraíso (Anexo 5). Fuente. Elaboración propia, Civil 3D.

En cuanto al tema de seguridad, se prevé que la desnivelación de las líneas férreas reduzca de manera considerable la incidencia de colisiones que se puedan generar cuando el TRP se encuentre en operación, evitando pérdidas humanas y materiales.

No obstante, la elevación de las líneas férreas implica la desnivelación de la Estación del tren, ubicada inmediatamente al Este del cruce 6 (Figura 85), siendo necesaria la construcción de rampas de acceso peatonales, que contribuyen al costo final de esta intervención vial, similar a los estudios PVPC (2011); TRAFIKVERKET (2012) y WMATA (2017).

Conceptos con diferentes sistemas constructivos

Para la propuesta de desnivelar las líneas férreas sobre los cruces 5 y 6, se presentan dos conceptos relacionados con el sistema constructivo a utilizar y el efecto que podría ocasionar cada uno. En consecuencia, el primer concepto analiza los efectos potenciales de construir las rampas de aproximación mediante muros de contención. Mientras que el segundo, propone utilizar un sistema constructivo compuesto por vigas y pilas para las rampas, las cuales a su vez tienen una dimensión de 160 m al Este y 130 m al Oeste sobre el eje ferroviario (Figura 92b).

En el caso de los muros de contención, mantendría las conexiones de la red vial. No obstante, al utilizar este sistema constructivo ocasionaría alteraciones en el acceso a 10 residencias aledañas al derecho de vía ferroviario (Cuadro 29). Por el contrario, el sistema modular

tiene la facilidad de permitir mayor acceso a los peatones y vehículos que residan en los alrededores de los cruces 5 y 6 (Cuadro 30).

Además, durante la construcción lo más probable es que el tráfico de las calles no se vea afectado directamente, excepto durante la colocación de la estructura para el puente sobre el cruce de la Calle 12 y 10 con las vías férreas. A pesar de ello, el acceso a las propiedades frente al derecho de vía del tren se verá interrumpido por la presencia de maquinaria y materiales durante el proceso constructivo, para ambos sistemas propuestos. Cabe destacar, que el segundo concepto en comparación con el primero, reduciría el plazo de construcción por la facilidad modular que presente este sistema.

Igualmente, como parte de la construcción, será necesario reubicar varios servicios públicos como electricidad, fibra óptica, gas, agua y alcantarillado que se encuentran instalados a lo largo de las Calles 12 y 10, como en el derecho de vía del ferrocarril. Los impactos específicos se identificarían durante el proceso de diseño de ingeniería si alguno de los conceptos se desarrollara aún más. Durante la construcción, la mayor parte del trabajo se realizaría dentro del derecho de vía del ferrocarril. Sin embargo, los trabajos en los cruces a intervenir podrían causar algunos retrasos adicionales para los servicios de emergencia.

Respecto al impacto por ruido, actualmente es causado principalmente por el tráfico en las Calles 12 y 10, adicionalmente por las carreteras aledañas al área bajo estudio. En consecuencia, los niveles de ruido son bajos en el presente, debido a (i) el volumen vehicular en cada cruce es poco y (ii) aún no se encuentra operando el tren en este cantón. Sin embargo, se anticipa que los niveles de ruido típicos aumenten de forma considerable con la llegada del tren y por el aumento del flujo vehicular.

El ruido impactaría de diferente manera a los residentes aledaños, dependiendo del método constructivo que se aplique. Para el primer concepto, el ruido probablemente disminuiría para varias propiedades porque el muro de retención actuaría como una barrera (Cuadro 29). El segundo concepto, conlleva que los residentes cercanos se vean mayormente afectados por el ruido, al no existir la barrera sónica que representan los muros de contención en el concepto uno (Cuadro 30).

Aunado a lo anterior, la desnivelación con cualquiera de los dos sistemas constructivos, disminuiría considerablemente los niveles de ruido porque se elimina la fuente de ruido que implica el equipo de advertencia activo, necesario para un cruce a nivel. No obstante, es importante recalcar que al considerar el funcionamiento de trenes eléctricos, los niveles de ruido serían menores en comparación con el tren de combustible.

En relación con el impacto en la calidad visual, este tipo de infraestructura implica que algunas vistas en el área inmediata deban incluir la nueva estructura elevada. Del mismo modo, la topografía donde se ubica el tramo a desnivelar, es regular con una pendiente natural descendiente hacia el Este (Figura 93), lo que impacta directamente el paisajismo para los residentes que se localizan en este sentido.

En caso de aplicarse el primer concepto, la vista hacia el Norte y Sur quedaría totalmente bloqueada para los residentes, debido a que los muros de contención se comportarían como una barrera cortando los barrios adyacentes (Cuadro 29). Por otra parte, el segundo concepto permitiría una mayor visibilidad y acceso hacia el Norte o Sur, en especial para las propiedades que ubican frente al derecho de vía ferroviario (Cuadro 30). En síntesis, ambos conceptos afectarían el paisajismo que existe en la actualidad, debido a que este paso desnivelado se comportaría como una estructura de techo que limita la luz natural y la visibilidad, como resultado del área tan reducida que se presenta por el crecimiento urbano.

Igualmente, los muros de contención crean barreras divisorias entre el sector Norte y Sur, que a largo plazo podría afectar la socioeconomía del área. Mientras que el concreto, podría causar la aparición de zonas marginales, desarrollo de actividades ilícitas o delincuencia como se ha observado en otros países (IDOM, 2018).

Otro factor importante a tomar en cuenta para el análisis de estos conceptos es la geología y los suelos, lo cual como ya se ha mencionado, para tener conocimiento sobre el suelo específico en el sitio e información geológica se obtendrían durante el diseño preliminar si algún concepto es avanzado, hasta el momento únicamente se cuenta con una idea muy general de la composición del suelo en el área (Cuadro 10). Asimismo, se debe tomar en cuenta que el país el

altamente sísmico, por lo tanto, la estructura se deberá diseñar para cumplir con las normas de seguridad pertinentes.

Con respecto al impacto sobre la naturaleza, ninguno de los conceptos propuestos para la desnivelación de la vía férrea afectaría humedales o ríos, puesto que en el tramo que se propone su construcción no se encuentra ningún río o quebrada cercana. Por otra parte, bajo el enfoque presuntivo, es probable que los flujos o la calidad del agua no se vean afectados. En cuanto a la vida silvestre, el área aledaña de los cruces 5 y 6 proporciona un hábitat deficiente para la mayoría de la vida silvestre, excepto aquellos que se han adaptado a las áreas urbanas. La vida silvestre que probablemente se observe en el área incluye aves y roedores. Únicamente se afectarían unos árboles cercanos al derecho de vía, en caso de llevar a cabo alguno de los conceptos expuestos. Por lo tanto, la construcción de estos conceptos no cambiaría las condiciones del hábitat para la vida silvestre o los peces (Cuadro 29 y 30).

Por último, el sistema de vigas y pilas (segundo concepto) se vería sumamente favorecido por la topografía natural del sitio, debido a que no sería necesario la colocación de material de relleno corte, reduciendo significativamente el costo de la obra en caso de llevarse a cabo. Asociado a que también beneficia en la reducción de pilas hacia el sentido Oeste, donde se tiene una rampa sin pendiente (Figura 93). Caso contrario con muros de contención, puesto que se requeriría rellenar de material, en especial la rampa de aproximación hacia el Este (Figura 93b), elevando considerablemente la inversión necesaria.

La microsimulación de esta desnivelación, se lleva a cabo con el fin de comparar este concepto con la señalización activa/pasiva y de esta manera cuantificar el impacto que tendría sobre el flujo vehicular la aplicación de este concepto a futuro, en los cruces 5 y 6 de Paraíso (Figura 94).

Con la elevación las líneas férreas en el tramo de estudio, se logra obtener un Nivel de Servicio A para el año 2026 y 2050, lo que indica que se obtendría un flujo libre de vehículos, con demoras menores al 35% del total de tiempo de viaje (SIECA, 2011). De la misma forma, no se presentan colas y las demoras serán inferiores a 1 s para el año 2026, mientras que para el 2050 serán menores a los 5 s (Cuadro 31 y 32). El error relativo entre tales demoras corresponde a un aumento del 959.26%, respecto al 2026, para el cruce 6 donde la estimación del flujo es mayor al 2050 (Cuadro 33).

Con base en todos los resultados obtenidos a través de VISSIM, se aprecia que la desnivelación eliminaría por completo el congestionamiento vehicular que se podría presentar con la señalización activa/pasiva para los años proyectados. No obstante, se concluye que tales demoras y colas aplicando la señalización a nivel en los cruces 5 y 6, se consideran aceptables y que no justifican la desnivelación de las vías férreas, por lo menos para el año 2050 (Cuadro 25). En consecuencia, es recomendable (i) dar seguimiento al comportamiento del flujo vehicular con la llegada del TRP, en especial los cruces 5 y 6, (ii) estimar la frecuencia de colisiones con el tren que se puedan presentar, una vez instalada la señalización a nivel, y (iii) realizar un estudio de ingeniería de tránsito detallado.

Microsimulación de la desnivelación de las líneas férreas

Opción viable para la desnivelación

El concepto que se propone como solución en caso de considerar una intervención vial a futuro, es la elevación de las líneas férreas sobre los

cruces 5 y 6 con el sistema constructivo conformado por vigas y pilas (Figura 97b). Esto se debe a que los conceptos de desnivelación de la red vial tanto elevada como subterránea,

presenta enormes inconvenientes como lo es (i) la irregularidad topográfica del terreno natural en el sentido Norte-Sur, (ii) la cantidad de propiedades reubicadas, (iii) el impacto general en la dinámica vial en el centro de Paraíso, (iv) manejo de las aguas pluviales para la desnivelación subterránea, (v) la dimensión que implican los conceptos, y (vi) el costo de capital y mantenimiento. Con todo lo anterior, se concluye que estos conceptos muestran mayores desventajas en comparación a los beneficios que pueden aportar a la movilidad de los habitantes, en Paraíso (Cuadro 7).



Figura 97b. Propuesta más factible de desnivelación de las vías del tren.

Fuente. Elaboración propia en SketchUp Pro, Google Earth y Paint 3D.

Asimismo, el concepto de elevar el eje ferroviario con muros de contención produce efectos potenciales en cuando a (i) calidad visual, (ii) alteración al traslado de peatones y acceso a los residentes colindantes, (iii) alta necesidad de material de relleno debido a la topografía natural, (iv) costo de capital y mantenimiento, (v) dificultad constructiva por ende mayor plazo de construcción, (vi) barrera divisoria entre los sectores Norte y Sur y (vii) el paisajismo en general. Por estas razones, el sistema de vigas y pilas resulta más factible en el tramo bajo análisis, y presenta mayor cantidad de beneficios a nivel constructivo, financiero y otros impactos secundarios (Cuadro 8).

Para el concepto seleccionado, se propone el sistema constructivo de vigas tipo cajón pretensadas prefabricadas sobre pilas centrales (Figura 95b), las cuales se deben elaborar en sitio por las distintas alturas que se requerirían para la rampa de aproximación hacia el Este (Figura 93b y 98b). Esto como resultado de la similitud con los casos de estudio realizados por los autores Kenter (2010); Mondorf, (2013); He, et al., (2011), Endicott, (2007); Shanmuga, (2018); IDOM (2018), quienes muestran la utilidad de este sistema en viaductos elevados alrededor del mundo.

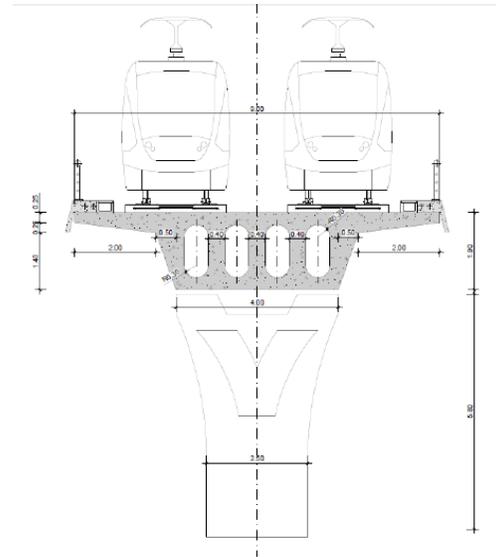


Figura 95b. Sección propuesta para el viaducto elevado. Fuente. IDOM, 2018.



Figura 98b. Propuesta más factible de desnivelación de las vías del tren, vista hacia el Oeste.

Fuente. Elaboración propia en SketchUp Pro, Google Earth y Paint 3D.

Además, la selección de la viga tipo cajón pretensada prefabricada se debe a (i) se podrían encontrar disponibles en tramos de hasta 50 m, (ii) tiene una alta resistencia a la torsión, (iii) es la propuesta en el EIV para los tramos en viaductos elevados y (iv) es la comúnmente utilizada en proyectos similares, como ya se ha mencionado. Por otro lado, para la separación entre pilas centrales, se propone una longitud de 35 m, ya que se encuentra dentro del rango establecido (Cuadro 5) y es la distancia aplicada en viaductos con sistemas constructivos similares a nivel mundial (Kenter, R (2010); Kenter (2010); Shanmuga, (2018).

Con respecto a la metodología constructiva, se propone la llamada tramo-por-tramo, a razón de que se considera el método más económico y rápido disponible para los viaductos con tramos individuales de hasta los 60

m. Este sistema utiliza segmentos prefabricados (vigas) que se colocan continuamente de un pilar a otro, con ayuda de una grúa de instalación lateral tipo cerchas. Cada uno de las vigas se coloca en almohadillas deslizantes que a su vez son las encargadas de ubicar la viga en la posición correcta. Cuando todos los segmentos o vigas están en la posición correspondiente, se conectan mediante pretensado longitudinal. Finalmente, las juntas de la cubierta se moldean, se cierran y los conductos de pretensado se inyectan. Cuando se completa el tramo, la grúa de instalación lateral tipo cerchas se mueve al siguiente tramo en el que comienza nuevamente el ciclo de construcción hasta que se completa el puente (Figura 96b) (Kenter, 2010).

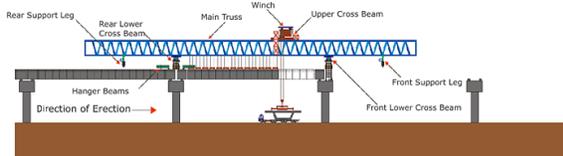


Figura 96b. Metodología de construcción propuesta, Tramo por-Tramo.
Fuente. VSL (2019)

Es importante mencionar, que el sistema constructivo y la respectiva metodología propuesta, son el resultado de una investigación a nivel conceptual, tanto nacional como internacional. En consecuencia, si se deseara llevar a cabo este concepto es necesario realizar un diseño estructural que determine la factibilidad de este sistema y la metodología antes descrita, así como la separación entre pilas que se establece para la desnivelación.

En cuanto al costo aproximado del viaducto elevado propuesto, se estima mediante una revisión de literatura a nivel mundial y nacional el costo por km (L.C.R. Logística S.A, 2017; Flyvbjerg, et al., 2008; Hoback, 2008; Kerr, et al., 2010). Por consiguiente, el valor de este tipo de infraestructura se encuentra desde los 13 m US\$ hasta costos que superan los 300 m US\$ (Cuadro 34). Tomando como base el costo por km calculado en EPTRP (L.C.R. Logística S.A, 2017), se estima de forma sumamente general y aproximado el costo del viaducto que se propone, con un valor de 5.5 m US\$ para 390 m de longitud total. Cabe destacar, que para estimar un costo como mayor precisión se requieren de estudios y diseños detallados que

no se consideran en este análisis, debido a que va más allá del alcance del presente proyecto.

En síntesis, la elevación de las líneas férreas implica un costo muy superior en comparación a la señalización activa/pasiva y a los beneficios que esta desnivelación representa en la dinámica vial de Paraíso. Por lo tanto, aunque al 2050 no se considera la desnivelación de los cruces como parte de la intervención necesaria, esta evaluación permite a las entidades pertinentes tomar una decisión informada sobre sus costos y beneficios potenciales, para su implementación a futuro.

Asimismo, si bien es cierto que el análisis de los resultados del presente estudio sugiere que la señalización activa/pasiva para los cruces 5 y 6 satisface la mayoría de los criterios cuantitativos, debe recordarse que existen una serie de factores que son considerados para finalmente tomar una decisión de intervenir un determinado cruce a través de desnivelación; que trasciende el volumen de tránsito exclusivamente. Es importante recalcar, que este tipo de decisiones son producto del análisis de un grupo de expertos en temas de ingeniería de tránsito y financiamiento y que dependen profundamente de la disponibilidad de recursos destinados a la inversión pública para este tipo de infraestructura.

Conclusiones

-En virtud de los estudios preliminares de la CNE, se determina que la quebrada Pollo y el río Blanquillo representan un potencial riesgo hidrológico que podría impactar la infraestructura, en especial aquella cercana al cruce 1 y 3.

-En la actualidad existe una ausencia generalizada en infraestructura vial, férrea y peatonal, lo único que se ha realizado hasta el momento es la limpieza del derecho de vía férreo

-El Uso de Suelo refleja los cambios sobre la administración del territorio con base en procesos de revisión y mejora continua, lo cual tiene un impacto directo con la densidad poblacional y a su vez con el flujo vehicular que interactúa con el TRP.

-El empleo y caracterización de mapas espaciales de Uso de Suelo, permite la implementación de analogías espaciales entre sectores similares, para la transferencia de parámetros entre un sitio y otro. Lo cual posibilita proyectar los cambios en la dinámica del tránsito, que de otra forma resultaría difícil de estimar.

-La topografía natural se favorece en el sentido Oeste-Este (Línea férrea) y desfavorece el sentido Norte-Sur.

-Existe una homogeneidad espacial en la aproximación de las características de los suelos, predominando el contenido de arcilla en los seis cruces bajo análisis.

-Los conteos vehiculares realizados bajo la analogía entre sitios, tomando como base de comparación el Uso de Suelo y atributos similares, se consideran estimaciones adecuadas para su posterior uso en la proyección de intensidades vehiculares y TPDA futuros en los cruces 1, 2, 3 y 4.

-Respecto a la proyección vehicular de los cruces 5 y 6, los resultados obtenidos a través de tres metodologías aplicadas son muy similares entre sí, por ende presentan una confiabilidad asociada.

-La metodología tres aplicada para la caracterización vehicular de los cruces 5 y 6, es seleccionada para el posterior planteamiento de soluciones viales, debido a que brinda el valor más elevado de intensidad vehicular y se acerca más a la realidad.

-Para los cruces 3 y 4 hay obstrucción por completo de la visibilidad, mientras que el resto de los cruces bajo análisis, de Paraíso, presentan impedimentos parciales de visión.

-Para el primer cruce se propone una combinación de señalización activa/pasiva sin incluir el sistema de agujas. Mientras que los cruces 2, 5 y 6 se equipan con el sistema activo completo (incluyendo agujas) y la respectiva señalización pasiva. Por último, los cruces 3 y 4 se conforman únicamente de señalización vertical y horizontal.

-Los costos de la señalización activa/pasiva, depende de las circunstancias y la configuración en cada uno de los cruces. No obstante, la señalización propuesta en los seis cruces tiene un costo aproximado a los 400 000 US\$.

-Según la microsimulación realizada en VISSIM sobre la señalización activa/pasiva, muestra que la longitud máxima de cola, las demoras y el Nivel de Servicio para los cruces desde el 1 hasta el 4 son apropiadas. No obstante, para el cruce 5 y 6 se tiene un aumento significativo en los parámetros ya mencionados, que implican una reconfiguración de semáforos en la red vial aledaña de Paraíso.

-Los resultados arrojados por VISSIM para la señalización a nivel de los seis cruces, indican que aunque se presenten demoras y colas, estos valores son considerablemente aceptables y confiables.

-Se toma la decisión de profundizar en el estudio de una potencial desnivelación para los cruces 5 y 6, debido a que se estiman con un mayor flujo vehicular para el año 2050 y porque se potenciará un importante crecimiento urbano principalmente hacia el Norte y Sur de estos cruces. Lo anterior, en comparación a los cruces 1, 2, 3 y 4, de Paraíso.

-Se analizan a nivel conceptual (i) la desnivelación de las calles aledañas a los cruces 5 y 6 en el sentido Norte-Sur y (ii) la desnivelación de un tramo del eje ferroviario en el sentido Este-Oeste, sin limitarse exclusivamente a criterios cuantitativos ligados a volúmenes de tránsito.

-El concepto de elevación de la red vial sobre los cruces 5 y 6, se desecha debido a (i) la irregularidad topográfica que existe en el sentido Norte-Sur, (ii) la cantidad de expropiaciones, y (iii) los efectos potenciales que implican este concepto en la dinámica vial de Paraíso.

-El concepto de desnivelación subterránea de la red vial se descarta como una solución para los cruces 5 y 6 por (i) la amenaza a inundación que presenta, (ii) la irregularidad en la topografía natural que no permitiría la construcción de túneles, (iii) la cantidad de expropiaciones, (iv) el impacto en la dinámica general de Paraíso 7 y (v)

elevado costo de un sistema de drenaje para ambos cruces.

-La desnivelación de las líneas férreas es factible porque (i) la topografía natural favorece la desnivelación en el sentido Este-Oeste, (ii) no se requiere reubicar a los residentes y (iii) no se afecta la dinámica del cantón de Paraíso. No obstante, sería necesaria la elevación de estación, aumentan el costo de este concepto.

-Se desecha el concepto dos que corresponde a la desnivelación de las líneas férreas, por las desventajas que implica su construcción en cuanto a (i) ocasionaría alteraciones en los accesos a las propiedades colindante, (ii) impactaría enormemente el paisajismo en la zona, (iii) representa una barrera que separaría los vecindarios, (iv) mayor duración constructiva y (v) mayores costos por la colocación de material de relleno.

-La elevación de las líneas férreas con sistema de vigas y pilas es el más factible por (i) la topografía natural favorece este sistema, (ii) no genera un impacto visual de gran magnitud, (iii) facilidad constructiva al ser modular, (iv) permite la conexión Norte-Sur a lo largo de las rampas, (v) menores costos en comparación a los muros de contención y (vi) no altera el acceso a los residentes aledaños.

-Con base en todos los resultados obtenidos a través de VISSIM, se concluye que la desnivelación eliminaría por completo el congestionamiento vehicular que se podría presentar con la señalización activa/pasiva para los años proyectados.

-Las demoras y colas aplicando la señalización a nivel en los cruces 5 y 6, se consideran aceptables y no justifican la desnivelación de las vías férreas, por lo menos para el año 2050.

-La propuesta de intervención vial seleccionada es la de elevar las líneas férreas mediante un sistema de vigas y pilas, al ser el concepto que más se adecua a las condiciones y necesidades del sitio.

-Se propone el sistema constructivo de vigas tipo cajón pretensadas prefabricadas sobre pilas centrales, para elevar las vías férreas. Esto como resultado de la investigación realiza tanto nacional como internacional.

-Con respecto a la metodología constructiva para elevación de las líneas férreas, se propone la llamada tramo-por-tramo, a razón de que se considera el método más económico y rápido, disponible para los viaductos con tramos individuales de hasta los 60 m.

-Se estima de forma general y aproximado el costo del viaducto que se propone, con un valor de 5.5 m US\$ para 390 m de longitud total.

-La elevación de las líneas férreas implica un costo muy superior en comparación a la señalización activa/pasiva y a los beneficios que esta desnivelación representa en la dinámica vial de Paraíso. Sin embargo, se considera una opción viable a implementar a futuro.

-El análisis de los resultados del presente estudio sugiere que la señalización activa/pasiva para los cruces 5 y 6 satisface la mayoría de los criterios cuantitativos. No obstante, existen una serie de factores que son considerados para finalmente tomar una decisión de intervenir un determinado cruce a través de desnivelación.

-La decisión de desnivelar un cruce es producto del análisis de un grupo de expertos en temas de ingeniería de tránsito y financiamiento y que dependen profundamente de la disponibilidad de recursos destinados a la inversión pública para este tipo de infraestructura.

-El análisis y propuestas de soluciones se realiza con una velocidad promedio del TRP igual a 40 km/h, en caso de que esta varíe en el futuro se debe actualizar las soluciones propuestas. Lo anterior, debido a que en caso de una mayor velocidad las soluciones en cuanto a señalización se impactarían enormemente.

Recomendaciones

-Es necesario desarrollar estudios hidrológicos e hidrodinámicos específicos de cada cauce, con el propósito de dimensionar adecuadamente las medidas de protección necesarias, que garanticen un alto nivel de resiliencia ante el posible impacto de Cambio Climático futuro.

-Se recomienda un levantamiento detallado de cada cauce con el fin de definir posibles secciones invadidas ilegalmente y que por ende potencian la disminución de la capacidad natural de flujo del cauce.

-En relación al mapeo de clases de suelos que predominan en el cantón central de Paraíso, es deseable llevar a cabo un estudio de estabilidad de taludes mediante la aplicación de modelos de pendiente infinita, lo cuales permiten construir mapas espaciales cuantitativos de vulnerabilidad para identificar secciones propensas a deslizamientos a lo largo del eje ferroviario. Entre tales modelos destaca el SINMAP (Pack et al., 2005).

-Se recomienda llevar a cabo un replanteamiento y estudio de topografía, catastro y geometría de todo el derecho de vía férreo, con el fin de identificar la factibilidad del TRP en esta área de estudio.

-Hacer un diseño geométrico de las calles que intersecan el eje ferroviario, a modo de construir aceras y ciclovías que permitan un tránsito seguro de todos los usuarios.

-Realizar análisis estructurales detallados a los puentes existentes, de tal forma que se determine su reutilización parcial para el TRP.

-Es deseable validar a través del tiempo, la metodología de transferencia de parámetros basado en la analogía espacial de Uso de Suelo entre los sectores involucrados. De tal forma, que pueda ser replicada en el resto de la red ferroviaria.

-Respecto a la topografía en el área inmediata de estudio, se recomienda promover las soluciones de intervenciones viales en el sentido Oeste-Este.

-Realizar estudios geotécnicos específicos, con el fin de cuantificar detalladamente la capacidad de soporte a lo largo del derecho de vía ferroviario.

-Se recomienda la validación a nivel instrumental, en el futuro, de las analogías realizadas para estimar la proyección vehicular en los seis cruces. Con el fin, de que se puedan replicar a lo largo del eje ferroviario cuando el TRP entre en operación.

-Respecto a las distancias de visibilidad, es recomendable que se realice un catastro detallado de las líneas de visión para cada cruce, de forma tal que se pueda maximizar la visibilidad sin que se comprometa la seguridad de los usuarios.

-Se recomienda darle seguimiento a las distancias de visibilidad, de manera que en el futuro no se vean intervenidas por obstáculos, que al momento de realizar los estudios no existían. Con el propósito de evitar un impacto sobre la medida de seguridad tomada para los cruces.

-Realizar un Estudio de Ingeniería de tránsito más detallado, con el objetivo de considerar otros aspectos y cambios que se puedan presentar al momento que el TRP vaya a operar.

-Se recomienda dar seguimiento al potencial uso de las fincas ubicadas en los cruces 3 y 4, con el fin de establecer un cambio futuro en el tipo de señalización.

-Invitar al mayor número de proveedores nacionales e internacionales, con el propósito de desarrollar tecnología propia y de esta forma reducir la dependencia y los costos.

-Se recomienda utilizar el software SUMO, de forma tal que se pueda extender el análisis de la microsimulación para dar seguimiento a través del tiempo.

-Realizar mayor caracterización de campo y observaciones experimentales, que permitan calibrar y validar las microsimulaciones llevadas a cabo durante este proyecto, de forma tal que estas tengan más validez a lo largo del tiempo.

-Es recomendable dar seguimiento a las colisiones con el TRP que pueden presentar, una vez instalada la señalización activa/pasiva a nivel, en caso de llevar a cabo esta solución. Con la finalidad, de valorar la opción de desnivelar los cruces 5 y 6 en el futuro.

-Realizar estudios geotécnicos, estructurales y de integración urbana, con la finalidad de seleccionar el sistema y metodología constructiva que más se adecue a las condiciones y necesidades del sector.

-Se recomienda considerar la extensión hasta el cruce con la Ruta Nacional 10, de la rampa de aproximación Este. Lo anterior, con objetivo de prevenir inconvenientes en el futuro por el alto volumen vehicular que presenta este cruce, el cual se podría ver afectado cuando el TRP continúe hasta Turrialba.

-Es recomendable llevar a cabo un Estudio de Ingeniería que evalúe la posibilidad de desnivelar

un cruce. De tal forma que se consideren otros factores que van más allá de solamente criterios cuantitativos, como lo es el volumen de tránsito. Con el fin, de tomar la decisión más segura y que aporte mayores beneficios a los usuarios.

-Es recomendable considerar la opción de analizar la desnivelación tanto de la red vial como las líneas férreas, debido a que se ha observado un funcionamiento óptimo y menor costo en la implementación de otros países.

-Se le recomienda al Municipio de Paraíso el crecimiento urbano vertical en las zonas aledañas al derecho de vía férreo, con el objetivo de aprovechar al máximo la mancha urbana y mejorar la visibilidad para los vehículos en los cruces.

-Llevar a cabo un análisis detallado sobre las fallas sísmicas que podrían representar una potencial amenaza a las soluciones propuestas a lo largo del proyecto, con la finalidad de tomar las medidas de seguridad necesarias.

-Analizar y comparar el costo/beneficio de la construcción de marginales a lo largo del tramo en estudio, a modo de determinar la solución más factible y de menor costo.

Anexos

- 1) Diagramas de flujo (Gómez, 2019).
- 2) Mapas espaciales (Gómez, 2019).
- 3) Mapas distancias de visibilidad (Gómez, 2019).
- 4) Mapas propuestas de señalización activa/pasiva (Gómez, 2019).
- 5) Perfiles longitudinales propuestas de soluciones para desnivelación (Gómez, 2019).
- 6) Plantilla de conteos vehiculares (Gómez, 2019).

Referencias

- AASHTO. (2004). *A Guide for Achieving Flexibility in Highway Design*. Washington, D.C. Recuperado de: www.transportation.org/e-desastres-menuprincipal-93/mapas-de-amenazas/cat_view/276-mapas-de-amenazas/283-cartago/451-paraiso
- AAHSTO. (2011). *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*. Washington, DC
- Applus Velosi. (2019). Nivel de Seguridad Integral (SIL). Recuperado de [http://www.applusvelosi.com/download/1340231009680-Nivel_de_Seguridad_Integral_\(SIL\).pdf](http://www.applusvelosi.com/download/1340231009680-Nivel_de_Seguridad_Integral_(SIL).pdf)
- Atlas Costa Rica. (2014). *Distritos 2014*.
- Bravo, J. (2018). Así funcionan las agujas en los cruces del tren. *La Nación*. Recuperado de <https://www.nacion.com/el-pais/politica/asi-funcionan-las-agujas-en-los-cruces-del-tren/JJME2JUTPNCFXAOEJZ2SNHUS5Y/story/>
- BLOM Sistemas Geoespaciales SLU (2009). *Estudio de actualización cartográfica de usos de la tierra a escala 1:10.000 gran area metropolitana de costa rica. Fase 1: apoyo fotogrametrico vuelo 1/25.000*. Recuperado de [EuropeAid/122320/D/SV/CR](https://www.europeaid/122320/D/SV/CR).
- Centren Formación. (2018). Curso RAMS. Madrid, España. Recuperado de https://www.vialibreffe.com/pdf/7298_CETREN_RAMS.pdf
- Comisión Nacional de Emergencias. (2016). *Amenazas de origen natural cantón de Paraíso*. Recuperado de <https://www.cne.go.cr/index.php/prevenci>
- Conrado, C. (2019). Funcionamiento de los dispositivos activos en la GAM. San José. Comunicación personal.
- Copernicus "Urban Atlas". (2012). *Mapping Guide for a European Urban Atlas*. Recuperado de https://ec.europa.eu/regional_policy/sources/tender/pdf/2012066/annexe2.pdf
- Dirección de Relaciones Pública. (2018). Datos sobre el Tránsito Promedio Diario (TPD) son ahora accesibles en línea. MOPT. Recuperado de https://www.mopt.go.cr/wps/portal/Home/noticias!/ut/p/z0/fczLDolwFATQX9GFy-ZeaUVYEI9RiRpX2I25hUKq2K12Pv5eE2J05W4mmTMgIQNp6WYq8sZZqt99J8P9fDPD_IJgOgu3Y0ziNB1M18jFnmMC5P_B-8EczmeZgGyo0qzQV1NZyDbu4qnuTB5eX6zr4cp5kxsauVNTa0-LnfW64eHrGmN_hjbmus3BdiPejhEPIQUcVYKrZgQhWKEZcjyOKABFgWPAg3NUarnPem-ABNje64/
- Dobles, M. (2013). *Trazado y diseño geométrico de vías*. San José, Costa Rica: Editorial UCR, 2013.
- Endicott, W. (2007). *Precast Segmental Guideway Forges Important Transit Link*. Seattle, Washington. Recuperado de

https://www.mcnarybergeron.com/pdfs/Settle_Sound_Bridge_fall07.pdf

Flyvbjerg, B., Bruzelius, N., y Wee, B. (2008).

Comparison of Capital Costs per Route-Kilometre in Urban Rail. Faculty of Technology, Policy and Management Delft University of Technology. Recuperado de <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1303/1303.6569.pdf>

Gerencia de Proyectos INCOFER. (2018).

Informe de pasos a nivel requeridos en la rehabilitación de vía férrea entre la Basílica de Cartago y Paraíso.

Gitelman, V., Hakkert, A., Doveh, E., y Cohen, A.

(2006). Herramientas de detección para considerar la desnivelación en los cruces de ferrocarril-carretera. *Journal of Transportation Engineering*, 52-59. doi: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2006)132:1(52)

Gómez, J. (2019). Elaboración de Anexos.

GOOGLE. (2018). *Google Earth Pro* [Mapa online Inter activo]. Recuperado de <https://earth.google.com/web/>

Hakkert, A. S., and Gitelman, V. (1997).

“Development of evaluation tools for road-rail crossing consideration for grade separation.” Transportation Research Record 1605, Transportation Research Board, Washington, D.C., 96–105.

HCM (2010). *Highway Capacity Manual*. Washington, D.C., Transportation Research Board.

He, X., Meng, X., y Li, L. (2011). *Design and Construction of the Bridges on Guangzhou Metro Line 4*. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/251716806_Design_and_Construction_of_the_Bridges_on_Guangzhou_Metro_Line_4

Hengl, T., Mendes, J., MacMillan, R., Batjes, N., Heuvelink, G., Ribeiro, E., Samuel-Rosa, A., Kempen, B., Leenaars, J., Walsh, M.,

y Ruiperez, M. (2014). SoilGrids1km — Global Soil Information Based on Automated Mapping. *PLoS ONE*, 9 (8), 1.

Hoback, A. (2008). *Sensitivity Analysis of Light Rail Transit Unit Capital Costs*. University of Detroit Mercy. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/251853968_Sensitivity_Analysis_of_Light_Rail_Transit_Unit_Capital_Costs

Hunter, P., Fujimoto, R., y Kyoung, W. (2006).

“An Investigation of Real-time Dynamic Data Driven Transportation Simulation”. Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference.

IDOM. (2018). *Estudio de Ingeniería de Valor del Proyecto del Tren Rápido de Pasajeros (TRP) en la Gran Área Metropolitana (GAM)*.

INCOFER. (2018). *Informe anual de estadísticas operativas 2017*. Obtenido de http://www.incofer.go.cr/wp-content/uploads/2018/01/Informe_Final_Estadistica_Operativas_2017.pdf?x28024

INCOFER. (2019). *Informe Anual de Estadísticas Operativas II Semestre 2018*. Recuperado de http://www.incofer.go.cr/wp-content/uploads/2019/04/INFORME_DE_ESTADISTICAS_OPERATIVAS_ANUAL_2018.pdf?x28024

INEC. (2011). *Costa Rica: Indicadores demográficos y sociales según provincia, cantón y distrito*. Recuperado de <http://www.inec.go.cr/poblacion>

INEC. (2013). *Estimaciones y Proyecciones de Población por sexo y edad 1950-2050*. Recuperado de http://www.inec.go.cr/sites/default/files/documentos/poblacion/estimaciones_y_proyecciones_de_poblacion/publicaciones/repoblacion1950-2050-01.pdf

INVU. (2013). *Plan GAM 13-30 de Movilidad*. Obtenido de <https://www.mivah.go.cr/Documentos/Pla>

- nGAM2013/01-DIMENSIONES/Dimension_Movilidad.pdf
- INVU. (2013). *Plan GAM 13-30 de Dimensión Ambiental*. Obtenido de https://www.mivah.go.cr/Documentos/PlanGAM2013/01-DIMENSIONES/Dimension_Ambiental.pdf
- Jolovic, D., Stevanovic, A., Sajjadi, S., y Martin, P. (2016). "Assessment of Level-Of-Service for Freeway Segments Using HCM and Microsimulation Methods". International Symposium on Enhancing Highway Performance. Vol. 15. Pp. 403-416. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146516305634>
- Katz, A., and Guttman, L. (1991). "Considerations for grade separation of road-rail crossings _A guideline and literature survey_." Rep. No. 91-132, Transportation Research Institute, Technion, Haifa, Israel (in Hebrew).
- Kenter, R. (2010). *The elevated metro structure in concrete, UHPC and composite-Literature and preliminary study* (Master Thesis). Delft University of Technology, Rotterdam.
- Kerr, A., James, P., y Arup, O. (2010). *Infrastructure Cost Comparisons for PRT and APM*. Recuperado de <https://www.polisnetwork.eu/uploads/Modules/PublicDocuments/ATS%20TEST%20TRACK%20CARDIFF.pdf>
- L.C.R. Logística S.A. (2017). *Estudio de Prefactibilidad del Sistema de Tren Rápido de Pasajeros de la GAM*.
- Lin, D., Yang, X., y Gao, C. (2013). "VISSIM-based Simulation Analysis on Road Network of CBD in Beijing, China". 13th COTA International Conference of Transportation Professionals. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042813021800>
- Maciejewski, M. (2014). A comparison of microscopic traffic flow simulation systems for an urban area. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/49595171_A_comparison_of_microscopic_traffic_flow_simulation_systems_for_an_urban_area
- Mata, R., Vásquez, A., y Rosales, A. (2013). *El Mapa de Suelos de Costa Rica con la leyenda WRB*. Recuperado de <http://www.mag.go.cr/>
- Medina, A. 2019. *Cálculo de Intensidades vehiculares y TPD*. Tecnológico de Costa Rica Comunicación personal.
- Mendez, M., y Valverde, V. (2016). Development of the HBV-TEC Hydrological Model, Procedia Engineering (154), ISSN 1877- 7058, 1116-1123. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816319105>
- MNDT. (2016). *Railroad Separation at Highway 47 (Ferry St.) Feasibility Study*. Anoka, Minnesota. Recuperado de <https://www.dot.state.mn.us/metro/projects/hwy47rr-anoka/>
- Mondorf, P. (1993). *Design-Construction of Precast Segmental Elevated Metro Line for Monterrey, Nuevo León, Mexico*. Recuperado de https://www.pci.org/PCI_Docs/Design_Resources/Guides_and_manuals/references/bridge_design_manual/JL-93-March-April_Design_Construction_of_Precast_Segmental_Elevated_Metro_Line_for_Monterrey,_Nuevo_Leon,_Mexico.pdf
- MOPT. (2019). Reporte del Tránsito Promedio Diario. Recuperado de <https://sig.mopt.go.cr:8084/transito/tpd.php>
- MTA. (2003). *Grade Crossing for Light Rail Transit*. Recuperado de

https://media.metro.net/about_us/library/images/Grade%20Crossing%20for%20Light%20Rail%20Transit.pdf

575a35e7791f/AnuarioTransito2015.pdf?MOD=AJPERES

Municipalidad de Paraíso. (2012). *Plan Regulador de la Municipalidad de Paraíso*. San José, Costa Rica: Imprenta Nacional.

Nadal, J. (2019). Información general sobre los dispositivos activos FABCOM. Cartago. Comunicación personal.

Navarro, G., Vargas, A., Delgado, V., Cuevas, R., y Aldí, A. (2018). *Estudio de caso: "Diagnóstico técnico y análisis de costos para la rehabilitación de la Red Ferroviaria en la Sección Cartago-Páez-Yas"*. Maestría en Ingeniería Vial. Ingeniería en Construcción, Tecnológico de Costa Rica. 25 p.

OpenStreetMap contributors. (2017). *Planet dump retrieved from*. Recuperado de <https://www.openstreetmap.org>

Pack, R. T., D. G. Tarboton, C. N. Goodwin, A. Prasad, (2005), "SINMAP 2. A Stability Index Approach to Terrain Stability Hazard Mapping, technical description and users guide for version 2.0," Utah State University.

Pérez, J., Schimidt, W. (2012). *Diagnóstico técnico y análisis de costos para la rehabilitación de la Red Ferroviaria en la Sección Cartago-Páez-Yas*. Informe proyecto final de graduación. Escuela de Ingeniería en Construcción, Tecnológico de Costa Rica. 111 p.

PRUGAM. (2008). Planificación regional y urbana de la Gran Área Metropolitana (GAM) del Valle Central de Costa Rica. Estudio sobre Base Territorial y Zonificación Ambiental para la GAM (Proyecto I-O-0205-06-IT-PRUGAM). Informe final.

PPEMSIT. (2016). *Anuario de información de tránsito 2015*. San José, Costa Rica. Recuperado de <https://www.mopt.go.cr/wps/wcm/connect/877d6952-d297-4678-9ce7->

PRUGAM. (2008). Planificación regional y urbana de la Gran Área Metropolitana (GAM) del Valle Central de Costa Rica. Estudio sobre Base Territorial y Zonificación Ambiental para la GAM (Proyecto I-O-0205-06-IT-PRUGAM). Informe final.

PTV GROUP. (2019). *PTV Vissim*. Recuperado de <http://vision-traffic.ptvgroup.com/es/productos/ptv-vissim/>

PVPC. (2011). *Holyoke Station Feasibility Study and Site Analysis*. Recuperado de <http://www.pvpc.org/sites/default/files/2011-03-31%20Holyoke%20%20Station%20Assessment%20Final%20Report%5B1%5D%20%281%29.pdf>

QGIS.ORG. (2019). Guía de usuario de QGIS. Recuperado de https://docs.qgis.org/2.14/es/docs/user_manual/index.html

Qin, Y., Xiong, J. (2006). "Traffic Evaluation of Urban Road Net-Based on the Software VISSIM 3.70". *Journal of Kunming University of Science and Technology*. Vol.31, No.6, pp.87-90.

Rojas, G. 2019. *Propuesta del Plan Regular de Paraíso (Uso de Suelo)*. Municipalidad de Paraíso. Comunicación personal.

Rono Bienes Raíces. (27 de febrero de 2016). Condominio Los Lagos [Mensaje en un blog]. Recuperado de <http://casasdepartamentoslocalescomerciales.blogspot.com/2016/02/323508-2.html>

Rono Bienes Raíces. (16 de marzo de 2015). Condominio Albacete. Casa en Cartago [Mensaje en un blog]. Recuperado de <http://casasdepartamentoslocalescomerciales.blogspot.com/2015/03/32267-33.html>

Rono Bienes Raíces. (16 de marzo de 2015). Condominio Albacete. Casa en Cartago [Mensaje en un blog]. Recuperado de

- <http://casasdepartamentoslocalescomerciales.blogspot.com/2015/03/32267-33.html>
- SketchUp. (2019). *Quienes somos*. Recuperado de <https://www.sketchup.com>
- Shanmuga, K. (2018). Hyderabad Metro Rail Viaducts Precast Segmented Balanced Cantilever Method of Launching of Segments by using LG & OH Gantry at ROB's. *International Journal of Science Technology & Engineering*, (5), 7-22.
- SIECA. (2011). *Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de Carreteras con enfoque de Gestión de Riesgo y Seguridad Vial*. (3ra Edición). Recuperado de <http://intercoonecna.aecid.es/Gestin%20del%20conocimiento/Manual%20Centroamericano%20de%20normas%20para%20el%20dise%C3%B1o%20geométrico%20de%20carreteras%202011.pdf>
- SIECA. (2000). *Manual Centroamericano de Dispositivos Uniformes para el Control del Tránsito*. Ciudad de Guatemala, Guatemala. Recuperado de <https://www.csv.go.cr/documents/10179/10903/Manual+Centroamericano+de+Dispositivos+Uniformes+para+el+Control+de+Tr%C3%A1nsito.pdf/e0765c16-b565-4fa2-bfdf-811949eeb71f>
- SUMO. (2015). *Documentation*. Recuperado de https://sumo.dlr.de/wiki/Simulation_of_Urban_MObility_-_Wiki
- TRAFIKVERKET. (2012). *Railway Stations-Planning Manual*. Recuperado de https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/44463/Ineko.Product.RelatedFiles/2018_052_railway_stations_planning_manual.pdf
- USDT. (2003). *Manual on Uniform Traffic Control Devices*. Washington, DC. Recuperado de <https://mutcd.fhwa.dot.gov/pdfs/2003r1r2/mutcd2003r1r2complete.pdf>
- USDT. (2007). *Railroad-Highway Grade Crossing Handbook - Revised Second*. Washington, DC. Recuperado de <https://www.fra.dot.gov/Elib/Document/1464>
- USDT. (2003). *Unit Cost Entries for Rail Crossing Pedestrian Warning Signal, Gates*. Costs Database. Recuperado de [https://www.itscosts.its.dot.gov/its/benecost.nsf/DisplayRUCByUnitCostElementUnadjusted?ReadForm&UnitCostElement=Rail+Crossing+Pedestrian+Warning+Signal,+Gates&Subsystem=Roadside+Rail+Crossing+\(R-RC\)](https://www.itscosts.its.dot.gov/its/benecost.nsf/DisplayRUCByUnitCostElementUnadjusted?ReadForm&UnitCostElement=Rail+Crossing+Pedestrian+Warning+Signal,+Gates&Subsystem=Roadside+Rail+Crossing+(R-RC))
- VSL. (2019). *Span by span erection with launching gantry*. Recuperado de <http://en.vsl.cz/segmental-bridges/2-span-by-span-erection-with-launching-gantry/>
- WMATA. (2017). *Station Area Planning Guide*. Recuperado de <https://www.wmata.com/business/real-estate/upload/Station-Area-Planning-Guide-October-2017.pdf>
- Wooldridge, M., Fambro, D., Brewer, M., Engelbrecht, R., Harry, S., y Cho, H. (2000). *Design guidelines for at-grade intersections near highway-railroad grade crossings*. Texas, Estados Unidos. Recuperado de <https://static.tti.tamu.edu/tti.tamu.edu/documents/1845-3.pdf>
- WSDOT. (2013). *Railroad Grade Crossings. WSDOT Design Manual*. Recuperado de <https://www.wsdot.wa.gov/publications/manuals/fulltext/M22-01/1350.pdf>
- WSDOT. (2012). *Grade Separation Concept Evaluation*. Recuperado de <https://www.fra.dot.gov/Elib/Document/2969>
- 7DG. (2017). *Arrabará Condominio*. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <http://7dg.cr/arrabara>