



**ANÁLISIS DE GEOMETRÍA DE RETORNOS EN DOBLES CALZADAS DE
LOS PROYECTOS APP. GICA, APP. PEREIRA – LA VICTORIA Y CONCESIÓN
COSTERA, PARA ESTANDARIZAR LOS CRITERIOS DE DISEÑO
GEOMÉTRICO DE LOS MISMOS**

Trabajo de grado presentado por:

JUAN SEBASTIÁN CALIXTO HERNÁNDEZ

como requisito parcial para optar al título de

MAGISTER EN INGENIERÍA CIVIL

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL

Bogotá D.C., Colombia

2018

**ANÁLISIS DE GEOMETRÍA DE RETORNOS EN DOBLES CALZADAS DE
LOS PROYECTOS APP. GICA, APP. PEREIRA – LA VICTORIA Y CONCESIÓN
COSTERA, PARA ESTANDARIZAR LOS CRITERIOS DE DISEÑO
GEOMÉTRICO DE LOS MISMOS**

JUAN SEBASTIÁN CALIXTO HERNÁNDEZ

APROBADO:



Edgar Alberto Fonseca Herrera

Tutor

Firma jurado

Firma jurado

Nota de advertencia

“La universidad no se hace responsable de los conceptos emitidos por sus estudiantes en sus proyectos de trabajo de grado, sólo velará por la calidad académica de los mismos, en procura de garantizar su desarrollo de acuerdo a la actualidad del área disciplinar respectiva. En el caso de presentarse cualquier reclamación o acción por parte de un tercero en cuanto a los derechos de autor sobre la obra en cuestión, el estudiante – autor asumirá toda la responsabilidad y saldrá en defensa de los derechos. Para todos los derechos la universidad actúa como un tercero de buena fe”. (Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995)

Contenido

RESUMEN.....	9
1. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1 Planteamiento del problema	12
1.2 Justificación	14
1.3 Objetivos	15
2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE	19
3. MARCO DE REFERENCIA.....	21
3.1 Marco conceptual	21
3.1.1 Vehículo de diseño	21
3.1.2 Distancia de visibilidad de parada (DP)	29
3.1.3 Tipos de empalmes básicos de las curvas	34
3.1.4 Fricción transversal máxima ($fT_{m\acute{a}x}$)	36
3.1.5 Radio de curvatura mínimo ($RC_{m\acute{i}n}$)	36
3.1.6 Transición del peralte	36
3.1.7 Longitud de la curva espiral	39
3.1.8 Sobreechancho en las curvas	41
3.1.9 Diseno de carriles de cambio de velocidad	46
3.2 Marco teorico	49
3.2.1 Clasificación de los retornos	49
3.2.2 Ubicación de las aberturas de mediana para retornar	54
4. METODOLOGÍA	56
4.1 Proceso	56
5. DESARROLLO DE OBJETIVOS.....	57
5.1 Parámetros en planta	57
5.1.1 Distancia de cambio de carril	57
5.1.2 Ajuste por pendientes de longitudes de carriles de cambio de velocidad.....	60
5.1.3 Radio mínimo del retorno	65
5.1.4 Peraltes	67
5.2 Diseno del perfil longitudinal	70
5.2.1 Pendiente longitudinal mínima.....	71
5.2.2 Pendiente longitudinal máxima	71
5.2.3 Longitud mínima de la tangente (separación de PIV)	71
5.2.4 Longitud máxima de la tangente	71
5.2.5 Valor de K mínimo y longitud mínima de curva,	72

5.3	Sección Transversal	72
5.3.1	Sobreechanos	72
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	78
6.1	Retorno APP Pereira – La Victoria	78
6.1.1	Análisis del radio.....	78
6.1.2	Análisis de peraltes	80
6.1.3	Análisis del perfil longitudinal	82
6.1.4	Análisis de sección transversal.....	83
6.2	Análisis retorno Concesión Costera	84
6.2.1	Análisis de radio.....	84
6.2.2	Análisis de peraltes	86
6.2.3	Análisis del perfil longitudinal	87
6.2.4	Análisis de sección transversal.....	88
6.3	Análisis retorno APP GICA	90
6.3.1	Análisis de radio.....	90
6.3.2	Análisis de peraltes	92
6.3.3	Análisis de perfil longitudinal	92
6.3.4	Análisis de sección transversal.....	93
7.	PARÁMETROS ESTANDARIZADOS Y RECOMENDACIONES PARA EL DISEÑO DE RETORNOS EN CIVIL 3D	95
7.1	Parámetros en planta	95
7.1.1	Distancia de cambio de carril	95
7.1.2	Longitud ajustada por pendientes carril de aceleración:	95
7.1.3	Radio mínimo del retorno	99
7.1.4	Peraltes	100
7.2	Diseño del perfil longitudinal	101
7.3	Sección Transversal	102
7.4	Recomendaciones	102
8.	CONCLUSIONES.....	104
9.	REFERENCIAS.....	106

Lista de Tablas

Tabla 1: Descripción de la categorización de los vehículos en Colombia. Fuente: Manual de Diseño Geométrico INVIAS 2008	21
Tabla 2: Dimensiones de los vehículos categorizados en Colombia. Fuente: Manual de Diseño Geométrico INVIAS 2008.....	22
Tabla 3: Distancia de visibilidad de parada. Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Vías INVIAS 2008.....	30
Tabla 4: Distancia de visibilidad de parada en descenso y ascenso. Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Vías INVIAS 2008	30
Tabla 5: Componentes de la maniobra de adelantamiento. Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Vías INVIAS 2008.....	32
Tabla 6: Mínima distancia de visibilidad de adelantamiento. Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Vías INVIAS 2008.....	33
Tabla 7: Fricción transversal máxima. Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Vías 2008.....	36
Tabla 8: Pendiente de la rampa de peraltes. Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Vías INVIAS 2008	38
Tabla 9: Factor de ajuste longitud de transición. Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Vías INVIAS 2008	39
Tabla 10: Variación de la aceleración centrífuga. Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Vías INVIAS 2008	40
Tabla 11: Dimensiones para el cálculo del sobreebanco en vehículos rígidos. Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Vías INVIAS 2008.....	42
Tabla 12: Dimensiones para el cálculo del sobreebanco requerido por el vehículo articulado representativo del parque automotor colombiano. Manual de Diseño Geométrico de Vías INVIAS 2008	43
Tabla 13: Ancho de calzada para valores de C. Manual de Diseño Geométrico de Vías INVIAS 2008	45
Tabla 14: Longitud carril de aceleración. Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Vías INVIAS 2008.....	47
Tabla 15: Longitud carril de desaceleración. Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Vías INVIAS 2008 ...	47
Tabla 16: Tipos de retornos. Fuente: Programa Nacional de Cooperación de Investigación de Autopistas, NCHRP.....	51
Tabla 17: longitud mínima de longitud de cambio de carril y acceso. Fuente: Autor	60
Tabla 18: Factor de ajuste por pendientes carril de aceleración. Fuente: Guía de Diseño de Vías Urbanas, Bogotá D.C.....	61
Tabla 19: Longitud ajustada por pendientes carril de aceleración en subida. Fuente: Guía de Diseño de Vías Urbanas, Bogotá D.C.....	62
Tabla 20: Longitud ajustada por pendientes carril de aceleración en bajada. Fuente: Autor	63
Tabla 21: Factor de ajuste por pendientes carril de desaceleración. Fuente: Autor.....	64
Tabla 22: Longitud ajustada por pendientes carril de desaceleración en subida. Fuente: Autor	64
Tabla 23: Longitud ajustada por pendientes carril de desaceleración en bajada. Fuente: Autor	65
Tabla 24: Longitud mínima de transición. Fuente: Autor	69
Tabla 25: Longitud mínima de transición. Fuente: Autor	70
Tabla 26: Ancho mayor medido para distintos radios. Fuente: Autor.....	74
Tabla 27: Anchos calculados para distintos radios. Fuente: Autor.....	76
Tabla 28: Ancho total del retorno en relación al radio. Fuente: Autor	77
Tabla 29: Elementos retorno Pereira - La Victoria sur-sur. Fuente: Autor.	78
Tabla 30: Elementos retorno Costera sur - sur. Estudios y diseños Concesión Costera.....	84
Tabla 31: Elementos Retorno GICA Oriente - Oriente. Fuente: Estudios y Diseños APP GICA	90

Lista de Figuras

<i>Figura 1:</i> Retorno APP GICA. Fuente: Autor.....	16
<i>Figura 2:</i> Retorno Concesión Costera. Fuente: Autor.....	17
<i>Figura 3:</i> Retorno APP Pereira - La Victoria. Fuente: Autor.....	17
<i>Figura 4:</i> Trayectoria de giro vehículo liviano. Fuente: Manual de Diseño Geométrico INVIAS 2008	23
<i>Figura 5:</i> Trayectoria de giro bus mediano. Fuente: Manual de Diseño Geométrico INVIAS 2008.....	24
<i>Figura 6:</i> Trayectoria de giro bus grande. Fuente: Manual de Diseño Geométrico INVIAS 2008.....	25
<i>Figura 7:</i> Trayectoria de giro camión categoría 2. Fuente: Manual de Diseño Geométrico INVIAS 2008.....	26
<i>Figura 8:</i> Trayectoria de giro camión categoría 3. Fuente: Manual de Diseño Geométrico INVIAS 2008.....	27
<i>Figura 9:</i> Trayectoria de giro camión categoría 3S2. Fuente: Manual de Diseño Geométrico INVIAS 2008.....	28
<i>Figura 10:</i> Etapas distancia de adelantamiento. Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Vías INVIAS 2008	31
<i>Figura 11:</i> Empalme circular simple. Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Vías INVIAS 2008.....	34
<i>Figura 12:</i> Espiral clotoide. Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Vías INVIAS 2008	35
<i>Figura 13:</i> Diagrama de peralte. Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Vías INVIAS 2008	37
<i>Figura 14:</i> Diagrama de rampa de peraltes. Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Vías INVIAS 2008	39
<i>Figura 15:</i> Giro de vehículos rígidos. Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Vías INVIAS 2008	42
<i>Figura 16:</i> Dimensiones para el cálculo del sobreancho requerido por el vehículo articulado representativo del parque automotor colombiano. Manual de Diseño Geométrico de Vías INVIAS 2008	43
<i>Figura 17:</i> Esquema de sobreancho vehículos articulados. Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Vías INVIAS 2008.....	44
<i>Figura 18:</i> Transición de sobreancho. Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Vías INVIAS 2008.....	46
<i>Figura 19:</i> Carril de aceleración. Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Vías INVIAS 2008	47
<i>Figura 20:</i> Retornos no permitidos en carreteras primarias. Fuente: Safety of U-Turns at Unsignalized Median Openings (NHCRP, 2004)	54
<i>Figura 21:</i> Longitudes del retorno. Fuente: autor	57
<i>Figura 22:</i> Distancia de visibilidad de adelantamiento. Fuente: MANUAL DE DISEÑO GEOMÉTRICO INVIAS, 2008.....	58
<i>Figura 23:</i> Trayectoria de giro vehículo 3S2. Radio 12 m. Fuente: Autor.....	66
<i>Figura 24:</i> Cálculo de longitud de transición. Fuente Guía de Diseño de Vías Urbanas de Bogotá.....	68
<i>Figura 25:</i> Elementos para el cálculo de la pendiente de la rampa de peralte. Fuente: Autor	68
<i>Figura 26:</i> Trayectoria de giro vehículo 3S2. Radio 14 m. Fuente: Autor.....	73
<i>Figura 27:</i> Trayectoria de giro vehículo 3S2. Radio 30 m. Fuente: Autor.....	73
<i>Figura 28:</i> Medida de anchos en retornos. Fuente: Autor.....	75
<i>Figura 29:</i> Ancho mínimo del retorno vs radio del eje. Fuente: Autor	75
<i>Figura 30:</i> Retorno APP Pereira - La Victoria. Fuente: Estudios y diseños Pereira – La Victoria.	78
<i>Figura 31:</i> Geometría retorno Pereira - La Victoria sur-sur. Fuente: Estudios y diseños Pereira – La Victoria.	79
<i>Figura 32:</i> Trayectoria por el eje de diseño del retorno Pereira - La Victoria sur - sur. Fuente: Autor.	79
<i>Figura 33:</i> Trayectoria por el eje de desplazamiento del retorno Pereira - La Victoria sur - sur. Fuente: Autor.	80
<i>Figura 34:</i> Cuadro de curvatura del retorno Pereira - La Victoria sur – sur calzada derecha. Fuente: Estudios y diseños Pereira – La Victoria.....	80
<i>Figura 35:</i> Diagrama de peraltes del retorno Pereira - La Victoria sur – sur calzada derecha. Fuente: Estudios y diseños Pereira – La Victoria.....	80
<i>Figura 36:</i> Cuadro de curvatura del retorno Pereira - La Victoria sur – sur calzada izquierda. Fuente: Estudios y diseños Pereira – La Victoria.....	81
<i>Figura 37:</i> Diagrama de peraltes del retorno Pereira - La Victoria sur – sur calzada izquierda. Fuente: Estudios y diseños Pereira – La Victoria.....	81
<i>Figura 38:</i> Cálculo de longitud de transición. Fuente Guía de Diseño de Vías Urbanas de Bogotá.....	81
<i>Figura 39:</i> Perfil longitudinal del retorno Pereira - La Victoria sur – sur. Fuente: Estudios y diseños Pereira – La Victoria.....	82
<i>Figura 40:</i> Medida de ancho de seguridad retorno Pereira - La Victoria. Fuente: Autor.....	83
<i>Figura 41:</i> Retorno Costera. Fuente: Estudios y diseños Concesión Costera.	84

<i>Figura 42:</i> Trayectoria por el eje de diseño del retorno Costera sur - sur. Fuente: Autor.....	85
<i>Figura 43:</i> Trayectoria por el eje de desplazamiento del retorno Costera sur - sur. Fuente: Autor.....	85
<i>Figura 44:</i> Diagrama de peraltes del retorno Costera sur – sur calzada derecha. Fuente: Estudios y diseños Concesión Costera.	86
<i>Figura 45:</i> Diagrama de peraltes del retorno Costera sur – sur calzada izquierda. Fuente: Estudios y diseños Concesión Costera	86
<i>Figura 46:</i> Dimensiones retorno Concesión Costera. Fuente: Autor.	87
<i>Figura 47:</i> Perfil longitudinal del retorno Concesión Costera sur – sur. Fuente: Estudios y diseños Concesión Costera.....	88
<i>Figura 48:</i> Mediciones en planta retorno Costera. Fuente: Autor.	89
<i>Figura 49:</i> Retorno GICA. Fuente: Estudios y Diseños APP GICA.....	90
<i>Figura 50:</i> Trayectoria por el eje de diseño del retorno GICA Oriente - Oriente. Fuente: Autor	91
<i>Figura 51:</i> Trayectoria por el eje de desplazamiento del retorno GICA Oriente - Oriente. Fuente: Autor	91
<i>Figura 52:</i> Perfil longitudinal del retorno GICA Occidente - Occidente. Fuente: Estudios y Diseños APP GICA	93
<i>Figura 53:</i> Medición Ancho total del retorno GICA. Fuente: Autor.....	94

Resumen

Este trabajo presenta un análisis de la geometría de retornos viales utilizados en las vías APP GICA, Concesión Costera y APP Pereira – La Victoria, las cuales son de 4G.

Se analizará el tipo de retorno, la velocidad de diseño, anchos, carriles de aceleración y desaceleración, radios, tipos de curva, desarrollo alimétrico y de sección transversal, para llevar al lector a concluir cuales características son más beneficiosas para los proyectos, basándose en limitaciones específicas de cada sector y geoméricamente seguras y óptimas para el usuario, presentando criterios que mejoren y unifiquen los parámetros de diseño de los elementos geoméricos de los retornos.

Tomando como base y norma el Manual de Diseño Geométrico de Carreteras INVIAS 2008, este trabajo presentará recomendaciones que permitan a los diseñadores tener parámetros y características que estandaricen los elementos de diseño de los retornos.

Palabras clave: Retorno vial, diseño geométrico, vías 4G, parámetros de diseño.

Abstract

This paper presents an analysis of the geometry of road returns used in the APP GICA, Costera Concession and APP Pereira - La Victoria, which are 4G.

The type of return, the speed of design, widths, acceleration and deceleration lanes, radii, curve types, profile development and cross section will be analyzed, to lead the reader to conclude which characteristics are most beneficial for the projects, based on specific limitations of each sector and geometrically safe and optimal for the user, presenting criteria that improve and unify the design parameters and geometric elements of the returns.

Taking as base the Manual of Geometric Design of Roads INVIAS 2008, this work will present recommendations that allow designers to have parameters and characteristics that standardize the design elements of the returns.

Key words: Road return, geometric design, 4G Roads, design parameters.

1. Introducción

En Colombia se está presentando una revolución en infraestructura vial, en la cual se procura que todas las fases del proyecto, tanto diseño como construcción, sean las mejores. Esta revolución ha llevado a la actualización de toda la normativa vigente en cuanto a señalización, materiales, geometría, etc., para procurar la construcción de vías seguras y de la más alta calidad.

En el 2008 el Instituto Nacional de Vías realiza la publicación del Manual de Diseño Geométrico de Carreteras, cuyo fin es normalizar las características de diseño geométrico de una vía, sin embargo en ningún apartado del mismo se reflejan los requisitos técnicos de los retornos viales.

Lo anterior indica que no se tiene una normativa válida para el territorio de cómo se pueden diseñar y modelar los distintos tipos de retornos que existen, ya sean a nivel o a desnivel. Este tema es de mucha importancia ya que al momento de la ubicación y diseño de los retornos puede que no se tengan en cuenta muchos factores como los vehículos que transitan por la zona o las poblaciones aledañas que necesitan de los retornos y todo termina basándose en el buen juicio del diseñador.

En vista de lo anterior, esta tesis busca generar unos lineamientos base para el diseño y homogenización de los retornos, para que los diseñadores puedan partir de una base que los guíe a tomar la mejor decisión para implementar cierto tipo de diseño y que con aquellas características que sean similares (tipo de terreno, tipo de vía tránsito, área disponible y seguridad vial) en diversos proyectos, se pueda diseñar un tipo de retorno que cumpla con todos los requisitos de geometría y seguridad sin necesidad de recurrir a sobrediseños.

Como se verá en el desarrollo del proyecto se podrá concluir que cada diseñador tiene en cuenta parámetros distintos para realizar el diseño del retorno y que algunos retornos poseen características insuficientes y otros por el contrario están sobredimensionados.

1.1 Planteamiento del problema

La gran iniciativa de los proyectos 4G ha llevado a la infraestructura del país a elevar los estándares de calidad de sus vías.

Los retornos son de obligatoria construcción en un proyecto de doble calzada, pero no existe una normatividad para la implementación de los mismos, lo que genera la siguiente pregunta de investigación a la que se le dará solución mediante el desarrollo de este proyecto: ¿Cuáles son las condiciones óptimas para el diseño geométrico de un retorno?

En todas las dobles calzadas que se están diseñando y construyendo actualmente en el país se están implementando los retornos, pero se desconoce su procedencia y su diseño, por lo que nace la incógnita de ¿Qué tipos de retornos se están utilizando en las vías y cuáles son sus características?

Dando respuesta a las interrogantes mencionadas se analizarán las características de los retornos ubicados en diversos proyectos, para llegar a la conclusión de qué parámetros son seguros y funcionales, y tener un retorno tipo para proyectos con características similares.

El problema radica en cuatro factores:

- La carencia de una base fundamentada de diseño de retornos viales se ve reflejada en diseños sujetos a mejoras geométricas debido a que no cumplen especificaciones mínimas para sobrecostos, radios de giro, carriles de aceleración y desaceleración, ubicación de retornos en curvas verticales y sin distancias de visibilidad de parada adecuadas, esto claramente conduce a la falta de confort para los usuarios y problemas de seguridad vial.
- Muchos retornos se diseñan hacia el interior del corredor; bien es sabido que los carriles internos de las calzadas son considerados de adelantamiento y de tránsito rápido, ya que los carriles externos están sujetos para la entrada y salida de accesos a predios y veredales. Así las cosas, el problema de seguridad que se genera al momento en que un vehículo se incorpora al carril rápido desde un retorno en U es de vital importancia, debido a que los cambios de velocidad pueden variar en más del triple de la relación carril/velocidad vs. retorno/velocidad produciendo la desaceleración del vehículo que se desplaza sobre la calzada principal o la colisión de los mismos. Lo anterior se agrava cuando el vehículo que se incorpora es un camión C3S2, porque probablemente no tendrá la posibilidad de acelerar a una velocidad segura para realizar la incorporación mientras recorre el carril de aceleración, afectando el tráfico principal.
- El último factor afecta al ente adjudicador, independiente de su estructura como concesionario, unión temporal o pública, a razón que los retornos en ocasiones se ven sobredimensionados lo que produce un sobrecosto en estructura de pavimento,

compra de predios, movimiento de tierras y, según la topografía estructuras de contención y de estabilización.

- En vías donde se tienen dos calzadas como par vial, el diseño por lo general no plantea retornos debido a la separación de las calzadas, tira predial y topografía, produciendo que los usuarios no puedan retornar en tramos cortos y conllevando a mayores desplazamientos hasta poder encontrar un punto adecuado de regreso. Este es un factor importante y se agrava cuando los usuarios son vehículos de respuesta de emergencias o cuando la vía se ve afectada por pérdidas de bancas o derrumbes y tiene que cerrarse parcial o totalmente.

1.2 Justificación

La necesidad de conocer las mejores características para diseñar un retorno es de especial relevancia para procurar la comodidad y seguridad de los conductores. Así mismo, los diseñadores deben tener en cuenta diversos parámetros que satisfagan las necesidades del público aledaño y aquellas consideraciones de seguridad vial, para que los futuros proyectos tengan un punto de partida que permita aprovechar al máximo el recurso disponible, manteniendo la seguridad y evitando sobrecostos.

Este punto de partida será la base para el diseño de los retornos que más se adapten a cada necesidad, pasando por el tipo de vehículo y los diversos parámetros geométricos detallados anteriormente.

Aunque el diseño geométrico de vías en el país se hace basado en el Manual de Diseño Geométrico de Carreteras 2008, este no contempla los parámetros geométricos para el diseño del retorno como los son los sobreanchos mínimos de carril, peralte correspondiente, radio mínimo para la velocidad de diseño de un retorno, ubicación recomendada en planta, velocidad de diseño, separación de la mediana, tipo de retorno a emplear y tipología de curvas a utilizar.

1.3 Objetivos

1.3.1. Objetivo General

- Estandarizar y unificar los parámetros y criterios de diseño de los elementos geométricos de los retornos.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Analizar los retornos ubicados en las abscisas escogidas de cada proyecto, basado en su tipología y parámetros de diseño.
- Plantear parámetros geométricos tipo, que permitan realizar un diseño adecuado y seguro para los retornos.

1.3.3. Alcance

Esta investigación tiene un enfoque cuantitativo de tipo aplicado. Mediante variables matemáticas y geométricas como los son los radios mínimos, longitudes de carriles, parámetros de las curvas, análisis altimétrico y de visibilidad, se pretende realizar una estandarización de criterios de manera objetiva, basados en análisis de conceptos preconcebidos y teorías, al igual que geometría implementada en el diseño de los retornos de proyectos de 4G en ejecución y estructuración como los son los proyectos de la Concesión Costera, APP GICA y la APP Pereira – La Victoria, respectivamente.

Se analizará la geometría de los siguientes retornos:

- APP GICA

Se analizará el diseño del retorno ubicado en el Tramo 1 K10+000, el cual es de tipo corbatín. Este tramo plantea la construcción de la segunda calzada en un terreno montañoso a 80 km/h. A continuación se tiene una figura del diseño propuesto.

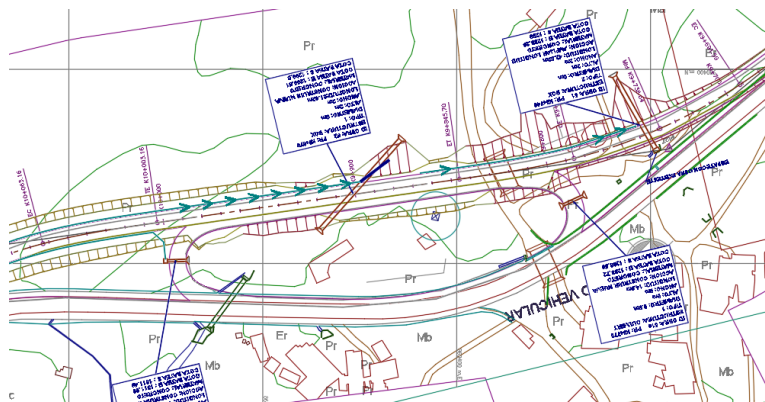


Figura 1: Retorno APP GICA. Fuente: Autor

- Concesión Costera: Barranquilla – Cartagena

Concluirá sobre el retorno ubicado en la Unidad Funcional 6 en el K27+900 cuya calzada principal tiene una velocidad de diseño de 80 km/h. La siguiente figura muestra el tipo y ubicación del retorno.

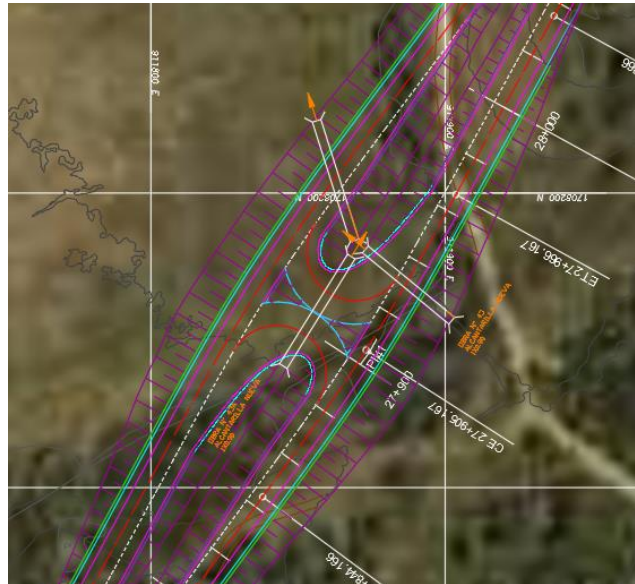


Figura 2: Retorno Concesión Costera. Fuente: Autor

- **APP Pereira – La Victoria**

De esta asociación publico privada se tomará el diseño de un retorno ubicado en el K1+200 de la Unidad Funcional 1, entre Cerritos y La Virginia, un corredor que plantea la construcción de una segunda calzada a 80 km/h, la existente se mantendrá con la misma velocidad. La siguiente figura muestra el diseño del retorno tipo corbatín.



Figura 3: Retorno APP Pereira - La Victoria. Fuente: Autor

Los parámetros y criterios geométricos analizar y por ende a concluir en los tres proyectos, son los siguientes:

- **Planimetría**
 - Velocidad de diseño
 - Radio mínimo de giro
 - Ancho total mínimo requerido
 - Longitud mínima de carriles de aceleración
 - Peralte

- **Altimetría**
 - Longitud mínima de curva
 - K mínimo cóncavo y convexo
 - Longitud mínima de tangente
 - Pendiente máxima
 - Visibilidad

- **Análisis de proyectos**

2. Antecedentes y Estado del Arte

Actualmente en Colombia no existe una normatividad que estandarice y compile todos los parámetros y criterios que aplican para el diseño de los retornos.

Se cuenta con el MANUAL DE DISEÑO GEOMÉTRICO 2008 que en su capítulo dos, indica las dimensiones y trayectorias de giro para distintos tipos de vehículos de diseño, de donde se pueden tomar también los anchos de la calzada e indica que estos aspectos deben ser tenidos en cuenta al momento de diseñar los retornos.

Igualmente, contiene detalles sobre otros aspectos directamente relacionados con el diseño de retornos, como lo son los carriles de aceleración y desaceleración, glorietas, dimensiones y trayectorias de giro para distintos tipos de vehículos de diseño. Estos apartes han sido tomados de las normas internacionales, más precisamente de la Estadunidense.

Aunque este manual no tiene una sección dedicada exclusivamente a los retornos, varios de los aspectos que en este se encuentran son la base para realizar los diseños junto con el buen criterio del diseñador geométrico. De este, se toman todos los criterios de diseño de las curvas y las tangentes tanto horizontales como verticales, al igual que los criterios de visibilidad requeridos.

En el ámbito urbano se habla de la Guía de Diseño del IDU, la cual considera mayores aspectos que la del INVIAS, sin embargo tienen grandes diferencias, por lo que es posible que sea necesario realizar ajustes y complementos para trabajar con las dos normas, pero es un buen punto de partida para normalizar el diseño de retornos en Colombia. En esta guía se encuentran parámetros de convergencia y divergencia, líneas de contacto y los tipos de concatenaciones que pueden utilizarse en el diseño. Por otro lado, complementa las dimensiones de los carriles de aceleración y desaceleración, ya que contempla un aumento o reducción de la longitud en relación a la pendiente longitudinal. De la misma manera que el manual del INVIAS, tiene en cuenta factores como lo son los radios mínimos de giro, mediante plantillas diseñadas en Autorun 7.0, las cuales pueden dar una idea al diseñador de la geometría a considerar para giros de 90° o giros de 180° en retornos, cita la Guía de diseño de Vías Urbanas Bogotá.

En estados unidos se ha trabajado en investigaciones para el diseño y la seguridad de los giros en U (retornos). La Policy on Geometric Design of Highways and Streets, realizado por la American Association of State Highway and Transportation Official, tiene un apartado especial para retornos y giros en U.

Esta política incluye un extenso capítulo sobre los giros en u (U-Turn). Inicia describiendo consideraciones generales para realizar los giros de manera indirecta, mediante orejas y ramales, mediante intersecciones y a través de giros en U directos mediante calzadas que conectan ambas calzadas. Así mismo propone locaciones para los retornos y el ancho mínimo del separador según el vehículo de diseño y el carril de destino.

En agosto de 2014, la Administración Federal de Autopistas del Departamento Estadunidense de Transporte, dio a conocer una guía informativa sobre los retornos e U, llamada Median U-Turn (MUT) Informational Guide y su complemento Restricted Crossing U-Turn Intersection. Los documentos hablan sobre los distintos tipos de retornos, políticas y planeación, consideraciones multimodales, seguridad, características operacionales, análisis de operaciones, diseño geométrico, señalización y construcción y mantenimiento.

El Colegio de Ingeniería en Kentucky en el 2004 realizó un estudio de seguridad en los giros en U, donde demostraba la eficiencia de estos mediante la reducción de accidentes viales.

El manual de Diseño de vías del departamento de Texas de 2014 también tiene apartados especiales para el diseño de los retornos, donde incluye anchos de separadores y un apartado donde trata la distancia mínima en la que debe existir una separación en la mediana para el cruce eventual de vehículos de emergencia.

En Latinoamérica, el Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras de la Dirección General de Servicios Técnicos de México y el Manual de Carreteras de Diseño Geométrico 2013 de la Dirección General de Caminos y Ferrocarriles de Perú, tienen unos pequeños apartados sobre los giros en U, sin ser muy específicos en el tema.

Por otro lado, el Manual Centroamericano de Normas para el diseño Geométrico de Carreteras, tiene varios apartados sobre retornos, donde se tratan temas como accidentalidad, anchos, radios, entre otros, al igual que el Manual de Vialidad Urbana del Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile.

Yendo un poco más lejos, la Universidad de Naresuan en Tailandia también, tiene un documento donde evaluó la accidentalidad que se genera por los retornos y propuso un diseño óptimo para los retornos en las autopistas de Tailandia (“The Optimal Design of U-Turns on Thai Highways) en 2014. En su contenido cuenta con las partes del retorno y los tipos de retornos que existen.

En el ámbito latinoamericano se tendrán en cuenta los manuales de diseño geométrico de varios países, como los son México, Chile y Perú, para completar y comparar información respecto a la normativa americana y colombiana. .

Adicionalmente, en el 2004, en Washington, se desarrolló por parte de ingenieros de la Universidad Estatal de Pensilvania y el Instituto de Investigación Midwest, un paper llamado Safety of U-Turns at Unsignalized Median Openings con el fin presentar una guía para localizar y diseñar las separaciones en las medianas, lo cual está altamente atado al diseño de retornos.

3. Marco de Referencia

3.1 Marco conceptual

Aviso de Propiedad Intelectual: Los siguientes conceptos son tomados o resumidos del Manual de Diseño Geométrico del INVIAS 2008

3.1.1 Vehículo de diseño

Es el vehículo que representa a los vehículos que pueden transitar por una respectiva vía y su elección depende de la composición del tránsito; a su vez este definirá las características de la vía, como las dimensiones de la corona, radios y gálibos.

3.1.1.1 Nomenclatura

Tabla 1: Descripción de la categorización de los vehículos en Colombia. Fuente: Manual de Diseño Geométrico INVIAS 2008

Categoría	Descripción
Vehículo liviano	-
Bus mediano	-
Bus grande	-
2	Camión de dos (2) ejes - Camión sencillo
3	Camión de tres (3) ejes - Dobletroque
3S2	Tractocamión de tres (3) ejes con Semirremolque de dos (2) ejes

3.1.1.2 Dimensiones y trayectorias de giro

Las trayectorias de giro definen el espacio que necesita un vehículo para realizar un giro de 180°. Se deben considerar las dimensiones de las proyecciones delanteras, traseras y el radio mínimo central para garantizar que el desplazamiento del vehículo se hace de manera segura y dentro del área de circulación. Las principales dimensiones se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 2: Dimensiones de los vehículos categorizados en Colombia. Fuente: Manual de Diseño Geométrico INVIAS 2008

Categoría	Longitud Total (m)	Ancho (m)	Longitud Tractocamión (m)	Longitud semirremolque (m)
Vehículo liviano	5.00	1.80	-	-
Bus mediano	10.91	2.44	-	-
Bus grande	13.00	2.60	-	-
2	11.00	2.50	-	-
3	11.40	2.50	-	-
3S2	20.89	2.59	4.57	14.63

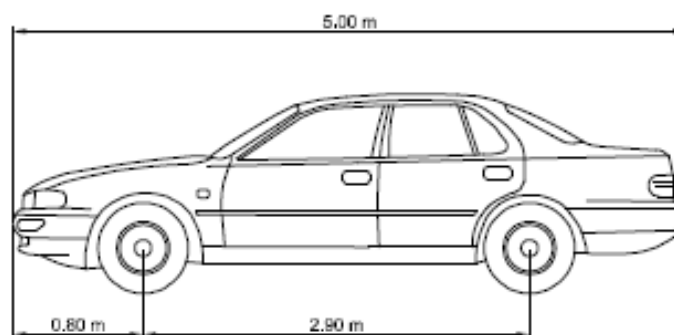
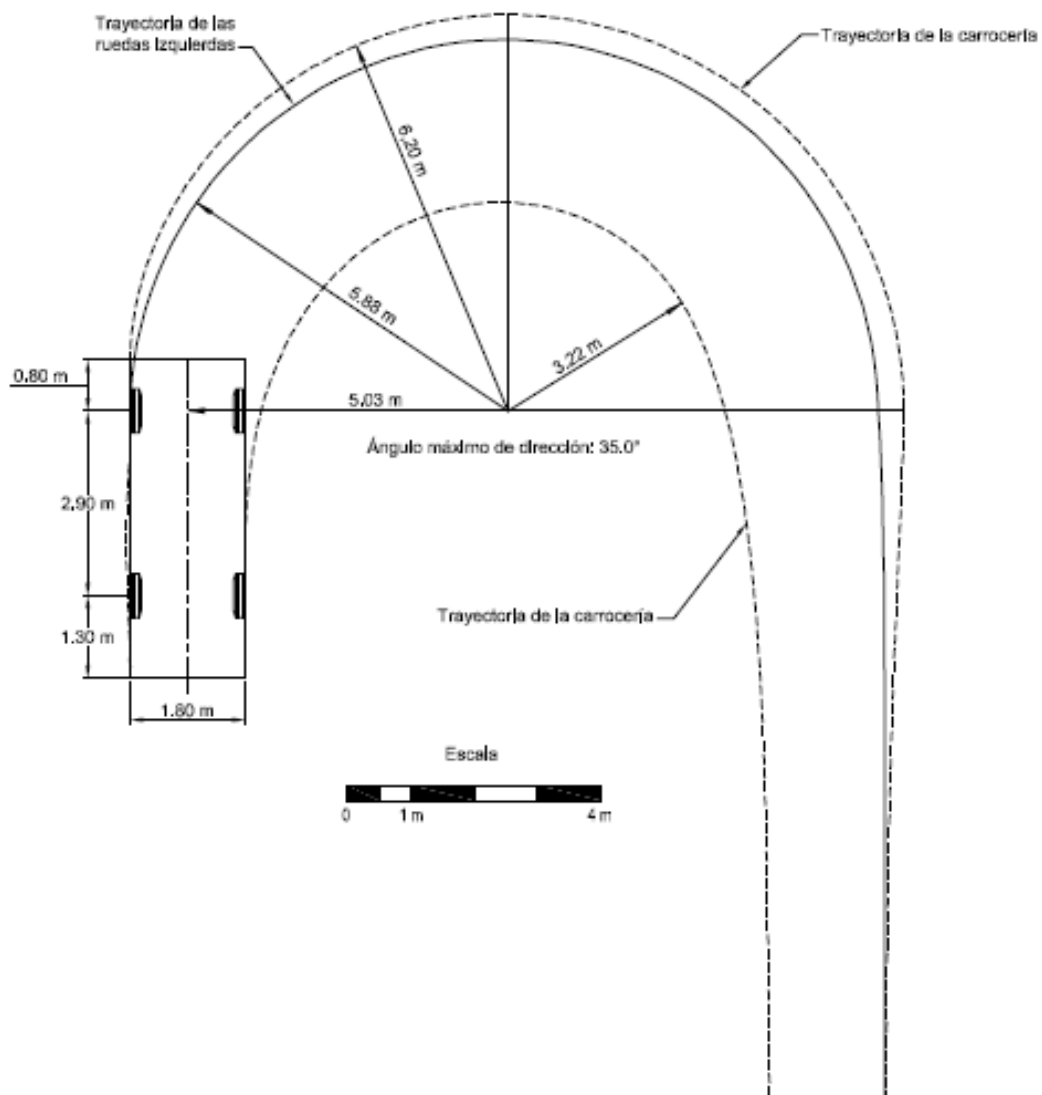


Figura 4: Trayectoria de giro vehículo liviano. Fuente: Manual de Diseño Geométrico INVIAS 2008

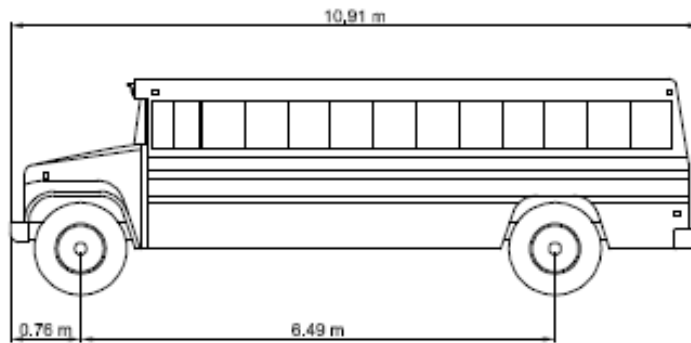
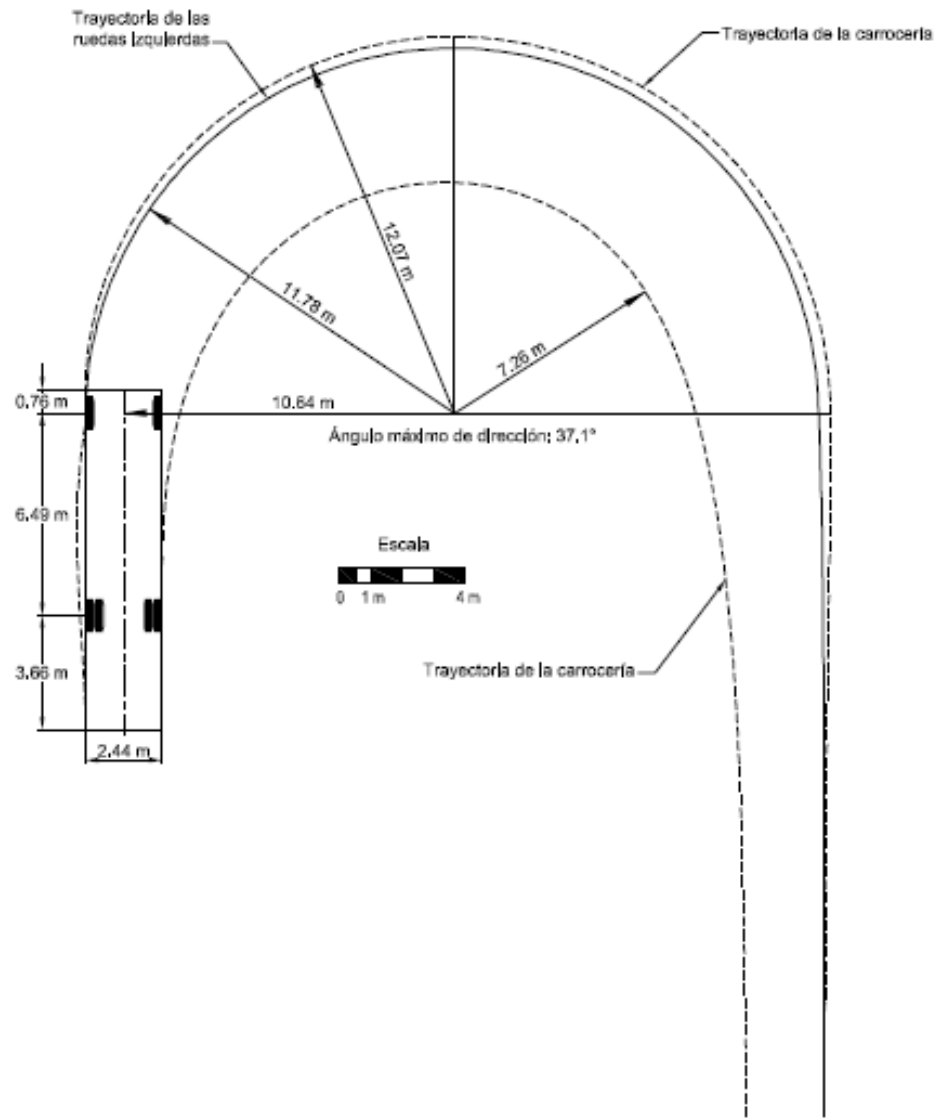


Figura 5: Trayectoria de giro bus mediano. Fuente: Manual de Diseño Geométrico INVIAS 2008

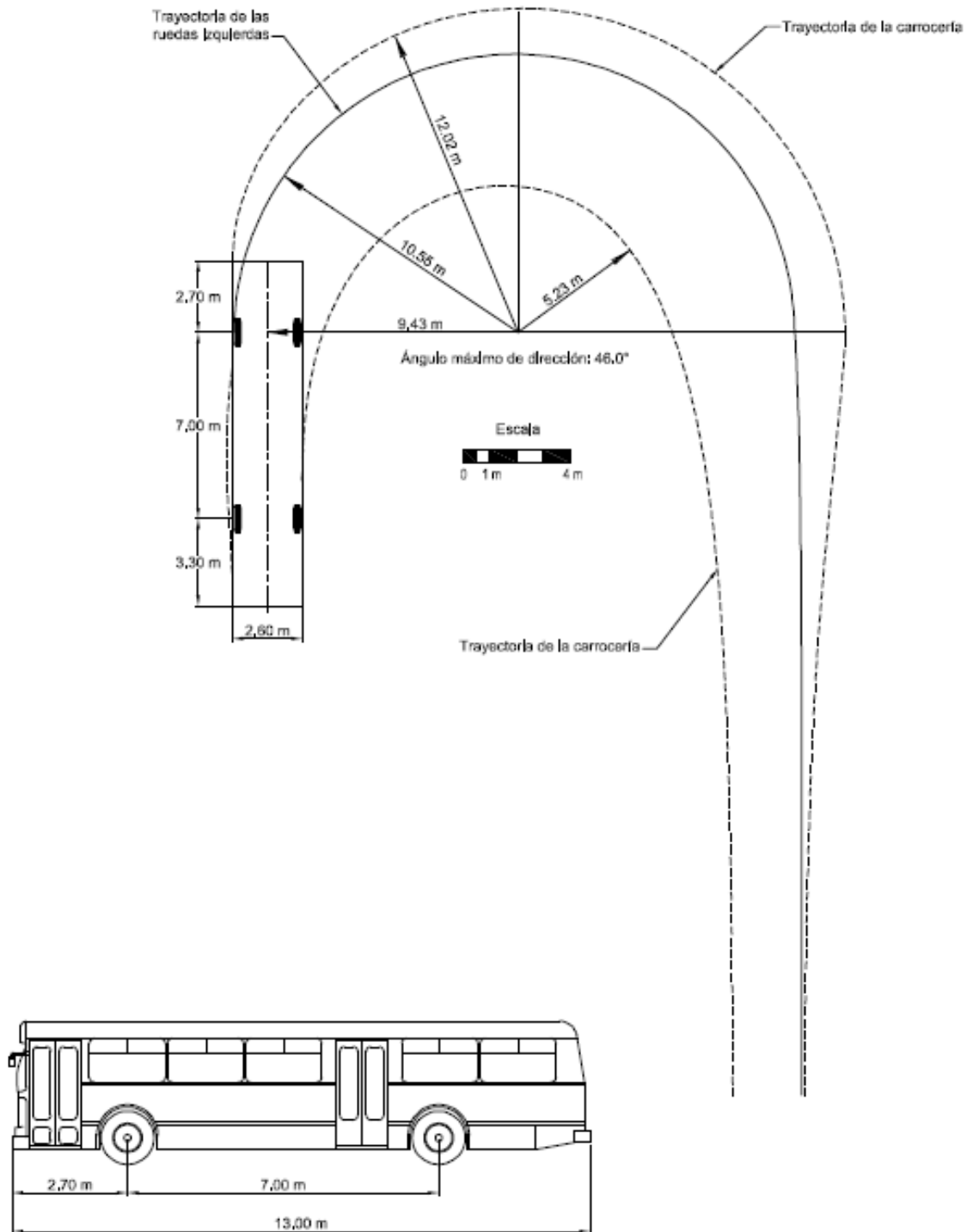


Figura 6: Trayectoria de giro bus grande. Fuente: Manual de Diseño Geométrico INVIAS 2008

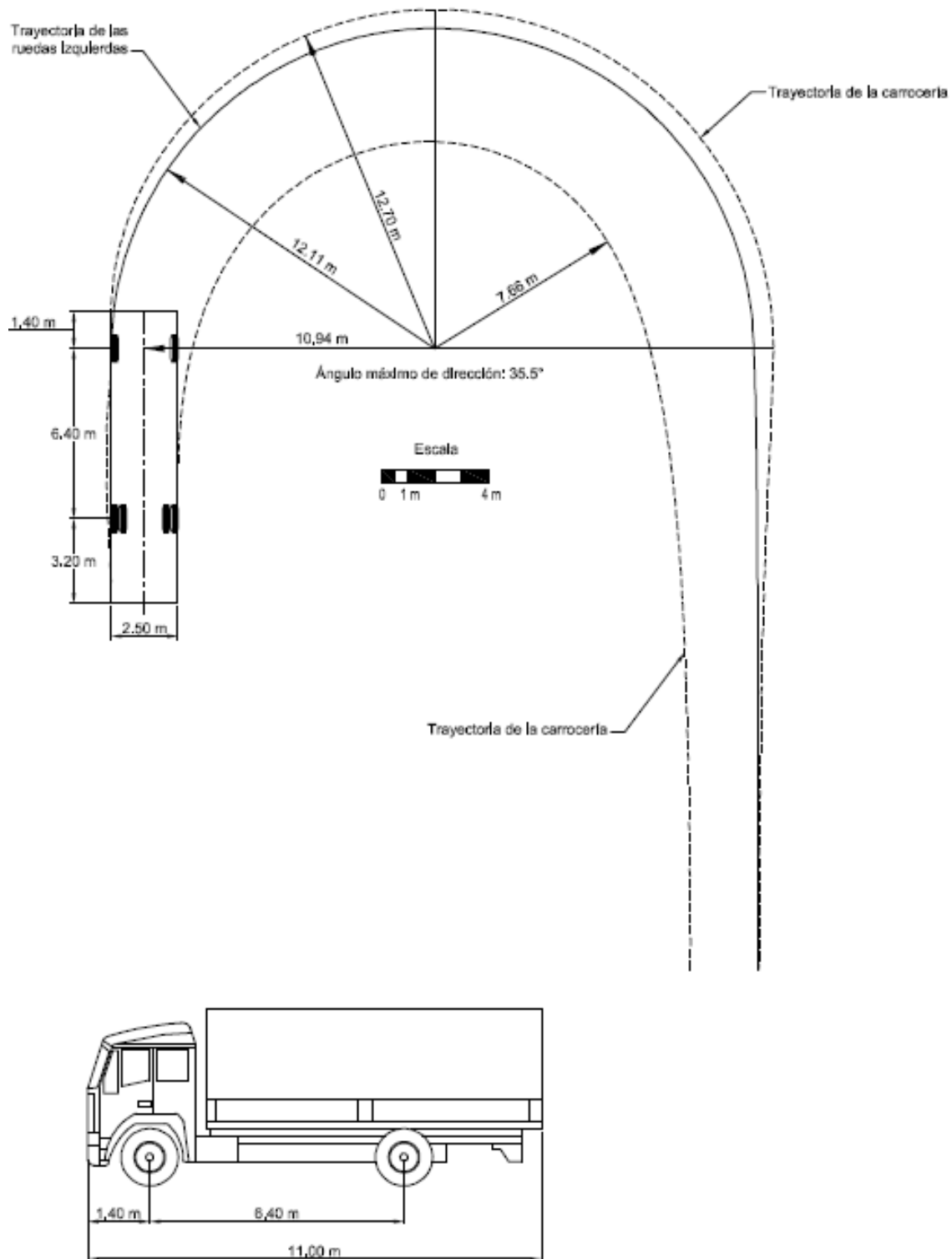


Figura 7: Trayectoria de giro camión categoría 2. Fuente: Manual de Diseño Geométrico INVIAS 2008

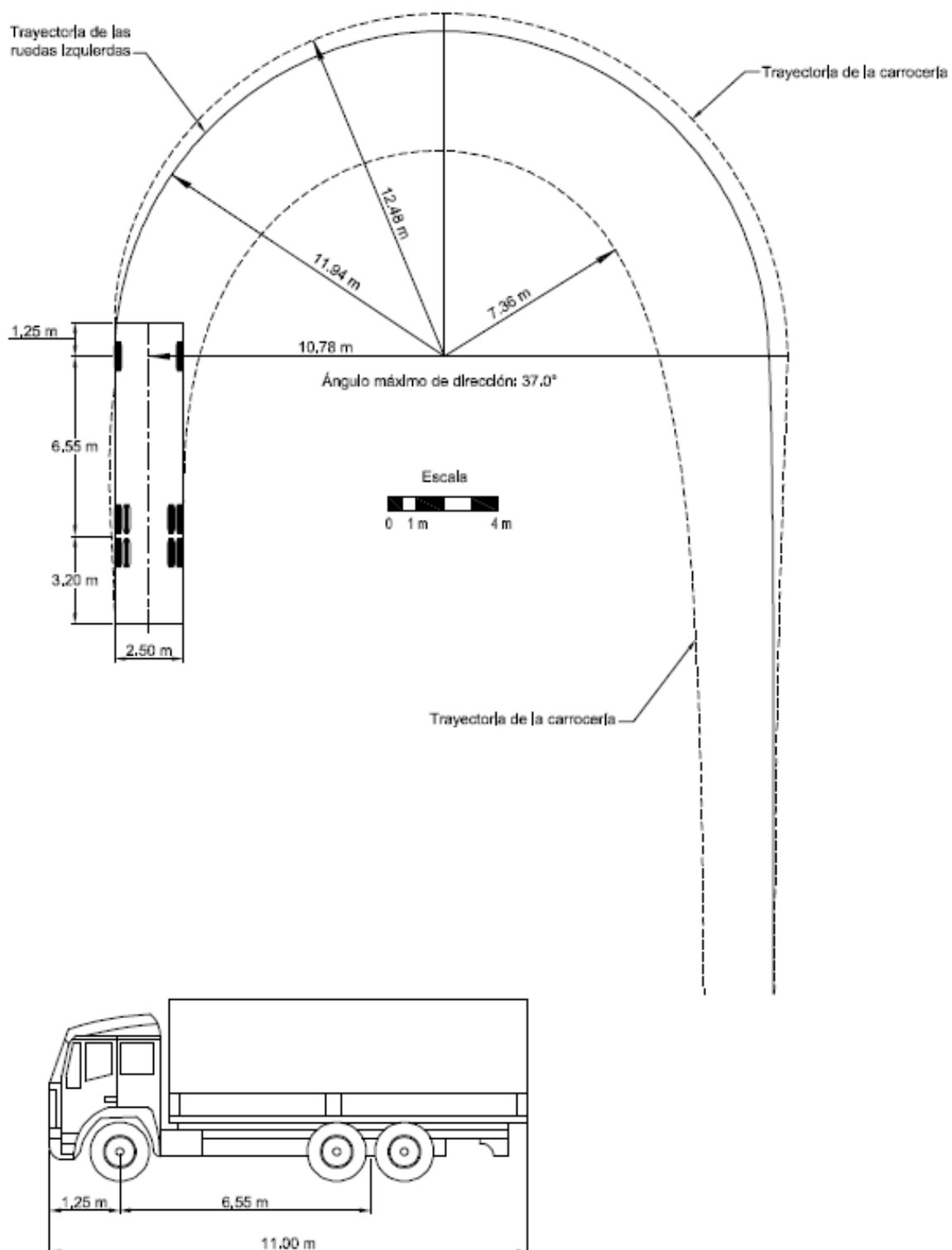


Figura 8: Trayectoria de giro camión categoría 3. Fuente: Manual de Diseño Geométrico INVIAS 2008

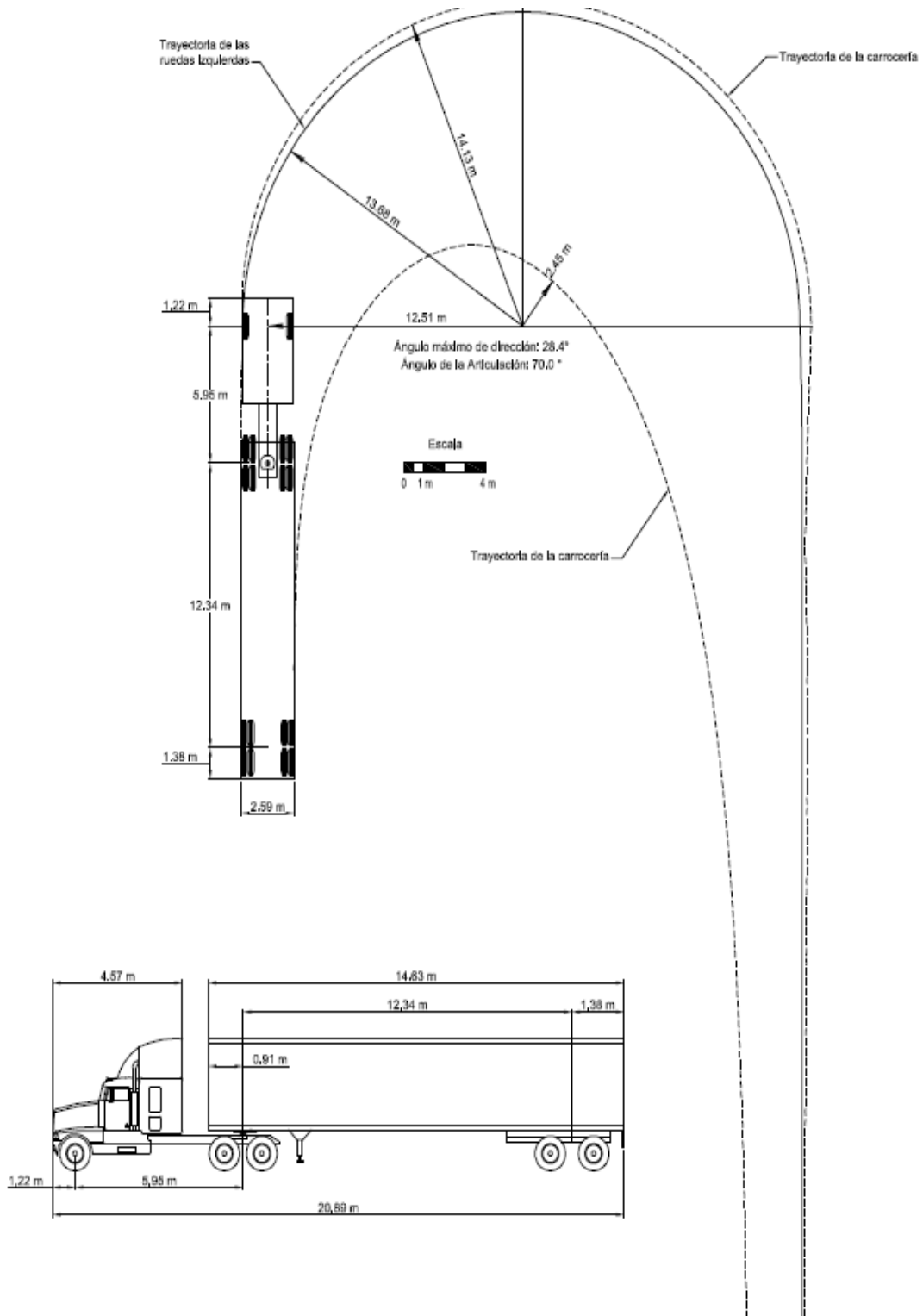


Figura 9: Trayectoria de giro camión categoría 3S2. Fuente: Manual de Diseño Geométrico INVIAS 2008

3.1.2 Distancia de visibilidad de parada (DP)

Es la distancia necesaria para que el conductor de un vehículo pueda frenar antes de llegar a cierto obstáculo que surja en su trayectoria

La distancia de visibilidad de parada para pavimentos húmedos, se calcula mediante la siguiente expresión:

$$D_p = 0.278 \times V_e \times t + 0.039 \times \frac{V_e^2}{a}$$

Donde:

DP: Distancia de Visibilidad de parada, en metros.

Ve: Velocidad Específica del elemento sobre el cual se ejerce la maniobra de frenado (VCH, VETH, VCV o VTV), en km/h.

t: Tiempo de percepción – reacción, igual a 2.5 s.

a: Rata de desaceleración, igual a 3.4 m/s².

Realizando la corrección numérica, la expresión es:

$$D_p = 0.695 \times V_e + \frac{V_e^2}{87.18}$$

Cuando la pendiente longitudinal sea superior a tres por ciento (3%), tanto en ascenso (+p) como en descenso (-p), se deberán realizar las correcciones necesarias a las distancias de visibilidad de parada dadas en la Tabla 4 para tramos a nivel. Con la siguiente ecuación se puede calcular la distancia recorrida durante el frenado (d) afectada por la pendiente de la rasante

$$d = \frac{V_e^2}{254 \times \left(\frac{a}{9.81} \pm \frac{p}{100} \right)}$$

Donde:

d: Distancia recorrida durante el trabajo de frenado, en metros.

p: Pendiente de la rampa, en porcentaje

La distancia corregida de visibilidad de parada en tramos con pendientes mayores a tres por ciento (3%) es:

$$D_p = 0.695 \times V_e + d$$

En la siguiente tabla se indican las distancias de visibilidad de parada en tramos con pendientes mayores a tres por ciento (3%).

Tabla 3: Distancia de visibilidad de parada. Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Vías INVIAS 2008

Velocidad específica (Ve)	Distancia percepción-reacción	Distancia durante el frenado a nivel	Distancia de visibilidad de parada	
			Calculada (m)	Redondeada (m)
(km/h)	(m)	(m)		
20	13,9	4,6	18,5	20
30	20,9	10,3	31,2	35
40	27,8	18,4	46,2	50
50	34,8	28,7	63,5	65
60	41,7	41,3	83	85
70	48,7	56,2	104,8	105
80	55,6	73,4	129	130
90	62,6	92,9	155,5	160
100	69,5	114,7	184,2	185
110	76,5	138,8	215,3	220
120	83,4	165,2	248,6	250
130	90,4	193,8	284,2	285

Tabla 4: Distancia de visibilidad de parada en descenso y ascenso. Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Vías INVIAS 2008

Velocidad específica (Ve)	Distancia de visibilidad de parada (m) Dp					
	Descenso			Ascenso		
	-3%	-6%	-9%	3%	6%	9%
20	20	20	20	19	18	18
30	32	35	35	31	30	29
40	50	50	53	45	44	43
50	66	70	74	61	59	58
60	87	92	97	80	77	75
70	110	116	124	100	97	93
80	136	144	154	123	118	114
90	164	174	187	148	141	136
100	194	207	223	174	167	160
110	227	243	262	203	194	186
120	263	281	304	234	223	214
130	302	323	350	267	254	243

3.1.2.1 Distancia de visibilidad de adelantamiento (D_a)

Se refiere a la distancia que tiene el conductor de un vehículo para que pueda adelantar a otro, sin correr el riesgo de que aparezca otro vehículo desplazándose en sentido contrario y pueda ocasionar una situación que afecte la integridad de los usuarios. Esta distancia solo se considera en calzadas bidireccionales, donde la maniobra de sobreapso se realiza en el carril del sentido opuesto.

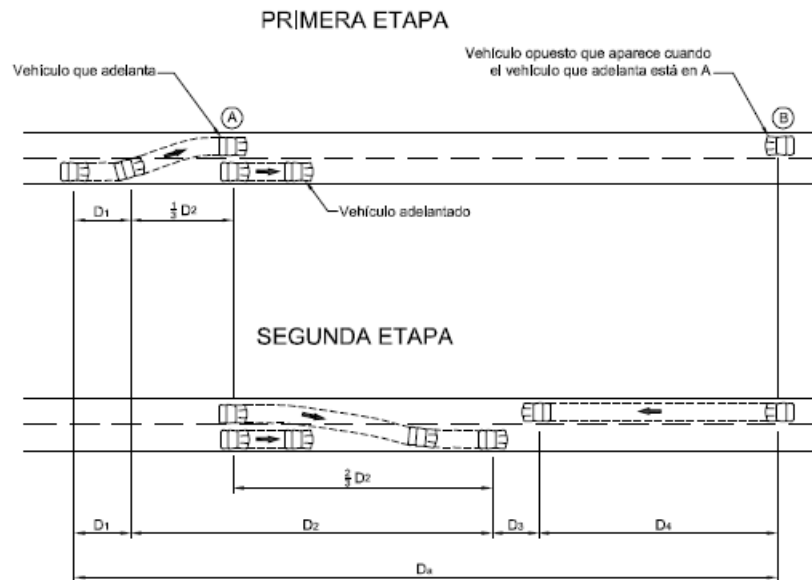


Figura 10: Etapas distancia de adelantamiento. Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Vías INVIAS 2008

La distancia de visibilidad de adelantamiento, se determina con la suma de cuatro distancias, de la siguiente manera:

$$D_a = D_1 + D_2 + D_3 + D_4$$

Donde:

D_a : Distancia de visibilidad de adelantamiento, en metros

D_1 : Distancia recorrida durante el tiempo de percepción y reacción, en metros.

D_2 : Distancia recorrida por el vehículo que adelanta durante el tiempo desde que invade el carril del sentido contrario hasta que regresa a su carril, en metros.

D_3 : Distancia de seguridad, una vez terminada la maniobra, entre el vehículo que adelanta y el vehículo que viene en la dirección opuesta, en metros.

D_4 : Distancia recorrida por el vehículo que viene en sentido opuesto (estimada en $\frac{2}{3}$ de D_2), en metros.

Por seguridad, la maniobra de adelantamiento se calcula con la velocidad específica de la entretangencia horizontal en la que se efectúa la maniobra.

$$D_1 = 0.278 \times t_1 \times \left(V - m + \frac{a \times t_1}{2} \right)$$

Dónde:

t1: Tiempo de la maniobra inicial, en segundos.

V: Velocidad del vehículo que adelanta, en km/h.

a: Promedio de aceleración que el vehículo necesita para iniciar el adelantamiento, en km/h/s.

m: Diferencia de velocidades entre el vehículo que adelanta y el que es adelantado, igual a 15 km/h en todos los casos.

El valor de las anteriores variables se indica en la Tabla 5 expresado para rangos de velocidades de 50-65, 66-80, 81-95 y 96-110 km/h. En la misma tabla se presentan los ejemplos de cálculo para ilustrar el procedimiento.

$$D_2 = 0.278 \times V \times t_2$$

Donde:

V: Velocidad del vehículo que adelanta, en km/h.

t2: Tiempo empleado por el vehículo al realizar la maniobra para volver a su carril, en segundos.

El valor de t2 se indica en la Tabla 5

D3=distancia variable entre 30 y 90 m

El valor de esta distancia de seguridad (D3) para cada rango de velocidades se indica en la Tabla 5

$$D_4 = \frac{2}{3} D_2$$

Tabla 5: Componentes de la maniobra de adelantamiento. Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Vías INVIAS 2008

Componente de la maniobra de adelantamiento	Rango de velocidad específica de la entretangencia horizontal en la que se efectúa la maniobra VETH (km/h)			
	50-65	66-80	81-95	96-110
Velocidad del vehículo que adelanta, V (km/h)	56,2	70	84,5	99,8
Maniobra inicial				

Componente de la maniobra de adelantamiento	Rango de velocidad específica de la entretangencia horizontal en la que se efectúa la maniobra VETH (km/h)			
	50-65	66-80	81-95	96-110
	Velocidad del vehículo que adelanta, V (km/h)			
	56,2	70	84,5	99,8
a: Promedio de aceleración (Km/h/s)	2,25	2,3	2,37	2,41
t1: Tiempo (s)	3,6	4	4,3	4,5
d1: Distancia de recorrido en la maniobra (m)	45	66	89	113
Ocupación del carril contrario:				
t2: Tiempo (s)	9,3	10	10,7	11,3
d2: Distancia de recorrido en la maniobra (m)	145	195	251	314
Distancia de seguridad:				
d3: Distancia de recorrido en la maniobra (m)	30	55	75	90
Vehículo en sentido opuesto:				
d4: Distancia recorrida en la maniobra (m)	97	130	168	209
Da = d1 + d2 + d3 + d4	317	446	583	726

En la tabla 6 se exponen los valores mínimos para la distancia de visibilidad de adelantamiento (Da), calculados de acuerdo a lo mencionado anteriormente

Tabla 6: Mínima distancia de visibilidad de adelantamiento. Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Vías INVIAS 2008

Velocidad específica de la entretangencia horizontal en la que se efectúa la maniobra VETH (km/h)	Velocidad del vehículo adelantado (km/h)	Velocidad del vehículo que adelanta, V (km/h)	Mínima distancia de visibilidad de adelantamiento Da (m)	
			Calculada	Redondeada
20	-	-	130	130
30	29	44	200	200
40	36	51	266	270
50	44	59	341	345
60	51	66	407	410
70	59	74	482	485
80	65	80	538	540

Velocidad específica de la entretangencia horizontal en la que se efectúa la maniobra VETH (km/h)	Velocidad del vehículo adelantado (km/h)	Velocidad del vehículo que adelanta, V (km/h)	Mínima distancia de visibilidad de adelantamiento Da (m)	
			Calculada	Redondeada
90	73	88	613	615
100	79	94	670	670
110	85	100	727	730
120	90	105	774	775
130	94	109	812	815

3.1.3 Tipos de empalmes básicos de las curvas

3.1.3.1 Empalme circular simple

A continuación se presentan los puntos característicos y regiones del empalme:

PI: Punto de cruce de dos tangentes que forman el empalme.

PC: Punto de inicio del empalme.

PT: Punto final del empalme.

Δ : Ángulo de deflexión en el PI, en grados o radianes.

R: Radio del arco circular, en metros.

LC: Longitud del arco circular, en metros.

T: Tangente del empalme, en metros.

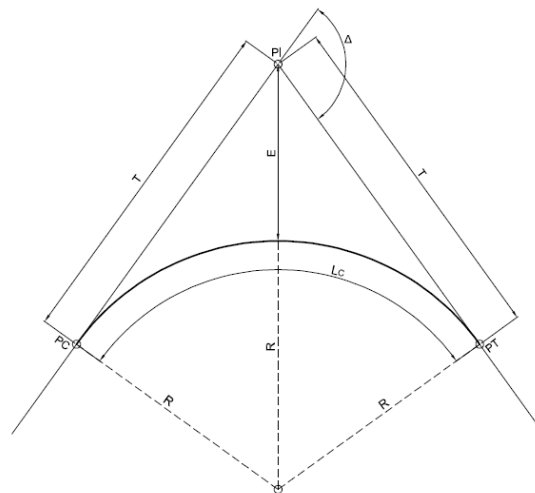


Figura 11: Empalme circular simple. Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Vías INVIAS 2008

$$Lc=R \times \Delta; \Delta \text{ en radianes}$$

$$T=R \times \tan \frac{\Delta}{4}; \Delta \text{ en grados}$$

$$E=T \times \tan \frac{\Delta}{4}; \Delta \text{ en grados}$$

3.1.3.2 Empalme espiral clotoide

Este tipo define el empalme entre una recta y arco circular de radio.

Un empalme espiral permite que la trayectoria sea más fácil de seguir por los usuarios, permitiendo disminuir o aumentar gradualmente la fuerza centrífuga a medida que el vehículo se desplaza por la curva.

De igual manera, en la longitud de la espiral ocurre la transición del peralte en forma progresiva y del sobreebancho entre tangentes y curvas con cierto peralte.

La ecuación fundamental de la espiral Clotoide es la siguiente:

$$L \times R = A^2$$

- Donde:
- L: Longitud desde el origen a un punto de la curva, en metros.
 - R: Radios en los puntos indicados, en metros.
 - A: Parámetro de la Clotoide, en metros

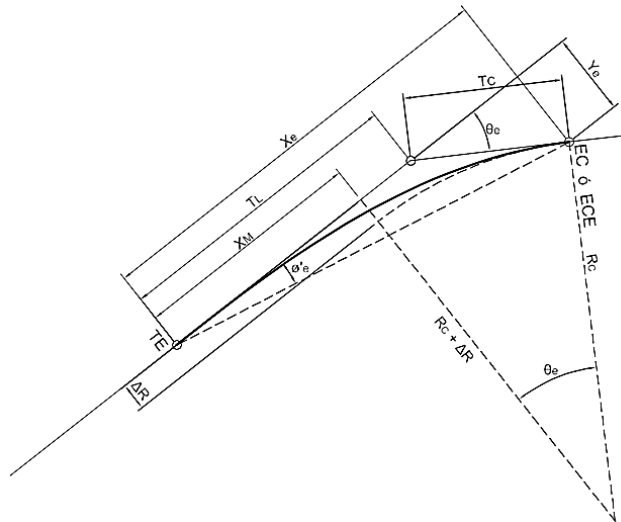


Figura 12: Espiral clotoide. Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Vías INVIAS 2008

3.1.3.3 Empalme espiral – círculo - espiral

Es el empalme de dos tangentes con un ángulo de deflexión (Δ) mediante arcos de transición tipo espiral clotoide de distintos o iguales parámetros y un arco circular.

3.1.4 Fricción transversal máxima ($f_{Tm\acute{a}x}$)

Se determina de acuerdo a factores como: el estado de la superficie de rodadura, la velocidad y el tipo de vehículo y el estado las llantas de los mismos. A continuación se exponen los valores de la AASHTO.

Tabla 7: Fricción transversal máxima. Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Vías 2008.

Velocidad Específica	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
Coefficiente de fricción transversal máxima $f_{Tm\acute{a}x}$	0,35	0,28	0,23	0,19	0,17	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11	0,09	0,08

3.1.5 Radio de curvatura mínimo ($R_{Cm\acute{i}n}$)

Es el valor límite de curvatura para una Velocidad Específica (V_{CH}) en relación al peralte máximo ($e_{m\acute{a}x}$) y el coeficiente de fricción transversal máxima ($f_{Tm\acute{a}x}$)

$$R_{Cm\acute{i}n} = \frac{(V_{CH})^2}{127 \times (e_{m\acute{a}x} + f_{Tm\acute{a}x})}$$

3.1.6 Transición del peralte

Las longitudes de transición se consideran a partir del punto donde el borde exterior del pavimento comienza a elevarse partiendo de un bombeo normal, hasta el punto donde se forma el peralte total de la curva. La longitud de transición está constituida por dos tramos principales: 1) la distancia (N) necesaria para levantar el borde exterior, del bombeo normal a la nivelación con el eje de la vía, llamado aplanamiento y 2) la distancia (L) necesaria para pasar de este punto al peralte total en la curva circular. La longitud total de transición se define mediante la siguiente expresión

$$L_t = L + N$$

$$N = \frac{BN \times L}{e_f}$$

L_t : Longitud total de transición, en metros.

L : Longitud del punto donde el peralte es cero al punto del peralte total en la curva circular, en metros.

N : Aplanamiento, en metros.

BN : Bombeo normal (vía pavimentada $BN = 2\%$)

e_f : Peralte total, en porcentaje (%).

3.1.6.1 Rampa de peralte

Es la diferencia que existe entre la inclinación del eje longitudinal de la calzada y la inclinación del borde de pavimento y está dada de la siguiente manera:

$$\Delta s = a \times \left(\frac{e_f - e_i}{L} \right)$$

Donde:

Δs : Inclinación longitudinal de la rampa de peraltes, en porcentaje (%).

L : Longitud de transición, $L = L_t - N$, en metros.

e_f : Peralte al finalizar el tramo de transición o peralte total, en porcentaje (%).

e_i : Peralte al iniciar el tramo de transición, en porcentaje (%).

a : Distancia del eje de giro al borde exterior de la calzada, en metros.

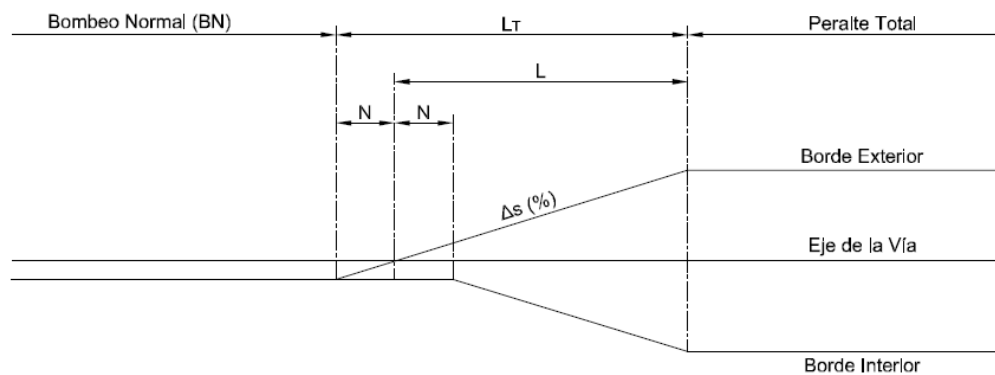


Figura 13: Diagrama de peralte. Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Vías INVIAS 2008

Tabla 8: Pendiente de la rampa de peraltes. Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Vías INVIAS 2008

Velocidad específica (Vch)(km/h)	Pendiente relativa de la rampa de peraltes Δs	
	Máxima (%)	Mínima (%)
20	1,35	
30	1,28	
40	0,96	
50	0,77	
60	0,6	
70	0,55	0.1 x a
80	0,5	
90	0,47	
100	0,44	
110	0,41	
120	0,38	
130	0,38	

3.1.6.2 Longitud de transición

La longitud de la transición (L) se calcula de acuerdo con la relación indicada en el numeral anterior. La se obtiene del valor de la longitud de transición (L) en función de la inclinación relativa de la rampa de peraltes (Δs), el ancho de la calzada que gira (a) y los cambios de peralte (e_f , e_i):

$$L = a \times b_w \times \left(\frac{e_f - e_i}{\Delta s} \right)$$

$$a = w \times n$$

Donde:

- L: Longitud de transición, en metros.
- $e_f - e_i$: Cambio de peralte, en porcentaje (%).
- a: Ancho de la calzada que gira, en metros.
- b_w : Factor de ajuste debido al número de carriles que giran.
- Δs : Inclinación relativa de la rampa de peraltes.
- W: Ancho del carril, en metros.
- n: Número de carriles que giran

El valor de Δs se obtiene de la Tabla 8, los demás valores se definen al diseñar los peraltes y el ancho de la sección transversal en el sitio.

El valor del ancho de calzada que gira (a) es igual al ancho de los carriles que giran. Cuando el número de carriles que rotan es mayor que uno (1) es conveniente el uso de un factor de ajuste (bw) para evitar una excesiva longitud de transición y desniveles muy altos entre el borde exterior y el eje de giro. En la siguiente tabla se indican los factores de ajuste (AASHTO - 2004).

Tabla 9: Factor de ajuste longitud de transición. Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Vías INVIAS 2008

Número de carriles que giran (n)	Factor de ajuste (bw)	Incremento en los carriles de giro respecto a un carril girado
1	1	1
1,5	0,83	1,25
2	0,75	1,5
2,5	0,7	1,75
3	0,67	2
3,5	0,64	2,25

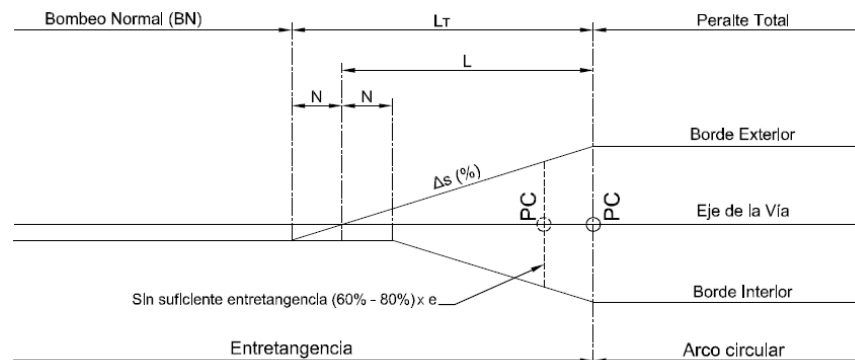


Figura 14: Diagrama de rampa de peraltes. Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Vías INVIAS 2008

3.1.7 Longitud de la curva espiral

3.1.7.1 Longitud mínima

Se determina mediante los siguientes criterios:

Criterio I. Variación uniforme de la aceleración centrífuga (J), no compensada por el peralte; su valor se determina mediante la siguiente relación

$$A_{\min} = \sqrt{\frac{V_{CH} \times R_C}{46.656 \times J} \left[\frac{V_{CH}^2}{R_C} - (1.27 \times e) \right]}$$

Dónde:

Amín: Parámetro mínimo, en metros.

VCH: Velocidad Específica de la curva horizontal, en km/h.

RC: Radio de cálculo de la clotoide, en metros.

J: Variación de la aceleración centrífuga, en m/s³.

e: Peralte de la curva, en porcentaje (%).

Se adoptan para J, los valores específicos dados en la siguiente tabla

Tabla 10: Variación de la aceleración centrífuga. Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Vías INVIAS 2008

Vch (km/h)	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
J (m/s ³)	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4

Criterio II. Limitación por transición del peralte, en la determinación de los valores del parámetro mínimo. Se tendrá en cuenta la inclinación máxima permitida de la rampa de peraltes (Δs). Así mismo, la distancia del eje de giro al borde de calzada (a), la cual toma valores de tres metros (3.0 m), tres metros con treinta centímetros (3.30 m), tres metros con cincuenta centímetros (3.50 m) y tres metros con sesenta y cinco centímetros (3.65 m).

$$A_{\min} = \sqrt{R_C \times \frac{e \times a}{\Delta s}}$$

Donde:

Amín: Parámetro mínimo, en metros.

RC: Radio de Cálculo de la clotoide, en metros

e: Peralte de la curva, en porcentaje (%).

a: Distancia del eje de giro al borde de la calzada, en metros.

s: Inclinación de la rampa de peraltes, en porcentaje (%).

Criterio III. Condición de percepción y de estética, la longitud de la curva de transición ha de ser suficiente para que se perciba de forma clara el cambio de curvatura, orientando adecuadamente al conductor y creando alineamientos armoniosos.

Para ello, es necesario que se cumplan los siguientes requisitos:

Criterio III.1 Se asume el disloque mínimo de veinticinco centímetros (0.25 m).

$$A_{\min} = \sqrt[4]{24 \times \Delta R \times R_C^3} ; A_{\min} \geq \sqrt[4]{6 \times R_C^3}$$

Donde:

A_{\min} : Parámetro mínimo, en metros.

ΔR : Disloque de la clotoide, en metros.

R_C : Radio de cálculo de la clotoide, en metros.

Criterio III.2. Ángulo de giro de la espiral mínimo de tres grados (3°)

$$A_{\min} = \sqrt{R_C \times L_e} = 0.3236 \times R_C$$

Donde:

A_{\min} : Parámetro mínimo, en metros.

R_C : Radio de cálculo de la clotoide, en metros.

L_e : Longitud de la clotoide, en metros.

e : Ángulo de giro de la espiral

3.1.7.2 Longitud máxima

El valor máximo del parámetro (A_{\max}), debe ser igual a uno punto uno veces (1.1) el radio (R_C) de la curva en estudio

$$A_{\max} = 1.1 \times R_C$$

3.1.8 Sobreancho en las curvas

Es el ancho adicional que necesita un vehículo de diseño para que no se vea forzado a reducir la velocidad en las curvas y pueda girar sin invadir los carriles adyacentes, garantizando la seguridad de los usuarios.

3.1.8.1 Determinación del sobreancho

3.1.8.1.1 Vehículos rígidos

En la figura 15 se ilustran dos vehículos pesados de tipo rígido, circulando en una curva de radio R_C .

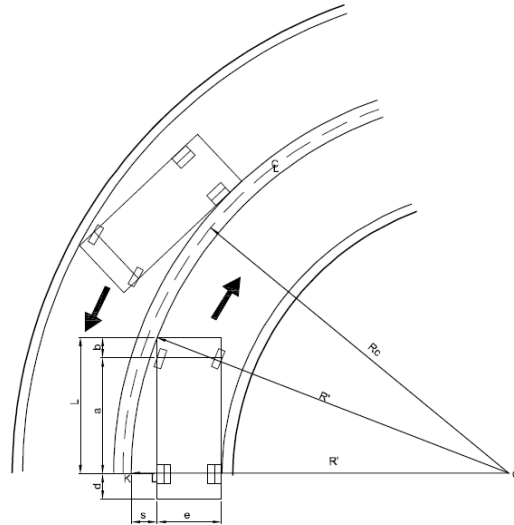


Figura 15: Giro de vehículos rígidos. Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Vías INVIAS 2008

Tabla 11: Dimensiones para el cálculo del sobreeje en vehículos rígidos. Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Vías INVIAS 2008

Categoría	a (m)	b (m)	d (m)	e (m)	L (m)
Vehículo liviano	2.9	0.8	1.3	1.8	3.7
Bus mediano	6.49	0.76	3.66	2.44	7.25
Bus grande	7	2.7	3.3	2.6	9.7
Camión de dos ejes	6.6	1.4	3.2	2.5	8
Camión de tres ejes	6.55	1.25	3.2	2.5	7.8

De la figura 15 se puede deducir que:

$$\overline{OK} = R'$$

Donde:

R' : Radio hasta el extremo del parachoques delantero.

$$s = R' - \overline{OL}$$

Donde:

s : Sobreeje requerido por un carril

$$s = R' - \sqrt{R'^2 - L^2}$$

Donde:

L : Distancia entre el parachoques delantero y el eje trasero del vehículo.

Si se asume que R' es sensiblemente igual a R_C , se tiene que para una calzada de n carriles:

$$S = n \times \left(R_C - \sqrt{R_C^2 - L^2} \right)$$

Donde:

S: Sobreancho requerido para la calzada.

n : Número de carriles.

R_C : Radio de la curva circular

3.1.8.1.2 Vehículos articulados

En la tabla 12 se presentan las dimensiones del vehículo articulado que se conforma por una unidad tractora y un semirremolque. Las dimensiones corresponden a las necesarias para el calcular el sobreancho.

Dimensiones para el cálculo del sobreancho requerido por el vehículo articulado representativo del parque automotor colombiano

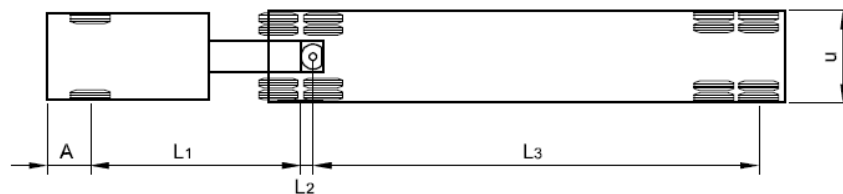


Figura 16: Dimensiones para el cálculo del sobreancho requerido por el vehículo articulado representativo del parque automotor colombiano. Manual de Diseño Geométrico de Vías INVIAS 2008

Tabla 12: Dimensiones para el cálculo del sobreancho requerido por el vehículo articulado representativo del parque automotor colombiano. Manual de Diseño Geométrico de Vías INVIAS 2008

Categoría	A (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	u (m)
3S2 Tractocamión de tres ejes con semirremolque de dos ejes	1,22	5,95	0	12,97	2,59

A continuación se presenta el procedimiento para el cálculo del sobreancho de la AASHTO versión 2004. En la figura 17 se presenta el esquema del sobreancho.

La expresión recomendada por la AASHTO es la siguiente:

$$S = A_C - A_T$$

Donde:

S: Sobreancho requerido por la calzada, en metros.

AC: Ancho de la calzada en curva, en metros.

AT: Ancho de la calzada en tangente, en metros.

Ahora bien:

$$A_c = n \times (U + C) + (n - 1) \times FA + Z$$

Donde:

n: Número de carriles de la calzada

U: Ancho ocupado por el vehículo cuando está describiendo la trayectoria en la curva, en metros.

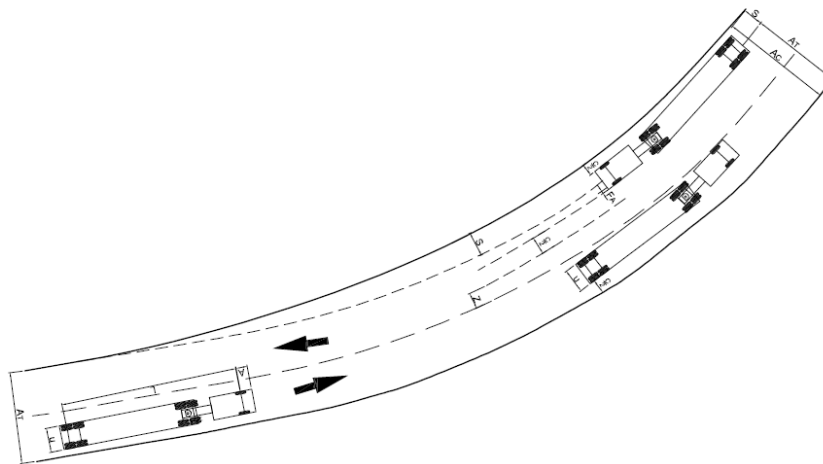


Figura 17: Esquema de sobreeje vehículos articulados. Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Vías INVIAS 2008

$$U = u + R_c - \sqrt{R_c^2 - (L_1 + L_2 + L_3)^2}$$

Donde:

u: Ancho del vehículo en tangente, en metros. Ver Tabla 12.

RC: Radio de la curva, en metros.

L1, L2 y L3: Dimensiones del vehículo, en metros. Ver tabla 12.

C: Espacio lateral de seguridad que requiere cada vehículo, en metros. En la tabla 13 se presenta el valor de C en función del ancho de la calzada.

Tabla 13: Ancho de calzada para valores de C. Manual de Diseño Geométrico de Vías INVIAS 2008

	ANCHO DE CALZADA (At) (m)		
	6	6,6	7,2
C (m)	0,6	0,75	0,9

FA: Avance del voladizo delantero del vehículo sobre el carril adyacente, cuando está describiendo la trayectoria curva.

$$F_A = \sqrt{R_C^2 + A \times (2 \times L_1 + A)} - R_C$$

Donde:

RC: Radio de la curva, en metros.

A: Valor del voladizo o saliente delantero del vehículo, en metros Ver Tabla 12.

L1: Distancia entre el eje delantero y el eje trasero de la unidad tractora, en metros. Ver Tabla 12.

Z: Sobrancho adicional de seguridad. Está en función de la curvatura y de la velocidad específica de la curva horizontal (VCH).

$$Z = 0.1 \times \sqrt{\frac{V_{CH}}{R_C}}$$

Donde:

VCH: Velocidad Específica de la curva, en km/h.

RC: Radio de la curva, en metros.

El valor calculado del sobrancho se debe redondear al decímetro superior. Todo el sobrancho requerido por la calzada se debe construir en el interior de la curva.

3.1.8.2 Transición del sobrancho

El sobrancho se debe desarrollar gradualmente a la entrada y a la salida de las curvas.

En la figura 17, se observa la transición del sobrancho (S), de tal manera que el sobrancho en cualquier punto (Sp), situado a una distancia Lp desde el inicio es:

$$S_p = \frac{S \times L_p}{L}$$

Donde:

Sp: Sobreancho correspondiente a la longitud L_p , en metros.

S: Sobreancho calculado para la curva, en metros.

L_p : Longitud elegida para determinar el sobreancho, en metros.

L: Longitud de transición del sobreancho, en metros.

En las curvas espiralizadas, la transición del sobreancho se realiza linealmente en la longitud de la espiral.

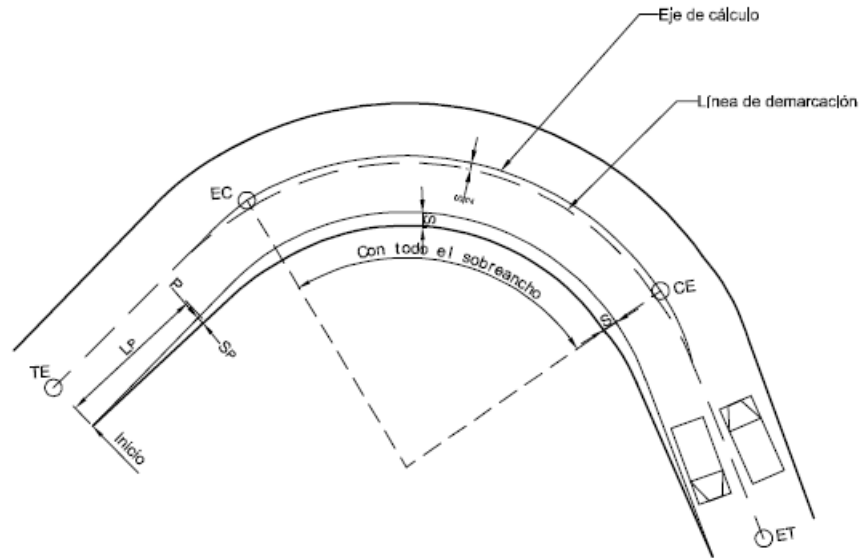


Figura 18: Transición de sobreancho. Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Vías INVIAS 2008

3.1.9 Diseño de carriles de cambio de velocidad

Se deben habilitar carriles especiales, que permitan a los vehículos hacer sus cambios de velocidad fuera de la calzada, para que puedan realizar la disminución de la velocidad o aumento y puedan salir o incorporarse a las calzadas principales sin que afecten la circulación normal de los vehículos.

3.1.9.1.1 Carriles de aceleración

Funciona para que los vehículos que deben incorporarse a la calzada principal puedan hacerlo con una velocidad aproximada a la de los vehículos que ya se encuentran circulando en la misma. Los carriles de aceleración deben ser paralelos a la calzada principal.

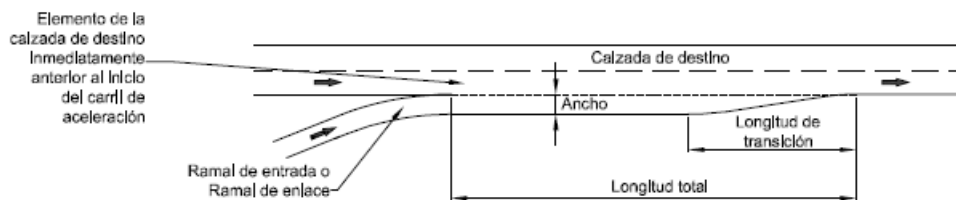


Figura 19: Carril de aceleración. Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Vías INVIAS 2008

Para el dimensionamiento del carril de aceleración es recomendable utilizar los valores de la tabla 14. El ancho de un carril de aceleración debe corresponder al del carril adyacente, pero no menor de tres metros con treinta centímetros (3.30 m).

3.1.9.1.2 Carriles de desaceleración

Permite que los vehículos puedan reducir su velocidad hasta alcanzar la de la calzada secundaria o la del ramal de enlace.

Tabla 14: Longitud carril de aceleración. Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Vías INVIAS 2008

Vía primaria (calzada de destino)									
Velocidad específica del ramal de entrada o de enlace (km/h)	Pare	25	30	40	50	60	80		
Velocidad específica del elemento de la calzada de destino inmediatamente anterior al inicio del carril de aceleración (km/h)	Longitud de la transición (m)		Longitud total del carril de aceleración, incluyendo la transición (m)						
50	45	90	70	55	45	-	-	-	
60	55	140	120	105	90	55	-	-	
70	60	185	165	150	135	100	60	-	
80	65	235	215	200	185	150	105	-	
100	75	340	320	305	290	255	210	105	
120	90	435	425	410	390	360	300	210	

Tabla 15: Longitud carril de desaceleración. Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Vías INVIAS 2008

Velocidad específica del ramal de salida o de enlace (km/h)	Pare	25	30	40	50	60	80		
Velocidad específica del elemento de la calzada de origen inmediatamente anterior al inicio del carril de desaceleración (km/h)	Longitud de la transición (m)		Longitud total del carril de desaceleración, incluyendo la transición (m)						
50	45	70	50	45	45	-	-	-	
60	55	90	70	70	55	55	-	-	

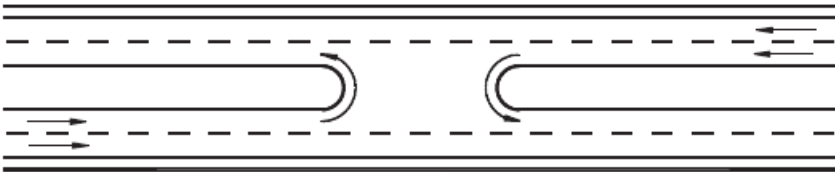

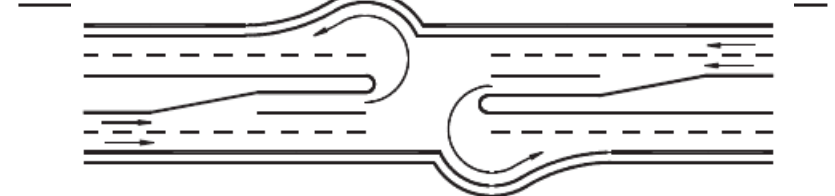
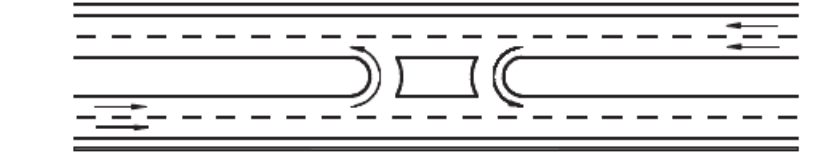
Velocidad específica del ramal de salida o de enlace (km/h)	Pare	25	30	40	50	60	80	
Velocidad específica del elemento de la calzada de origen inmediatamente anterior al inicio del carril de desaceleración (km/h)	Longitud de la transición (m)	Longitud total del carril de desaceleración, incluyendo la transición (m)						
70	60	105	90	90	75	60	60	-
80	65	120	105	105	90	75	65	-
100	75	140	125	125	110	95	80	75
120	90	160	145	145	130	130	110	90

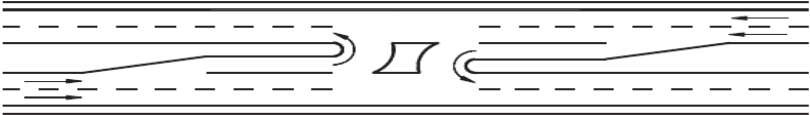
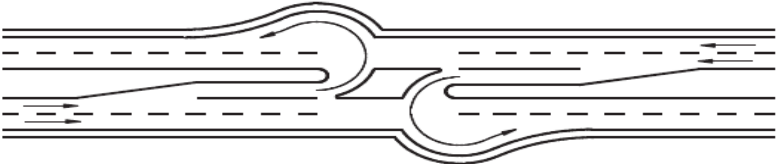
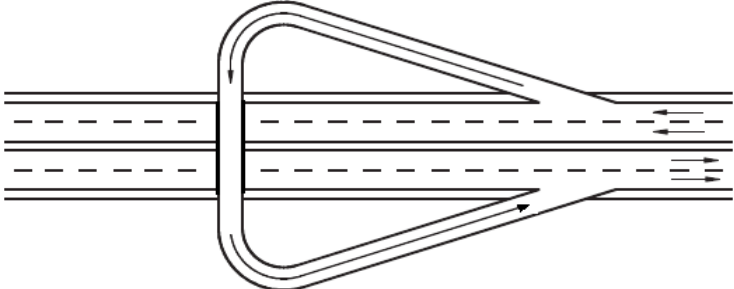
3.2 Marco teórico

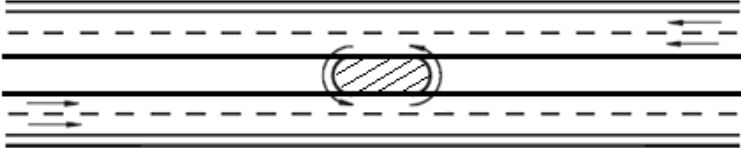
3.2.1 Clasificación de los retornos

La clasificación dada por el Programa Nacional de Cooperación de Investigación de Autopistas, NCHRP, por sus siglas en inglés “National Cooperative Highway Reserch Program” de Estados Unidos, se presenta con el fin de estimar la seguridad y desarrollo operacional de las aberturas de mediana, que para este caso, son los retornos.

Tabla 16: Tipos de retornos. Fuente: Programa Nacional de Cooperación de Investigación de Autopistas, NCHRP

N°	Tipo	Esquema	Uso
1	Apertura típica de separador sin carriles de aceleración ni desaceleración		Para pasos de emergencia, para ambulancias y paso de contraflujo de vehículos pequeños
2	Apertura típica de separador con carriles de aceleración y desaceleración		Para todo tipo de vehículos, recomendado para un nivel bajo de tráfico debido al entrecruzamiento presentado en la abertura
3	Apertura típica de separador con sobreaancho externo y carriles de aceleración y desaceleración		Para todo tipo de vehículos, recomendado para un nivel bajo de tráfico debido al entrecruzamiento presentado. A utilizar en carreteras que no tengan separador construido o separadas mediante new jersey
4	Apertura canalizada de separador sin carriles de aceleración ni desaceleración		No recomendado debido a la carencia de carriles de desaceleración. La isleta obliga a canalizar el tráfico, lo cual no es necesario para emergencias o contraflujos

N°	Tipo	Esquema	Uso
5	Apertura canalizada de separador con carriles de aceleración y desaceleración	 <p>The diagram shows a horizontal road with four lanes. The two outer lanes are solid lines, and the two inner lanes are dashed lines. A central opening is formed by two curved lines that meet at a point in the middle. Arrows indicate traffic flow from left to right. The opening is flanked by acceleration and deceleration lanes.</p>	Ampliamente utilizado en el país, se complementa con un carril de aceleración. Permite el giro de todo tipo de vehículos y evita canalizaciones
6	Apertura canalizada de separador con sobreelevación externa y carriles de aceleración y desaceleración	 <p>The diagram shows a horizontal road with four lanes. The two outer lanes are solid lines, and the two inner lanes are dashed lines. A central opening is formed by two curved lines that meet at a point in the middle. Arrows indicate traffic flow from left to right. The opening is flanked by acceleration and deceleration lanes.</p>	Para todo tipo de vehículos, recomendado para un nivel bajo de tráfico debido al entrecruzamiento presentado. A utilizar en carreteras que no tengan separador construido o separadas mediante new jersey
7	Jughandle - Conectantes por los carriles externos y paso a desnivel.	 <p>The diagram shows a horizontal road with four lanes. The two outer lanes are solid lines, and the two inner lanes are dashed lines. A vertical road crosses the horizontal road. The vertical road has a bridge over the horizontal road. Arrows indicate traffic flow from left to right on the horizontal road and from bottom to top on the vertical road.</p>	Poco utilizado por su alto costo al tener un puente o deprimido. Permite mantener una mayor velocidad y mayor seguridad al conectarse mediante los carriles de baja velocidad (externos). Recomendado para altos volúmenes de tráfico.

N°	Tipo	Esquema	Uso
8	Óvalo	 El diagrama muestra un cruce de tráfico en forma de óvalo. En el centro hay un círculo sombreado que representa el punto de cruce. A los lados del cruce, se ven carriles de aceleración y desaceleración, representados por líneas sólidas y punteadas. Flechas indican el flujo de tráfico en ambas direcciones.	Los carriles de aceleración y desaceleración, presentan entrecruzamientos con los vehículos que salen del retorno y los que entran, originando disminución de la velocidad en los carriles.

La NCHRP presenta 17 tipos de giros a la izquierda y retornos.

Los retornos deben ser completados con carriles de aceleración, y se recomienda la implementación del tipo Apertura típica de separador sin carriles de aceleración ni desaceleración únicamente para el paso de vehículos de emergencia.

De la misma manera, se presentan retornos que deben ser prohibidos en el ámbito de las carreteras primarias, y son aquellas que permiten realizar giros hacia predios, bocacalles o intersecciones de manera directa. Su uso está restringido a sectores urbanos, debido a la alta velocidad de las carreteras primarias, realizar el cruce obligaría a invadir el carril externo, dando a la posibilidad de colisiones. A continuación se esquematizan estos retornos.

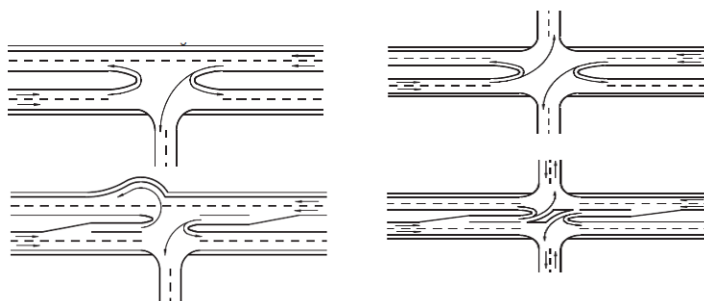


Figura 20: Retornos no permitidos en carreteras primarias. Fuente: Safety of U-Turns at Unsignalized Median Openings (NHCRP, 2004)

3.2.2 Ubicación de las aberturas de mediana para retornar

La NHCRP dicta que son siete los factores que se ven involucrados para la correcta ubicación de las aberturas en los separadores:

- a. Espacio entre aberturas
- b. Distancia de visibilidad de parada
- c. Distancia de visibilidad de intersección
- d. Velocidad de operación
- e. Longitud del giro
- f. Entrecruzamientos
- g. Tamaño y tipo de generador de tráfico

De esta manera, la AASHTO indica que los retornos deben ubicarse en las siguientes locaciones:

- a. Después de intersecciones, para evitar realizar mayores movimientos e inversión en infraestructura y de la misma manera permitiendo la conexión de la calzada principal con la que interseca, siempre y cuando no se plantee una intersección elevada.
- b. En sitios donde se presenten instalaciones de servicios públicos (bomberos, policía, estaciones de servicio, talleres, comercio, etc.)
- c. Donde se encuentren accesos a vías paralelas.

Adicionalmente, el autor de esta tesis, propone las siguientes ubicaciones:

Donde se encuentren accesos veredales y a predios, para evitar colisiones y maniobras forzadas por parte de los conductores, es necesario disponer de una longitud prudente desde la salida más próxima hasta donde la transición del carril de aceleración termina, lo cual se verá más adelante.

4. Metodología

Esta investigación tiene un enfoque cuantitativo de tipo aplicado. Mediante variables matemáticas y geométricas como los son los radios mínimos, longitudes de carriles, parámetros de las curvas espirales y circulares, análisis altimétrico y de visibilidad, se pretende realizar una estandarización de criterios de manera objetiva, basados en análisis de conceptos preconcebidos y teorías, al igual que geometría implementada en el diseño de los retornos de proyectos de 4G en ejecución y estructuración como los son los proyectos de la Concesión costera y la APP GICA; y la APP Pereira – La Victoria, respectivamente.

Esta investigación se realizará mediante la recolección de información presente en diversos países de todo el mundo, que ya hayan abordado el tema del diseño de los retornos. De igual forma, se realizarán los diseños geométricos de los retornos en Civil 3D de los corredores mencionados anteriormente, para compararlos y llegar a unos parámetros óptimos y seguros de geometría.

4.1 Proceso

- 1. Recolección de información:** Se recolectará toda la información disponible en internet de manuales, papers y artículos que involucren el diseño geométrico de retornos. Igualmente, la información base como la topografía, planta, perfil y secciones transversales de los corredores principales de los corredores en análisis, se compilará y preparará para las fases siguientes del desarrollo de la tesis.
- 2. Análisis de la información:** Se analizará la bibliografía y webgrafía disponible, para estandarizar parámetros base netamente conceptuales.
- 3. Proceso de la información:** Basado en la información recopilada, se analizarán y compilarán los parámetros de planta, para identificar radios mínimos, peraltes, diseño en perfil y sobreamanchos.
- 4. Diseño de retornos de los corredores:** Se diseñarán los retornos planteados en Civil 3D por los diseñadores de las concesiones o consultores, para identificar los parámetros en planta, perfil y sección transversal. Igualmente se planteará para cada uno una alternativa distinta a desnivel.
- 5. Análisis de diseños:** Una vez se tengan los diseños se analizarán a nivel geométrico, frente a los parámetros encontrados teóricamente.
- 6. Resultados:** Del análisis anterior, se estandarizar los parámetros y criterios de diseño geométrico para Colombia, basados en un análisis geométrico en teoría y otro práctico realizado con los diseños planteados para cada proyecto.

5. Desarrollo de objetivos

5.1 Parámetros en planta

En este apartado se relacionan aquellos factores que involucra el diseño de la planta del retorno.

5.1.1 Distancia de cambio de carril

Esta distancia se refiere a la distancia mínima que debe recorrer un vehículo para poder incorporarse en la calzada externa, después de haber ingresado a la calzada interna a través del carril de aceleración. Esta distancia se utilizará para establecer la ubicación mínima de una intersección o un acceso predial o veredal.

Es de precisar que la velocidad para calcular CC es la velocidad específica más 20 km/h, teniendo en cuenta que la velocidad del vehículo que adelanta debe ser mucho mayor para realizar el sobrepaso.

Para calcular esta longitud de ahora en adelante conocida como distancia de cambio de carril (CC), se deben utilizar las fórmulas de cálculo de distancia de velocidad de adelantamiento del Manual de Diseño Geométrico del INVIAS.

A continuación se mencionan las longitudes que componen los retornos:

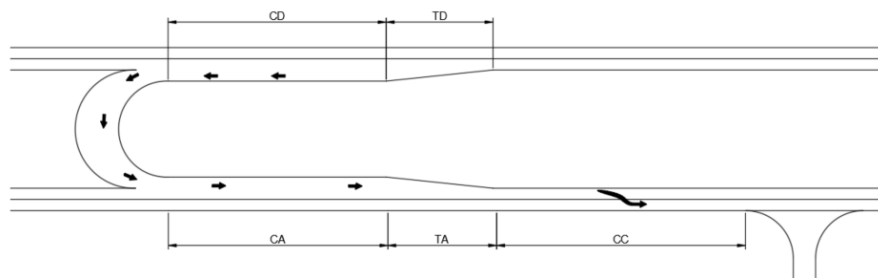


Figura 21: Longitudes del retorno. Fuente: autor

Donde:

CD: Longitud del carril de desaceleración, de acuerdo a lo estipulado en el Manual de Diseño Geométrico.

TD: Transición del carril de desaceleración, de acuerdo a lo estipulado en el Manual de Diseño Geométrico

CA: Longitud del carril de aceleración, de acuerdo a lo estipulado en el Manual de Diseño Geométrico

TA: Longitud de la transición del carril de aceleración, de acuerdo a lo estipulado en el Manual de Diseño Geométrico

CC: Longitud de cambio de carril, se calcula de la siguiente manera, para este caso se calculará de acuerdo a la nomenclatura del Manual de Diseño Geométrico INVIAS, 2008, en el apartado de distancia de visibilidad de adelantamiento:

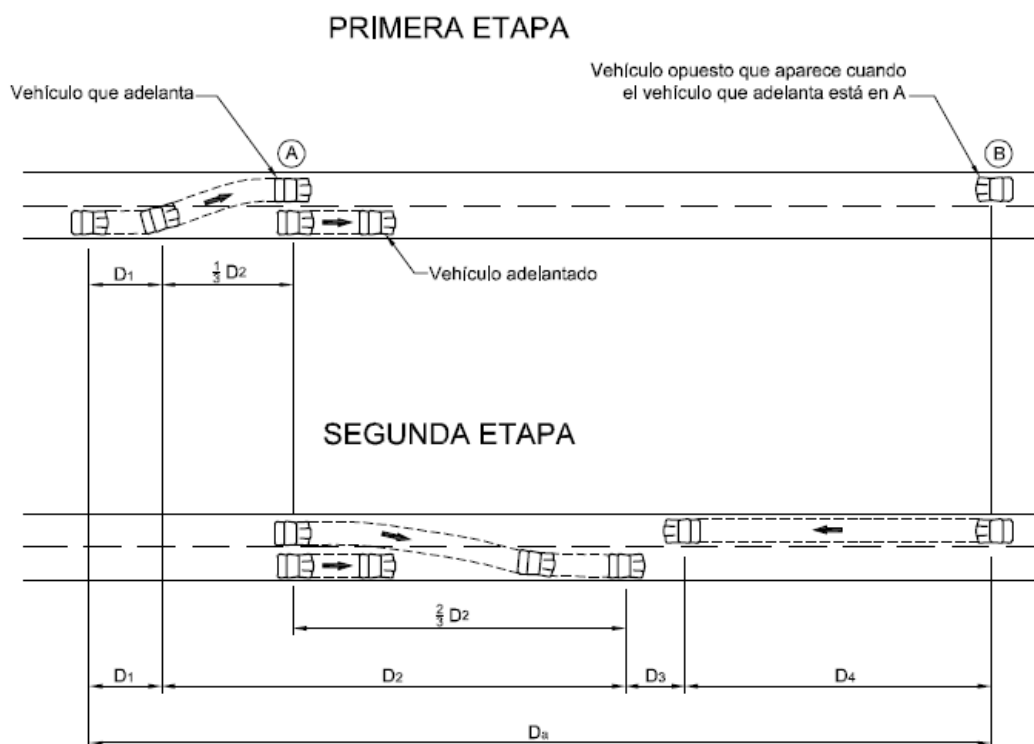


Figura 22: Distancia de visibilidad de adelantamiento. Fuente: MANUAL DE DISEÑO GEOMÉTRICO INVIAS, 2008

$$D_a = D_1 + D_2 + D_3 + D_4$$

D_a : Distancia de visibilidad de adelantamiento

D_1 : Distancia recorrida durante el tiempo de percepción y reacción, en metros

$$D_1 = 0.278 \times t_1 \times \left(v - m + \frac{a \times t_1}{2} \right)$$

Donde:

t_1 : Tiempo de la maniobra inicial, en segundos. Ver tabla 5

V : Velocidad del vehículo que adelanta, en km/h. Ver tabla 5

a : Promedio de aceleración que el vehículo necesita para iniciar el adelantamiento, en km/h/s. Ver tabla 5

m : Diferencia de velocidades entre el vehículo que adelanta y el que es adelantado, igual a 15 km/h en todos los casos. Ver tabla 5

D_2 : Distancia recorrida por el vehículo que adelanta durante el tiempo desde que invade el carril del sentido contrario hasta que regresa a su carril, en metros. En este caso sólo aplica $2/3$ de D_2 , debido a que el primer tercio ocurre cuando el vehículo debe invadir el carril del sentido contrario para adelantar el vehículo, aquí el vehículo mantendrá el mismo carril.

$$D_2 = 0.278 \times V \times t_2$$

Donde:

V : Velocidad del vehículo que adelanta, en km/h. Ver tabla 5

t_2 : Tiempo empleado por el vehículo al realizar la maniobra para volver a su carril, en segundos. Ver tabla 5

D_3 : Distancia variable de seguridad, una vez terminada la maniobra, entre el vehículo que adelanta y el vehículo que viene en la dirección opuesta, en metros.

D_4 : Distancia recorrida por el vehículo que viene en sentido opuesto (estimada en $2/3$ de D_2), en metros. En este caso igual a 0, ya que el acceso no está sujeto a desplazamiento.

Entonces:

$$CC = D_1 + 2/3 D_2 + D_3$$

Aplicando la fórmula y los parámetros mencionados, se muestran en la siguiente tabla los valores mínimos para que el vehículo realice el cambio de carril e ingrese al acceso, lo que se traduce en la distancia mínima a la que se debe ubicar un acceso desde el final de la transición del carril de aceleración:

Tabla 17: longitud mínima de cambio de carril y acceso. Fuente: Autor

Velocidad Específica (km/h)	Mínima longitud de cambio de carril y de acceso	
	Calculada (m)	Redondeada (m)
50	156,5	160
60	184,1	185
70	253,2	255
80	283,2	285
90	352,3	355
100	416,2	420
110	450,1	455

Esta longitud es medida desde el final de la transición del carril de aceleración. En casos donde el acceso presente carril de desaceleración, la distancia se calcula hasta el inicio de la transición del carril de desaceleración.

5.1.2 Ajuste por pendientes de longitudes de carriles de cambio de velocidad

Debido a que las pendientes longitudinales tienen efecto en el vehículo a la hora de acelerar o frenar, las longitudes se deben ajustar en función de la seguridad, eficiencia y optimización de espacios. A continuación se presentan los factores multiplicadores y las longitudes para cada situación, de acuerdo a las recomendaciones de la AASHTO.

5.1.2.1 Factor y longitud ajustada por pendientes carril de aceleración:

Es importante tener en cuenta el efecto que la pendiente tiene sobre el vehículo a la hora de acelerar para incorporarse al flujo principal. Así, si el carril de aceleración presenta una pendiente superior al 2%, la longitud total debe incrementarse y si la pendiente es negativa en sentido de avance del vehículo y menor al -2%, la longitud se puede disminuir en función de la seguridad, eficiencia y optimización de espacios. Estos aumentos o disminuciones en la longitud del carril de aceleración se realizarán de acuerdo a las recomendaciones dadas por la AASHTO. (Guía de Diseño de Vías Urbanas, Bogotá D.C.)

Tabla 18: Factor de ajuste por pendientes carril de aceleración. Fuente: Guía de Diseño de Vías Urbanas, Bogotá D.C

Velocidad de diseño vía principal (Km/h)	Factores de ajuste por pendiente, según la velocidad del ramal secundario						
	35	40	50	60	65	80	Todas las velocidades
							3% a 4% bajando
			3% a 4% subiendo				
60	1,3	1,3	1,4	1,4			0,7
70	1,3	1,3	1,4	1,4	1,5		0,65
80	1,3	1,4	1,5	1,5	1,5	1,6	0,65
90	1,4	1,4	1,5	1,5	1,5	1,6	0,6
100	1,5	1,5	1,6	1,7	1,7	1,8	0,6
110	1,5	1,5	1,6	1,7	1,7	1,8	0,6
			5% a 6% subiendo				
60	1,5	1,5	1,5				0,6
70	1,5	1,5	1,6	1,7			0,6
80	1,5	1,5	1,7	1,8	1,9		0,55
90	1,6	1,6	1,8	2	2,1	2,2	0,55
100	1,7	1,7	1,9	2,2	2,3	2,5	0,5
110	2	2	2,2	2,6	2,7	3	0,5

De acuerdo a los factores multiplicadores anteriores, se llega a las siguientes longitudes de acuerdo a las velocidades del retorno y la calzada principal.

Tabla 19: Longitud ajustada por pendientes carril de aceleración en subida. Fuente: Autor

Vía primaria (calzada de destino) 3% a 4% subiendo					
Velocidad específica del ramal de entrada o de enlace (km/h)		40	50	60	80
Velocidad específica del elemento de la calzada de destino inmediatamente anterior al inicio del carril de aceleración (km/h)	Longitud de la transición (m)	Longitud total del carril de aceleración, incluyendo la transición (m)			
60	55	117	77	-	-
70	60	176	140	84	-
80	65	259	225	158	-
90	70	322	308	240	112
100	75	435	408	357	189
110	85	510	496	442	279
Vía primaria (calzada de destino) 5% a 6% subiendo					
Velocidad específica del ramal de entrada o de enlace (km/h)		40	50	60	80
Velocidad específica del elemento de la calzada de destino inmediatamente anterior al inicio del carril de aceleración (km/h)	Longitud de la transición (m)	Longitud total del carril de aceleración, incluyendo la transición (m)			
60	55	135	83		
70	60	203	160	102	
80	65	278	255	189	
90	70	368	369	320	154
100	75	493	485	462	263
110	85	680	682	676	465

Tabla 20: Longitud ajustada por pendientes carril de aceleración en bajada. Fuente: Autor

Vía primaria (calzada de destino) 3% a 4% bajando								
Velocidad específica del ramal de entrada o de enlace (km/h)	Pare	25	30	40	50	60	80	
Velocidad específica del elemento de la calzada de destino inmediatamente anterior al inicio del carril de aceleración (km/h)	Longitud de la transición (m)	Longitud total del carril de aceleración, incluyendo la transición (m)						
60	55	98	84	73,5	63	38,5	-	-
70	60	120,3	107,3	97,5	87,75	65	39	-
80	61	152,8	139,8	130	120,3	97,5	68,3	-
90	62	168	156	147	138	123	96	42
100	63	204	192	183	174	153	126	63
110	64	234	222	210	204	186	156	93
Vía primaria (calzada de destino) 5% a 6% bajando								
Velocidad específica del ramal de entrada o de enlace (km/h)	Pare	25	30	40	50	60	80	
Velocidad específica del elemento de la calzada de destino inmediatamente anterior al inicio del carril de aceleración (km/h)	Longitud de la transición (m)	Longitud total del carril de aceleración, incluyendo la transición (m)						
60	55	84	72	63	54	33		
70	60	111	99	90	81	60	36	
80	61	129,3	118,3	110	101,8	82,5	57,8	
90	62	154	143	134,8	126,5	112,8	88	38,5
100	63	170	160	152,5	145	127,5	105	52,5
110	64	195	185	175	170	155	130	77,5

5.1.2.2 Longitud ajustada por pendientes carril de desaceleración:

Tabla 21: Factor de ajuste por pendientes carril de desaceleración. Fuente: Autor

Velocidad de diseño vía principal (km/h)	Factores de ajuste por pendiente	
	3% a 4% subiendo	3% a 4% bajando
Todas las velocidades	0,9	1,2
Todas las velocidades	5% a 6% subiendo	5% a 6% bajando
Todas las velocidades	0,8	1,35

Tabla 22: Longitud ajustada por pendientes carril de desaceleración en subida. Fuente: Autor

Vía primaria (calzada de destino) 3% a 4% subiendo									
Velocidad específica del ramal de salida o de enlace (km/h)	Pare	25	30	40	50	60	80		
Velocidad específica del elemento de la calzada de origen inmediatamente anterior al inicio del carril de desaceleración (km/h)	Longitud de la transición (m)	Longitud total del carril de desaceleración, incluyendo la transición (m)							
50	45	63	45	41	41	-	-	-	
60	55	81	63	63	50	50	-	-	
70	60	94,5	81	81	68	54	54	-	
80	65	108	95	95	81	68	59	-	
90	70	117	99	104	90	86	72	68	
100	75	126	113	113	99	86	72	68	
110	85	135	122	122	108	108	86	77	
120	90	144	131	131	117	117	99	81	
Vía primaria (calzada de destino) 5% a 6% subiendo									
Velocidad específica del ramal de salida o de enlace (km/h)	Pare	25	30	40	50	60	80		
Velocidad específica del elemento de la calzada de origen inmediatamente anterior al inicio del carril de desaceleración (km/h)	Longitud de la transición (m)	Longitud total del carril de desaceleración, incluyendo la transición (m)							
50	45	56	40	36	36	-	-	-	
60	55	72	56	56	44	44	-	-	
70	60	84	72	72	60	48	48	-	
80	65	96	84	84	72	60	52	-	
90	70	104	88	92	80	76	64	60	
100	75	112	100	100	88	76	64	60	
110	85	120	108	108	96	96	76	68	
120	90	128	116	116	104	104	88	72	

Tabla 23: Longitud ajustada por pendientes carril de desaceleración en bajada. Fuente: Autor

Vía primaria (calzada de destino) 3% a 4% bajando								
Velocidad específica del ramal de salida o de enlace (km/h)	Pare	25	30	40	50	60	80	
Velocidad específica del elemento de la calzada de origen inmediatamente anterior al inicio del carril de desaceleración (km/h)	Longitud de la transición (m)	Longitud total del carril de desaceleración, incluyendo la transición (m)						
50	45	84	60	54	54	-	-	-
60	55	108	84	84	66	66	-	-
70	60	126	108	108	90	72	72	-
80	65	144	126	126	108	90	78	-
90	70	156	132	138	120	114	96	90
100	75	168	150	150	132	114	96	90
110	85	180	162	162	144	144	114	102
120	90	192	174	174	156	156	132	108

Vía primaria (calzada de destino) 5% a 6% bajando								
Velocidad específica del ramal de salida o de enlace (km/h)	Pare	25	30	40	50	60	80	
Velocidad específica del elemento de la calzada de origen inmediatamente anterior al inicio del carril de desaceleración (km/h)	Longitud de la transición (m)	Longitud total del carril de desaceleración, incluyendo la transición (m)						
50	45	95	68	61	61	-	-	-
60	55	122	95	95	74	74	-	-
70	60	142	122	122	101	81	81	-
80	65	162	142	142	122	101	88	-
90	70	176	149	155	135	128	108	101
100	75	189	169	169	149	128	108	101
110	85	203	182	182	162	162	128	115
120	90	216	195,8	195,8	175,5	175,5	149	122

5.1.3 Radio mínimo del retorno

El radio o los radios mínimos del retorno, según sea el caso, dependerán de la disponibilidad predial, sin que este sea menor que el radio mínimo de giro del vehículo de diseño

especificado en los numerales anteriores. Se debe tener en cuenta que, a menos de que exista restricción alguna para vehículos pesados, el retorno se diseñara para un vehículo 3S2.

Teniendo en cuenta que estos retornos se diseñan en el separador y que se procura que la separación de las dos calzadas sea mínima, es poco probable que se encuentre un retorno de más de 30 m de radio de giro de trayectoria.

Para identificar los radios aplicables a los retornos, se realiza la modelación con el software Vehicle Tracking de Autodesk.

Se parte de un radio de 13 m, ya que con 12 m el vehículo no puede ubicarse en la posición correcta para posicionarse en el carril de aceleración, como lo muestra el siguiente esquema. Por lógicas razones, con radios menores el vehículo tampoco podrá terminar su desplazamiento.

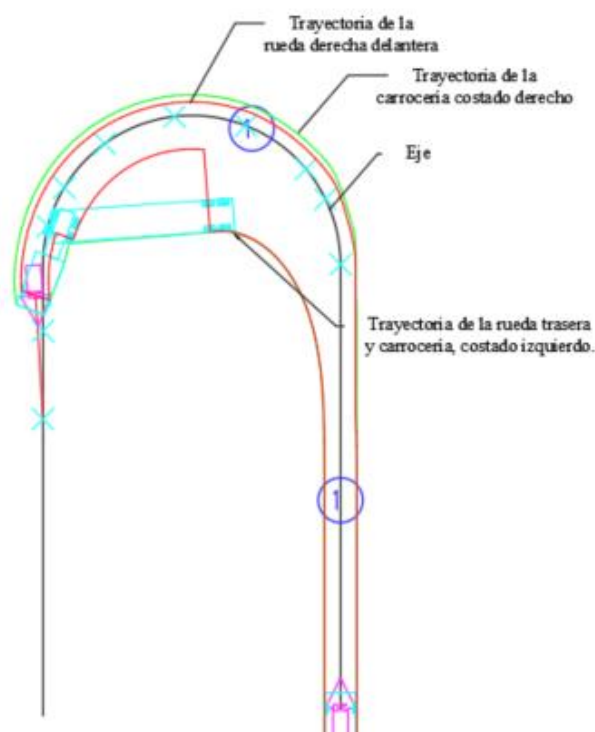


Figura 23: Trayectoria de giro vehículo 3S2. Radio 12 m. Fuente: Autor

Así las cosas, a mayores radios, mayor será la velocidad que puede adquirir un vehículo y por lo tanto debe ser mayor a 13 m. Si se proyectan radios muy grandes, se debe hacer el análisis de los parámetros del mismo individualmente, de tal forma que se verifique si se puede diseñar como un trazado común y aplicar la normativa que indica el Manual de Diseño Geométrico.

5.1.4 Peraltes

El peralte aplicado al retorno estará sujeto a las condiciones de las calzadas adyacentes, en especial sobre el peralte o bombeo que tengan las mismas, esto con el fin de evitar cambios bruscos entre pendientes transversales que puedan ocasionar molestias en los ocupantes del vehículo o daños a este. El valor del peralte, será producto del radio de cada retorno y se aplicará de acuerdo a la normativa vigente.

Las siguientes consideraciones deben tenerse en cuenta al momento de calcular el peralte para el retorno.

Como mínimo se debe implementar el 2% de bombeo en todos los radios de diseño y anchos, con el fin de evacuar el agua en el retorno.

El peralte máximo debe, en lo posible, desarrollarse en toda la longitud del retorno, siempre y cuando la rampa de peraltes sea la adecuada; esto quiere decir que los carriles de aceleración y desaceleración deben variar su peralte respecto a la calzada adyacente, siempre y cuando se garantice que la rampa de peraltes cumpla para la velocidad específica del corredor.

5.1.4.1 Rampa de peraltes

Cuando no es posible ajustar el peralte de los carriles de aceleración ni desaceleración, se debe garantizar que el retorno tenga peralte y que no exceda la pendiente máxima de la rampa de peraltes.

Ahora, como se verá más adelante, los diseñadores de los proyectos que se analizarán diseñan las calzadas con el mismo bombeo y peralte de la calzada, y pocas veces se entrega una cartera de replanteo distinta para estos carriles.

Cuando la situación anterior ocurre, se pueden presentar las siguientes consideraciones para la forma de cálculo del peralte cuando no es posible ajustar el peralte de los carriles de aceleración y desaceleración.

La rampa de peraltes se calcula de acuerdo a siguiente fórmula, para una velocidad de 30 km/h, y no podrá exceder 1.28%.

Partiendo de la siguiente consideración de la Guía de Diseño de Vías Urbanas de Bogotá:

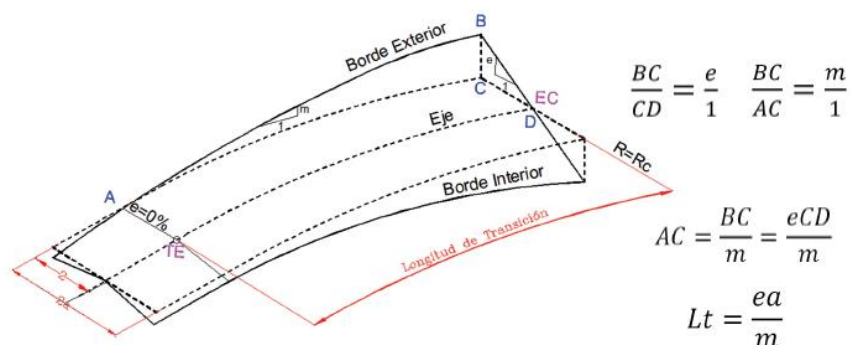


Figura 24: Cálculo de longitud de transición. Fuente Guía de Diseño de Vías Urbanas de Bogotá

Donde:

Lt=Longitud de transición

e= Diferencia aritmética de peraltes

a= Ancho desde el eje al borde de pavimento más lejano

m= Rampa de peralte o su equivalente



Figura 25: Elementos para el cálculo de la pendiente de la rampa de peralte. Fuente: Autor

El peralte del retorno variará de acuerdo al peralte o al bombeo de las calzadas adyacentes con el fin de permitir que exista una transición adecuada y se garantice la seguridad del usuario, sin que la variación puede generar torsión alguna en el vehículo articulado. Lo anterior quiere decir que no existirá un peralte constante en el retorno.

No se asignará un valor arbitrario que puede resultar en pendientes de la rampa de peraltes muy altas que sean incómodas e inseguras para el vehículo.

La rampa de peraltes estará directamente relacionada con el peralte de las dos calzadas conectadas por el retorno, donde el peralte de la calzada donde se ingresa al retorno será conocido como peralte de entrada y finalizará con el peralte de la siguiente calzada (peralte de salida).

El cálculo de la longitud de transición de peralte se calcula en base al $\Delta e\%$, que será la diferencia aritmética entre el peralte de entrada y el máximo, y el peralte máximo con el de salida.

Para el cálculo de la diferencia de peraltes, se asignarán los signos (-/+) a el valor del peralte de cada calzada, de la siguiente manera.

Para los ejemplos se asume que la calzada derecha tiene 6% y la izquierda 5% de peralte. Se debe recordar que los siguientes cálculos son independientes del costado de cada calzada, sólo se tiene en cuenta el valor.

- Si las dos calzadas están drenando hacia el separador, las dos serán de valor negativo y el valor menor será sustraído del mayor, con el fin de que se obtenga un valor positivo. Ej.: $(-5\%) - (-6\%) = 1\%$
- Si una calzada drena hacia el separador y la otra hacia fuera, el valor mayor será positivo y el menor negativo. Ej.: $(6\%) - (-5\%) = 11\%$
- Si las dos calzadas drenan hacia fuera, se realiza la resta de cada valor de -2% . Ej.: $(5\%) - (-2\%) = 7\%$ y $(6\%) - (-2\%) = 8\%$

Los últimos términos son el ancho de cada carril y la rampa de peralte máxima, que para este caso será de 1.28%.

En la siguiente tabla se muestran los datos obtenidos para valores típicos de anchos y $\Delta e\%$.

Tabla 24: Longitud mínima de transición. Fuente: Autor

		Longitud mínima de transición (m)									
Ancho de carril (m)	$\Delta e\%$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
3,0		0,00	2,34	4,69	7,03	9,38	11,72	14,06	16,41	18,75	
4,0		0,00	3,13	6,25	9,38	12,50	15,63	18,75	21,88	25,00	
5,0		0,00	3,91	7,81	11,72	15,63	19,53	23,44	27,34	31,25	
6,0		0,00	4,69	9,38	14,06	18,75	23,44	28,13	32,81	37,50	
7,0		0,00	5,47	10,94	16,41	21,88	27,34	32,81	38,28	43,75	
8,0		0,00	6,25	12,50	18,75	25,00	31,25	37,50	43,75	50,00	
9,0		0,00	7,03	14,06	21,09	28,13	35,16	42,19	49,22	56,25	
10,0		0,00	7,81	15,63	23,44	31,25	39,06	46,88	54,69	62,50	
11,0		0,00	8,59	17,19	25,78	34,38	42,97	51,56	60,16	68,75	
12,0		0,00	9,38	18,75	28,13	37,50	46,88	56,25	65,63	75,00	
13,0		0,00	10,16	20,31	30,47	40,63	50,78	60,94	71,09	81,25	
14,0		0,00	10,94	21,88	32,81	43,75	54,69	65,63	76,56	87,50	
15,0		0,00	11,72	23,44	35,16	46,88	58,59	70,31	82,03	93,75	

Tabla 25: Longitud mínima de transición. Fuente: Autor

Ancho de carril (m)	Longitud mínima de transición (m)								
	$\Delta e\%$	9	10	11	12	13	14	15	16
3,0		21,09	23,44	25,78	28,13	30,47	32,81	35,16	37,50
4,0		28,13	31,25	34,38	37,50	40,63	43,75	46,88	50,00
5,0		35,16	39,06	42,97	46,88	50,78	54,69	58,59	62,50
6,0		42,19	46,88	51,56	56,25	60,94	65,63	70,31	75,00
7,0		49,22	54,69	60,16	65,63	71,09	76,56	82,03	87,50
8,0		56,25	62,50	68,75	75,00	81,25	87,50	93,75	100,00
9,0		63,28	70,31	77,34	84,38	91,41	98,44	105,47	112,50
10,0		70,31	78,13	85,94	93,75	101,56	109,38	117,19	125,00
11,0		77,34	85,94	94,53	103,13	111,72	120,31	128,91	137,50
12,0		84,38	93,75	103,13	112,50	121,88	131,25	140,63	150,00
13,0		91,41	101,56	111,72	121,88	132,03	142,19	152,34	162,50
14,0		98,44	109,38	120,31	131,25	142,19	153,13	164,06	175,00
15,0		105,47	117,19	128,91	140,63	152,34	164,06	175,78	187,50

La longitud mínima de transición estará sujeta al radio de curvatura de la circular, al igual que la longitud entre el inicio o el punto donde, en una proyección perpendicular no se cruce con la línea de contacto del borde del retorno con el del carril de desaceleración o aceleración; bien sea para que no se afecten las calzadas adyacentes (cuando no varía el peralte de los carriles de aceleración o desaceleración) o, para que el peralte máximo y constante ocurra en todo el retorno (cuando varía el peralte de los carriles de aceleración o desaceleración).

Por otro lado, es preferible realizar la transición del peralte en los carriles de aceleración y desaceleración, teniendo en cuenta las consideraciones de la tabla anterior. En este caso, el peralte asignado al retorno transcurrirá a lo largo de todo el mismo y no será variable, sin embargo, los carriles de aceleración y desaceleración, realizarán la transición sin exceder las rampas de peralte correspondientes para las velocidades de diseño.

5.2 Diseño del perfil longitudinal

Es recomendable definir parámetros como las pendientes mínimas y máximas, valores K y longitudes de curva para garantizar la comodidad del usuario y seguridad para su vehículo.

Como se vio anteriormente, la planta se diseña basada en un vehículo 3S2, el cual es el más exigente para anchos y radios en Colombia. Ahora, como un vehículo liviano puede desarrollar mayores velocidades en los retornos, de hasta 30 km/h en radios de eje de diseño menores a 40 m, se deben implementar parámetros adecuados para esta velocidad.

5.2.1 Pendiente longitudinal mínima

En bajas longitudes es posible tener una pendiente longitudinal de 0% ya que las condiciones de empalme entre calzadas puede que así lo obligue, por eso se debe considerar que el bombeo o peralte permitirá la evacuación de las aguas lluvias de la superficie de rodadura a un extremo del carril. Ahora, cuando esta condición se dé, sí se debe garantizar la pendiente mínima para las cunetas hasta descolar en la obra hidráulica que corresponda según diseño, esto puede producir la profundización de las cunetas a tal punto que sea necesaria la instalación de un cárcamo o rejilla para evitar que los vehículos terminen invadiendo la obra hidráulica longitudinal. Cuando no se disponga de cuneta en terrenos muy planos, se deben proteger los terraplenes con obras de drenaje en la pata de los mismos para evitar la infiltración del agua en el terraplén o la estructura de pavimento, y el represamiento de la misma.

Si se tiene en cuenta que se procura diseñar el empalme con sólo un PIV a razón de que la longitud de dos curvas no cumplirá lo indicado por el Manual de Diseño Geométrico, se debe prever que se generará un punto bajo o uno alto, dependiendo del empalme entre calzadas. Si se produce un punto bajo será necesaria la construcción de una alcantarilla o sumidero para evitar el represamiento del agua.

5.2.2 Pendiente longitudinal máxima

Para velocidad de 30 km/h el Manual de Diseño Geométrico indica que se debe implementar una pendiente máxima de 12% para vías terciarias. Si se tiene en cuenta que el recorrido del retorno es corto, este valor se puede aumentar en descenso a juicio del diseñador, siempre y cuando garantice la estabilidad del vehículo y el cumplimiento de las longitudes y parámetros K de las curvas verticales.

5.2.3 Longitud mínima de la tangente (separación de PIV)

Como la longitud del retorno es mínima, este factor no puede ser aplicable según el Manual de Diseño Geométrico. Claro está que en lo posible se debe utilizar sólo un PIV que permita realizar el cambio de pendiente para empalmar una calzada con la otra.

5.2.4 Longitud máxima de la tangente

Igual que en el punto anterior; se puede prescindir de este parámetro.

5.2.5 Valor de K mínimo y longitud mínima de curva,

El retorno se debe diseñar con los valores K mínimos que se encuentran en el Manual de Diseño Geométrico para una velocidad de 30 km/: curva convexa de 2.0 y curva cóncava de 6.0. La longitud de la curva será la mínima de 20 m. Estos parámetros se adoptan para evitar que los vehículos sufran de rozamiento con el pavimento o se encuentren con un cambio abrupto de pendiente que ocasione el choque de la parte delantera del vehículo con el pavimento. Si en algún momento se diseñe el retorno sólo para vehículos livianos, la longitud de curva se puede reducir, ya que las situaciones anteriormente descritas no aplicarían debido a que la longitud del vehículo es menor.

5.3 Sección Transversal

5.3.1 Sobreanchos

Como se ha mencionado anteriormente, el sobreancho está directamente relacionado con el radio del retorno y el vehículo de diseño. Para este caso, se tomará el vehículo cuyas características son las más exigentes, el 3S2.

Si bien el Manual de Diseño Geométrico plantea que los sobreanchos se deben calcular mediante la metodología contemplada en el numeral 5.4.1.2 del mismo, estos valores son sobredimensionados y con las fórmulas ahí mismas consignadas no es posible obtener un valor para radios relativamente menores, donde este sea menor que la longitud total del vehículo de diseño.

Así las cosas, es recomendable, modelar el retorno mediante algún software especializado, como por ejemplo Autoturn o Vehicle Tracking, las dos marcas registradas.

5.3.1.1 Cálculo del sobreancho para radios de empleo frecuentes en retornos

Mediante el software Vehicle Tracking de Autodesk y Civil 3D de la misma casa matriz, se realizó la modelación de 17 retornos tipo, partiendo de un radio con una curva circular simple de 12 m a un radio de 30 m, con incrementos de 1 m.

Por ejemplo, el siguiente esquema muestra la trayectoria de giro para un radio de eje de 14 m para un vehículo 3S2. La figura 27 representa la trayectoria para un radio de eje de 30 m para el mismo tipo de vehículo.

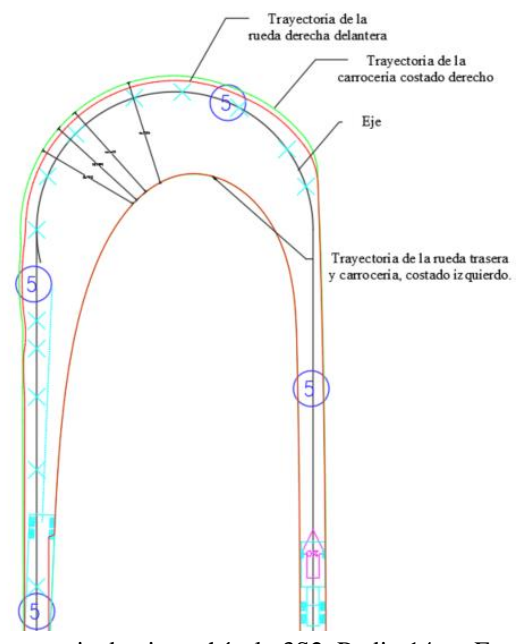


Figura 26: Trayectoria de giro vehículo 3S2. Radio 14 m. Fuente: Autor

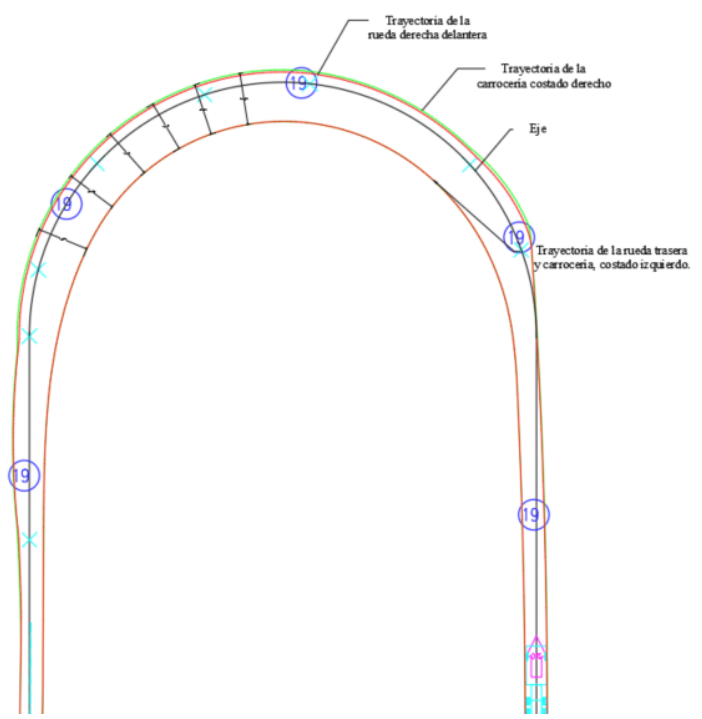


Figura 27: Trayectoria de giro vehículo 3S2. Radio 30 m. Fuente: Autor

De las figuras anteriores se puede identificar que el sobreancho disminuye a medida que aumenta el radio de giro, esto dado que el vehículo tiene una mayor distancia para desplazarse sin fijar el eje delantero a 45° del eje longitudinal del mismo.

Después de modelar todos los radios de giro, se toman las dimensiones del ancho necesario para la trayectoria. Al costado izquierdo del eje varían los valores y al derecho permanece en un rango de 1.40 m a 1.60 m, por lo cual se puede asumir el ancho mayor como dimensión tipo, ya que es el más crítico.

Basado en lo anterior, a continuación se relacionan los anchos medidos para cada retorno

Tabla 26: Ancho mayor medido para distintos radios. Fuente: Autor.

Radio (m)	Ancho mayor medido (m)
13	11,5
14	10,8
15	10,3
16	9,7
17	9,25
18	8,8
19	8,43
20	8,1
21	7,86
22	7,6
23	7,34
24	7,12
25	6,93
26	6,75
27	6,52
28	6,38
29	6,28
30	6,12

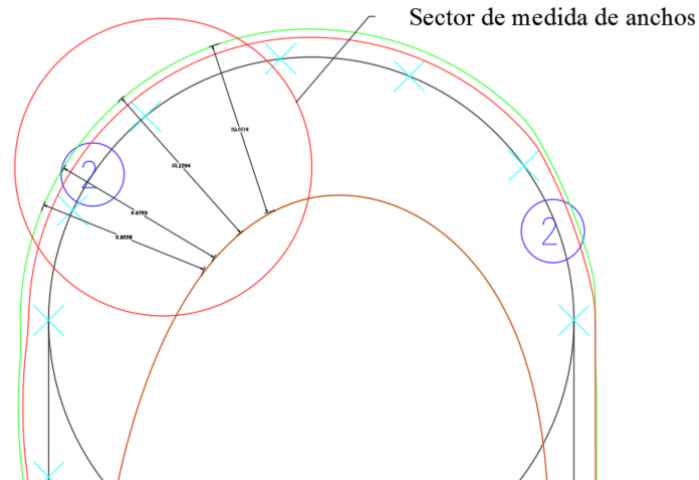


Figura 28: Medida de anchos en retornos. Fuente: Autor

En base a los resultados obtenidos en la tabla 26 se realiza el siguiente gráfico, donde se dibuja la línea de tendencia y se halla su respectiva ecuación.

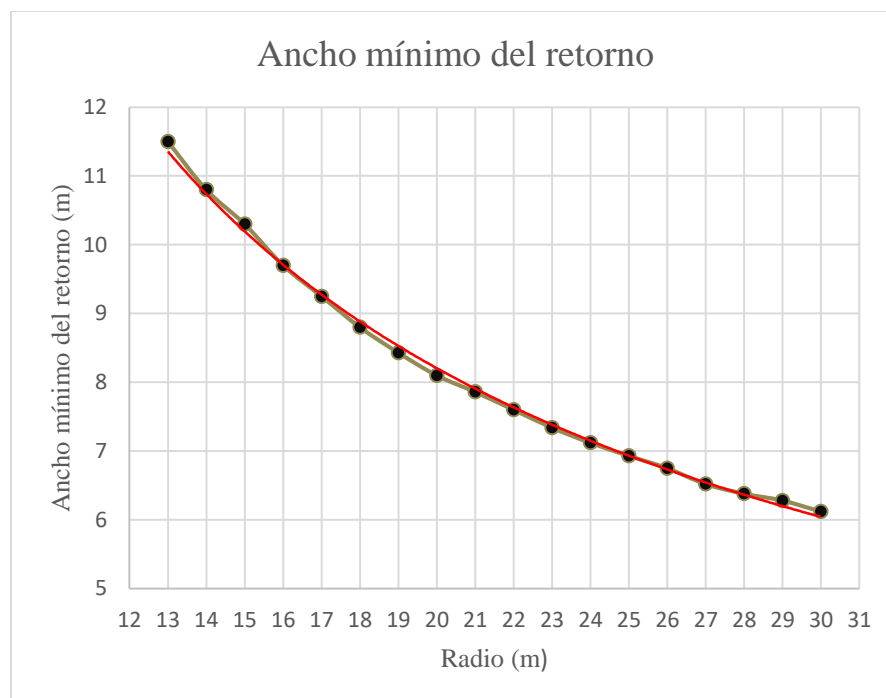


Figura 29: Ancho mínimo del retorno vs radio del eje. Fuente: Autor

La ecuación de la línea de tendencia es la siguiente:

$$a = \frac{79}{r^{0.75}}$$

Donde:

a: Ancho mayor del retorno necesitado por el vehículo 3S2 para realizar su trayectoria (m)

r: Radio del eje de la trayectoria (m)

Aplicando la fórmula anterior, se obtienen los siguientes resultados para anchos desde 13 m a 30 m.

Tabla 27: Anchos calculados para distintos radios. Fuente: Autor

Radio (m)	Ancho mayor medido (m)	Ancho mayor fórmula (m)	Ancho mayor redondeado (m)
13	11,5	11,54	11,6
14	10,8	10,92	11,0
15	10,3	10,36	10,4
16	9,7	9,88	9,9
17	9,25	9,44	9,5
18	8,8	9,04	9,1
19	8,43	8,68	8,7
20	8,1	8,35	8,4
21	7,86	8,05	8,1
22	7,6	7,78	7,8
23	7,34	7,52	7,6
24	7,12	7,29	7,3
25	6,93	7,07	7,1
26	6,75	6,86	6,9
27	6,52	6,67	6,7
28	6,38	6,49	6,5
29	6,28	6,32	6,4
30	6,12	6,16	6,2

El ancho mayor del retorno necesitado por el vehículo 3S2 para realizar su trayectoria es equivalente al ancho mínimo que debe tener el retorno para que el vehículo pueda girar sobre la trayectoria sin invadir las calzadas o salirse del pavimento.

También, se debe adicionar al ancho una zona de aislamiento que evite que el vehículo que realiza el retorno se salga de la trayectoria pavimentada. El ancho en mención será de 0.60 m, factor que indica la Guía de Diseño de Vías Urbanas de Bogotá en el numeral 5.1.5 como la mínima separación del borde del separador de la trayectoria del vehículo y a razón de que este no invadirá otro carril cuando se realiza la trayectoria de giro, puede ser considerado como la zona que brinda seguridad al usuario de que no se saldrá de su trayectoria.

Teniendo en cuenta lo anterior se obtienen los siguientes resultados, como anchos totales:

Tabla 28: Ancho total del retorno en relación al radio. Fuente: Autor

Radio (m)	Ancho total del retorno (m)
13	12,2
14	11,6
15	11,0
16	10,5
17	10,1
18	9,7
19	9,3
20	9,0
21	8,7
22	8,4
23	8,2
24	7,9
25	7,7
26	7,5
27	7,3
28	7,1
29	7,0
30	6,8

Este ancho total se puede interpretar como el ancho de un retorno de ancho constante, con curva circular interna simple, no compuestas. En el caso de que se encuentren curvas compuestas este valor debe ser tomado como el ancho mínimo en la parte más ancha del retorno; por lo general estos retornos se diseñan con plantillas o mediante simuladores de trayectorias.

6. Análisis de resultados

6.1 Retorno APP Pereira – La Victoria

Este retorno se encuentra diseñado para la construcción de la segunda calzada en el sector Cerritos – La Virginia y la propuesta del originador es de tipo corbatín.

Las calzadas están diseñadas para una velocidad de 80 km/h

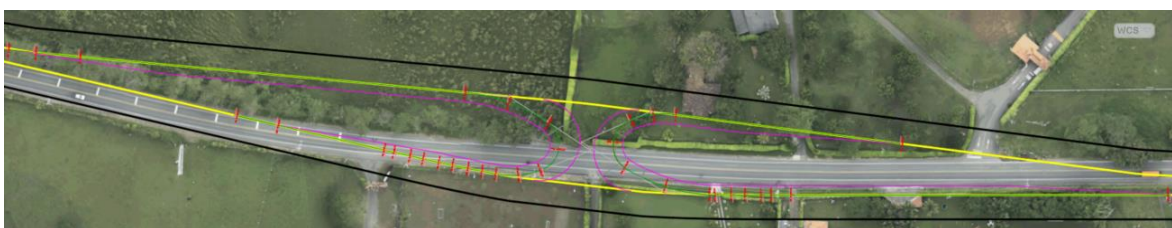


Figura 30: Retorno APP Pereira - La Victoria. Fuente: Estudios y diseños Pereira – La Victoria.

La composición de este alineamiento es de tres radios, lo que corresponde a la disminución de área, ya que el ancho crítico ocurre en la segunda mitad del retorno. En este tipo de retorno, se ha mantenido un carril de 3.65 m –al igual que los carriles de aceleración y desaceleración- por el costado interno del eje, es decir, que el borde izquierdo mantiene una simetría respecto al eje; el borde externo o derecho, presenta un arco de radio único de 16 m.

6.1.1 Análisis del radio

A continuación se relacionan los elementos básicos que componen el retorno sur-sur:

Tabla 29: Elementos retorno Pereira - La Victoria sur-sur. Fuente: Autor.

Abs. Inicio	Abs. Fin	Radio (m)	Long. (m)	Deflexión (°)
K0+090	K0+109	33,6	18,2	30,9
K0+109	K0+132	10,7	23,4	125,7
K0+132	K0+168	73,7	35,9	27,9

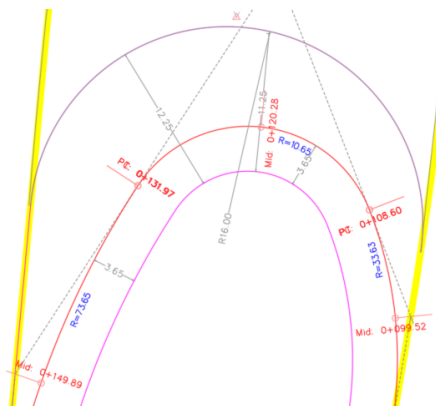


Figura 31: Geometría retorno Pereira - La Victoria sur-sur. Fuente: Estudios y diseños Pereira – La Victoria.

El eje de diseño (rojo) no describe la trayectoria del vehículo, este mantiene el ancho del carril de aceleración de 3.65 m. Al tratar de realizar la trayectoria mediante este eje, el vehículo no podrá completarla, como se comprobó con el software Vehicle Tracking, esto se ve reflejado en la siguiente figura:

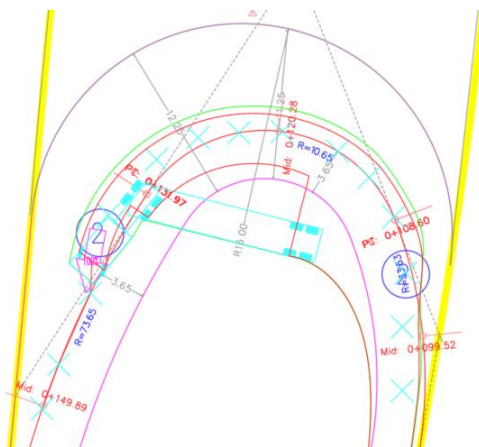


Figura 32: Trayectoria por el eje de diseño del retorno Pereira - La Victoria sur - sur. Fuente: Autor.

Para hacer comparable el diseño de este radio, se debe tomar el radio que puede realizar el vehículo, para esto se hace un offset del radio externo a 1.60 m, que fue el ancho que se encontró adecuado para el costado derecho del eje mas 0.30 m como factor de seguridad, como se vio en los capítulos anteriores.

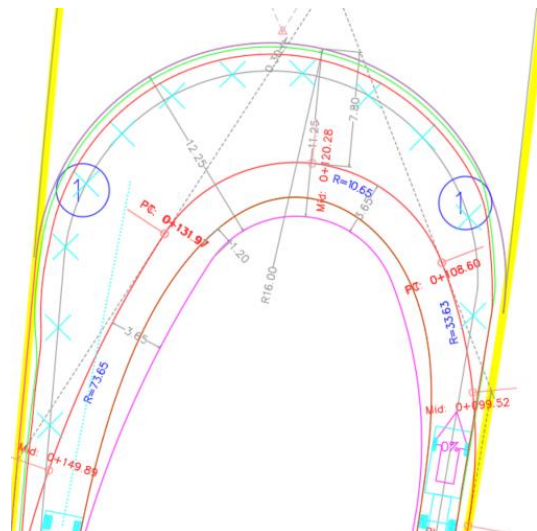


Figura 33: Trayectoria por el eje de desplazamiento del retorno Pereira - La Victoria sur - sur. Fuente: Autor.

Tal cual se observa en la figura anterior, el vehículo puede realizar la trayectoria completa sin ningún inconveniente al desplazarse por el eje proyectado, cabe aclarar que el radio de esta última trayectoria corresponde a 14.10 m. También es de notar que se mantienen los 0.30 m de margen de seguridad desde el radio exterior a la trayectoria de la carrocería y que existe un margen de 1.20 m al radio interno.

6.1.2 Análisis de peraltes

La calzada derecha en el sector del retorno está diseñado con una curva izquierda de 500 m de radio y con un peralte máximo de 5.80%, como se ve en el siguiente cuadro de curvatura y diagrama de peraltes.

PI	ABS INICIO	ABS FINAL	COORDENADAS INICIO	COORDENADAS FINAL	AZIMUT	LONGITUD	Δ	R	Lc	Ex	Tc	Le
L14	K0+620.358	K1+102.076	N1023483.622,E1137132.022	N1023953.129,E1137239.794	12° 55' 41"	481.718						
S11	K1+102.076	K1+162.076	N1023953.129,E1137239.794	N1024011.856,E1137252.044			3° 26' 16"	500.00	52.73	0.696	26.388	60.00
C4	K1+162.076	K1+214.803	N1024011.856,E1137252.044	N1024064.222,E1137257.982			6° 02' 31"					
S12	K1+214.803	K1+274.803	N1024064.222,E1137257.982	N1024124.201,E1137259.192			3° 26' 16"					60.00

Figura 34: Cuadro de curvatura del retorno Pereira - La Victoria sur – sur calzada derecha. Fuente: Estudios y diseños Pereira – La Victoria.

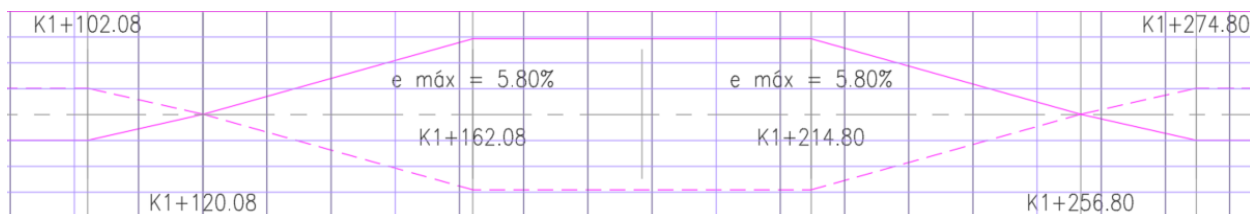


Figura 35: Diagrama de peraltes del retorno Pereira - La Victoria sur – sur calzada derecha. Fuente: Estudios y diseños Pereira – La Victoria.

La calzada izquierda en el sector del retorno está diseñado con una curva izquierda de 916.02 m de radio y con un peralte máximo de 2.40%, como se ve en el siguiente cuadro de curvatura y diagrama de peraltes.

PI	ABS INICIO	ABS FINAL	COORDENADAS INICIO	COORDENADAS FINAL	AZIMUT	LONGITUD	Δ	R	Lc	Ex	Tc	Le
L39	K0+600.022	K1+090.493	N1023455.314,E1137112.904	N1023933.352,E1137222.635	12° 55' 41"	490.471						
C23	K1+090.493	K1+305.867	N1023933.352,E1137222.635	N1024146.977,E1137245.813			13° 28' 17"	916.02	215.37	6.366	108.186	
L61	K1+305.867	K1+568.683	N1024146.977,E1137245.813	N1024409.780,E1137243.320	359° 27' 24"	262.815						

Figura 36: Cuadro de curvatura del retorno Pereira - La Victoria sur – sur calzada izquierda. Fuente: Estudios y diseños Pereira – La Victoria.

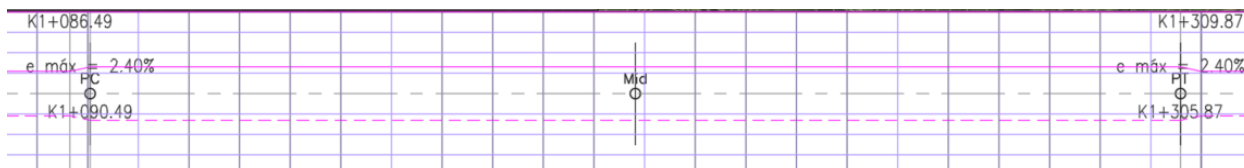


Figura 37: Diagrama de peraltes del retorno Pereira - La Victoria sur – sur calzada izquierda. Fuente: Estudios y diseños Pereira – La Victoria.

En base a lo anterior y considerando que las dos calzadas drenan hacia el separador, se tiene una diferencia aritmética de peraltes de $(-2.40\%) - (-5.80\%) = 3.40\%$

6.1.2.1 Rampa de peraltes

Con el valor calculado anteriormente, se aplica la fórmula para el cálculo de la rampa de peralte, con los siguientes datos:

Recordando:

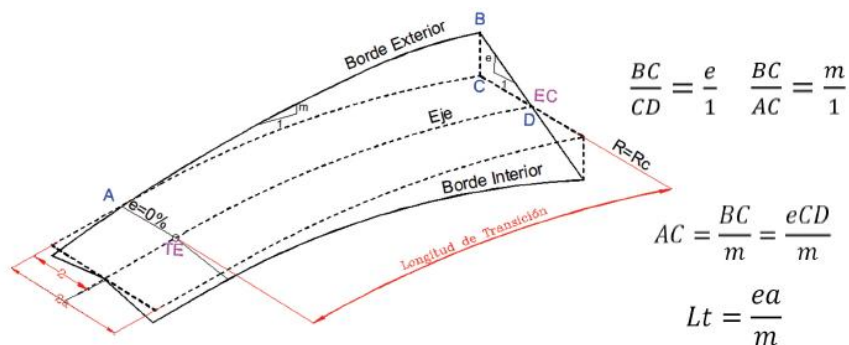


Figura 38: Cálculo de longitud de transición. Fuente Guía de Diseño de Vías Urbanas de Bogotá

Donde:

Lt= Longitud de transición = 23.40 m, Entre puntos de empalme

e= Diferencia aritmética de peraltes = 3.40 %

a= Ancho desde el eje de diseño al borde de pavimento = 8.60 m, medidos en planta

Para este caso se hallaría el siguiente valor:

$m = \text{Rampa de peralte} = 1.25\%$.

El valor hallado es menor que el máximo permitido para una velocidad de 30 km/h de 1.28%.

De esta manera, se puede asignar un valor de peralte entre 2.40% y 5.80% sin que se exceda el valor permitido para la rampa de peralte.

6.1.3 Análisis del perfil longitudinal

A continuación se presenta el perfil longitudinal del retorno sur-sur

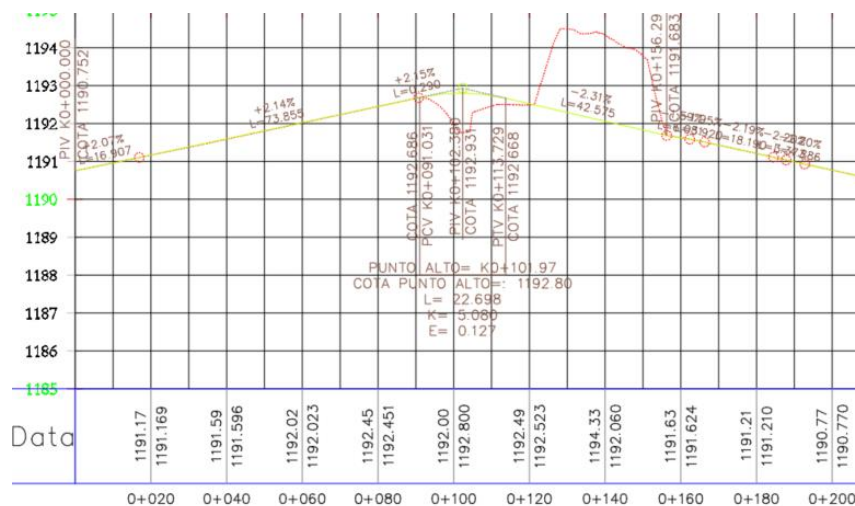


Figura 39: Perfil longitudinal del retorno Pereira - La Victoria sur – sur. Fuente: Estudios y diseños Pereira – La Victoria.

De esta figura se puede observar que: La pendiente longitudinal por obvias razones es la misma de la calzada adyacente. En el giro del retorno se observa una pendiente máxima de 2.31%. El empalme se realiza con sólo una curva convexa de 23 m de longitud y un parámetro K de 5.0. Todos los parámetros anteriores están de acuerdo con el Manual de Diseño Geométrico para una velocidad de 30 km/h.

6.1.4 Análisis de sección transversal

Respecto al ancho, en la figura 33 se puede observar que el retorno posee un ancho máximo de 12.25m. Empleando la fórmula, se obtiene un ancho máximo de 10.85 m sumando el factor de aislamiento de 0.60 m se llega al valor de 11.45 m, como ancho mínimo recomendado.

Con lo anterior se puede ver que el vehículo 3S2 puede girar, e inclusive logra tener un margen mayor para realizar el desplazamiento.

El ancho de aislamiento (Aa) que tendrá el vehículo equivale a: medida en planta del ancho máximo - ancho calculado – offset:

$$A_s = 12.25 - 10.85 - 0.30 = 1.10 \text{ m}$$

Para confirmar este valor, se toma la medida en planta directamente, lo que se ilustra en la siguiente figura:

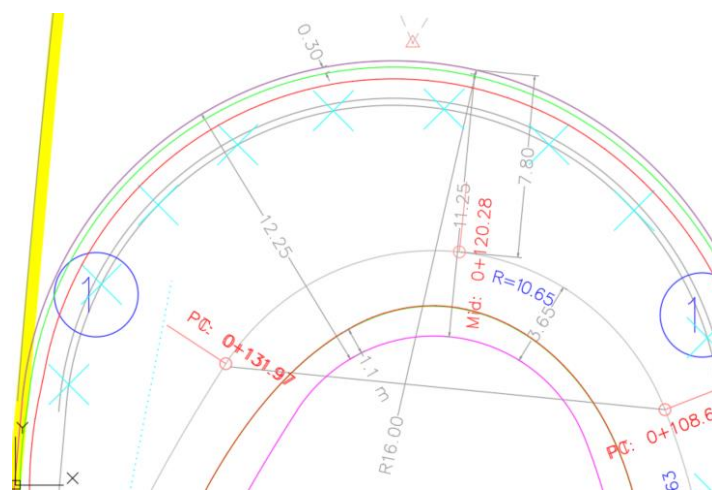


Figura 40: Medida de ancho de seguridad retorno Pereira - La Victoria. Fuente: Autor.

6.2 Análisis retorno Concesión Costera

Este retorno se diseñó para la unidad funcional 5 de la Concesión Costera Cartagena – Barranquilla, es de tipo corbatín y las calzadas adyacentes tienen una velocidad de diseño de 100 km/h.

El alineamiento principal está diseñado con dos curvas simples, sin embargo, el radio interno presenta una composición de tres radios.

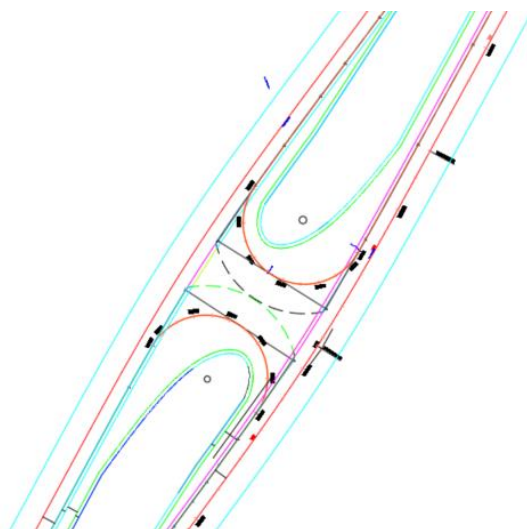


Figura 41: Retorno Costera. Fuente: Estudios y diseños Concesión Costera.

Para este diseño se ha conservado el ancho de berma del interior de las calzadas adyacentes, que es de 1.0 m.

6.2.1 Análisis de radio

Para el análisis del radio, se debe tener en cuenta que son dos ejes que se ven involucrados. El primero es el eje de diseño, el cual varía según el criterio del diseñador, siempre empalma con las calzadas adyacentes y es el eje del peralte.

A continuación se relacionan los elementos básicos que componen el retorno sur-sur:

Tabla 30: Elementos retorno Costera sur - sur. Estudios y diseños Concesión Costera

Abs. Inicio	Abs. Fin	Radio (m)	Long. (m)	Deflexión (°)
K0+086	0+113.25	16.775	27	92,3
K0+113	0+140.33	16.775	27	92,3

El eje de diseño (rojo) no describe la trayectoria del vehículo, este mantiene un ancho de 8.0 m constante del borde externo del retorno. Al tratar de realizar la trayectoria mediante este eje,

el vehículo no podrá completarla, como se comprobó con el software Vehicle Tracking, esto se ve reflejado en la siguiente figura:

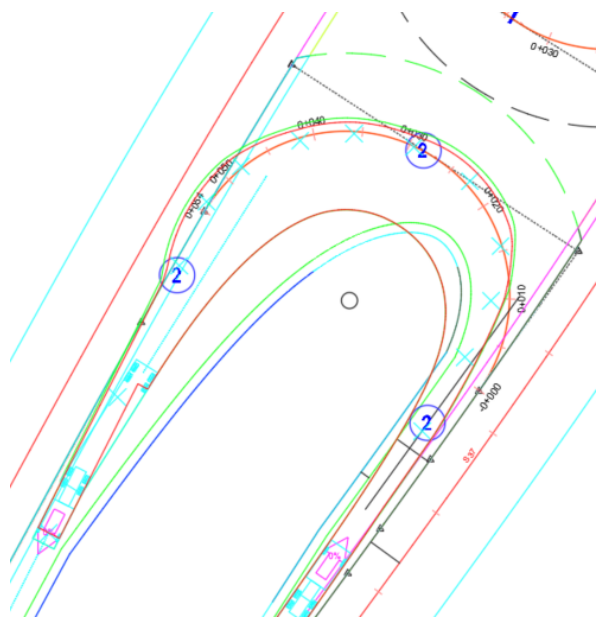


Figura 42: Trayectoria por el eje de diseño del retorno Costera sur - sur. Fuente: Autor

Si se quiere hacer comparable el diseño del radio con los parámetros antes mencionados, se debe realizar un offset del radio externo a 1.60 m, que fue el ancho que se encontró adecuado para el costado derecho del eje mas 0.30 m como la mitad del factor de aislamiento, como se vio en los capítulos anteriores; sin embargo, esta solución se debe realizar haciendo tangente el eje de trayectoria del vehículo por los carriles de aceleración y desaceleración y al radio exterior; la siguiente figura lo indica de mejor manera.

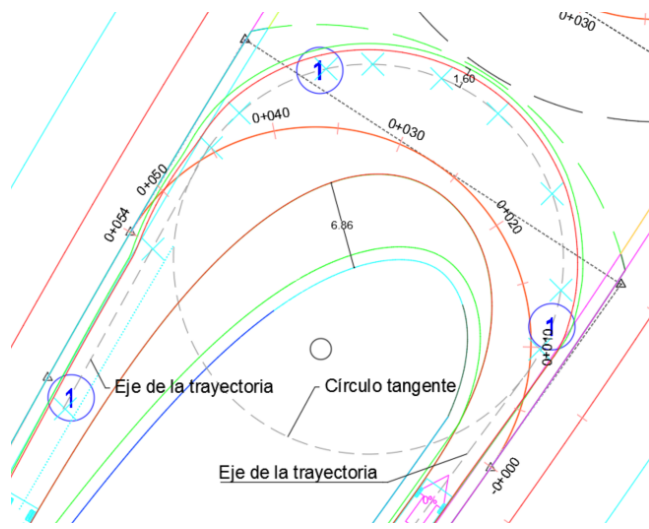


Figura 43: Trayectoria por el eje de desplazamiento del retorno Costera sur - sur. Fuente: Autor

Tal cual se observa en la figura anterior, el vehículo puede realizar la trayectoria completa sin ningún inconveniente al desplazarse por el eje proyectado, cabe aclarar que el radio de esta última trayectoria corresponde a 15.21 m (eje de la trayectoria: radio del círculo tangente, distinto al de diseño). También es de notar que se mantienen los 0.60 m de margen de seguridad desde el radio exterior a la trayectoria de la carrocería y que existe un margen de más de 6.0 m al radio interno.

6.2.2 Análisis de peraltes

La calzada derecha, en el sector del retorno (K27+900), tiene un radio de 455 m, que lo componen dos curvas espirales, con un peralte máximo de 7.10%.

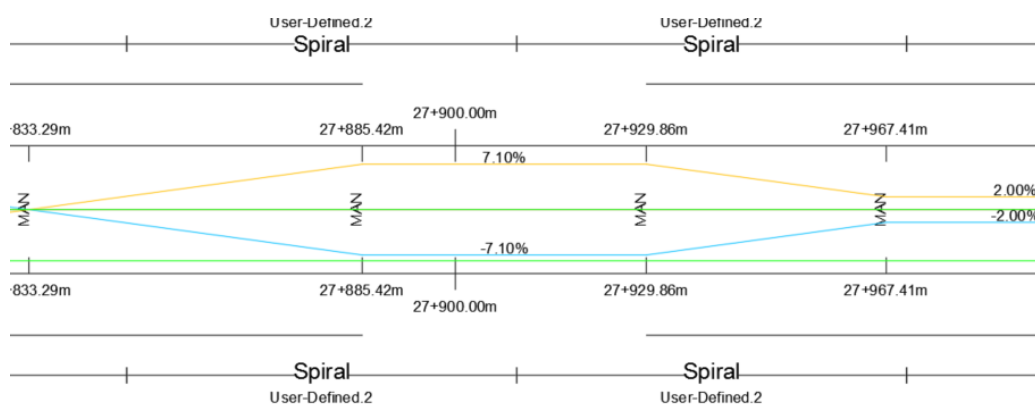


Figura 44: Diagrama de peraltes del retorno Costera sur – sur calzada derecha. Fuente: Estudios y diseños Concesión Costera.

La calzada derecha, en el sector del retorno (K27+900), tiene un radio de 460 m, que lo componen dos curvas espirales, con un peralte máximo de 7.90%.

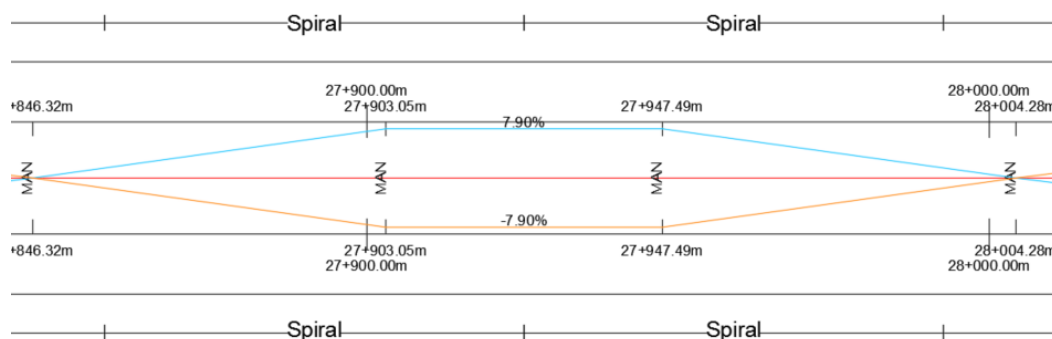


Figura 45: Diagrama de peraltes del retorno Costera sur – sur calzada izquierda. Fuente: Estudios y diseños Concesión Costera

Con estos datos y notando que las dos calzadas drenan hacia el separador, se tiene que la diferencia de peraltes es equivalente a $(-7.10\%) - (-7.90\%) = 0.80\%$

6.2.2.1 Rampa de peraltes

Con el valor calculado anteriormente, se aplica la fórmula para el cálculo de la rampa de peralte, con los siguientes datos:

Lt= Longitud de transición = (K0+041 - K0+015) = 26.0 m, tomado de los puntos de empalme del retorno con las calzadas.

e= Diferencia aritmética de peraltes = 0.80 %

a= Ancho desde el eje al borde de pavimento = 10.82 m, medidos en planta

Para este caso se hallaría el siguiente valor:

m= Rampa de peralte = **0.33%**

Con esto se comprueba que la rampa de peraltes no tendrá una pendiente mayor a la permitida, lo cual indica que las dos calzadas tienen un peralte de valor similar.

El retorno tendrá un peralte variable entre 7.90% y 7.10%, ya que el diseño no contempla la variación del peralte en los carriles de aceleración ni aceleración.

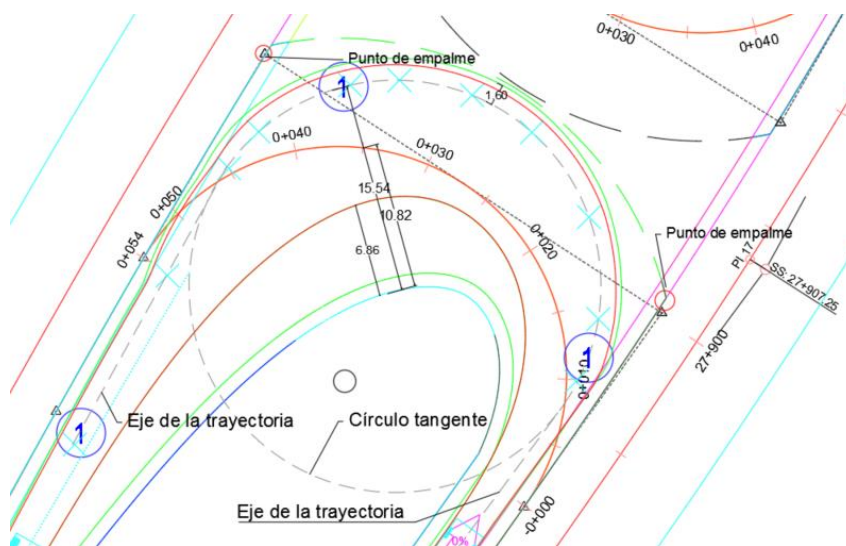


Figura 46: Dimensiones retorno Concesión Costera. Fuente: Autor.

6.2.3 Análisis del perfil longitudinal

A continuación se presenta el perfil longitudinal del retorno:

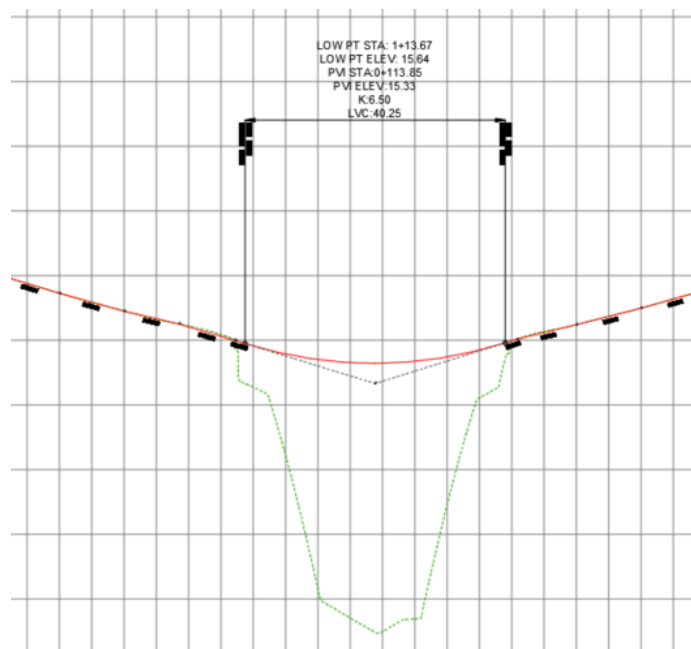


Figura 47: Perfil longitudinal del retorno Concesión Costera sur – sur. Fuente: Estudios y diseños Concesión Costera

Se identifica que los carriles de aceleración y desaceleración empalman con las calzadas adyacentes. En retorno transcurre sobre una curva cóncava de longitud de 40 m y un K de 6.50, que está acorde con los valores mínimos que estipula el Manual de Diseño Geométrico para una velocidad de 30 km/h.

6.2.4 Análisis de sección transversal

Al observar la figura 48 se identifica que el ancho del retorno es suficiente para que el vehículo 3S2 gire sin inconveniente alguno. En sentido contrario, se evidencia un ancho extra que influye en mayores cantidades, predios y por consiguiente costos.

Aplicando la fórmula para el cálculo del sobrecancho se tiene un ancho total de 10.25 mas 0.60 m del margen de aislamiento, se calcula un ancho total de 10.85 m, este valor es muy aproximado al medido de 10.21 m en planta en figura 48. En base a lo anterior, se detecta un sobrecancho de 9.70 m, que se distribuyen a la derecha y a la izquierda en 2.83 m y 6.86 m respectivamente. En la siguiente figura se puede ver la comprobación:

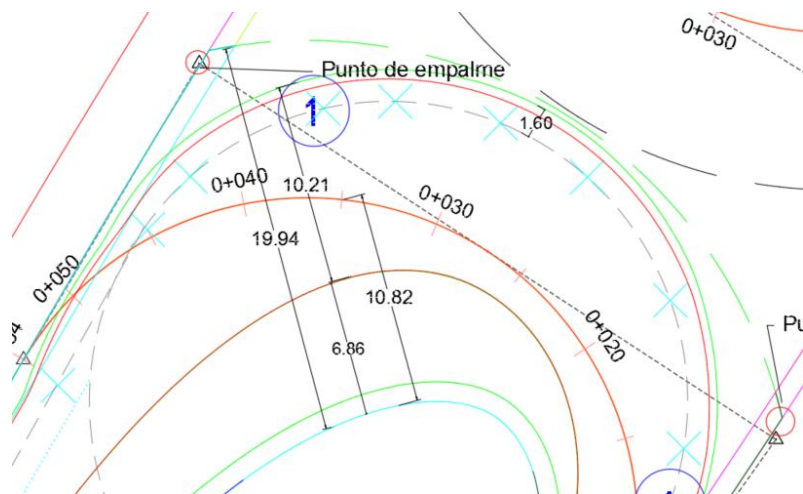


Figura 48: Mediciones en planta retorno Costera. Fuente: Autor.

6.3 Análisis retorno APP GICA

El retorno se encuentra ubicado en el tramo 1 de la vía Ibagué – Girardot – Cajamarca, es de tipo óvalo y las calzadas adyacentes tienen una velocidad de diseño de 80 km/h.

El alineamiento principal está diseñado con dos curvas simples, sin embargo, el radio interno presenta una composición de tres radios. El retorno no presenta un ancho constante en ningún sector.

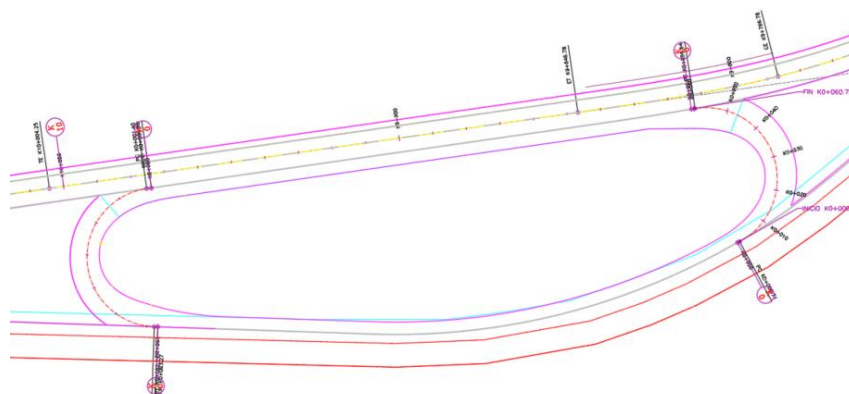


Figura 49: Retorno GICA. Fuente: Estudios y Diseños APP GICA.

6.3.1 Análisis de radio

A continuación se relacionan los elementos básicos que componen el retorno Oriente - Oriente

Tabla 31: Elementos Retorno GICA Oriente - Oriente. Fuente: Estudios y Diseños APP GICA

Abs. Inicio	Abs. Fin	Radio (m)	Long. (m)	Deflexión (°)
K0+001	K0+062	20.510	60.811	170

De la misma manera en que sucedió en el retorno de la Concesión costera analizado anteriormente, el eje de diseño no es equivalente al eje de la trayectoria del vehículo y esto se evidencia en el siguiente esquema, donde se realizó la trayectoria del vehículo 3S2.

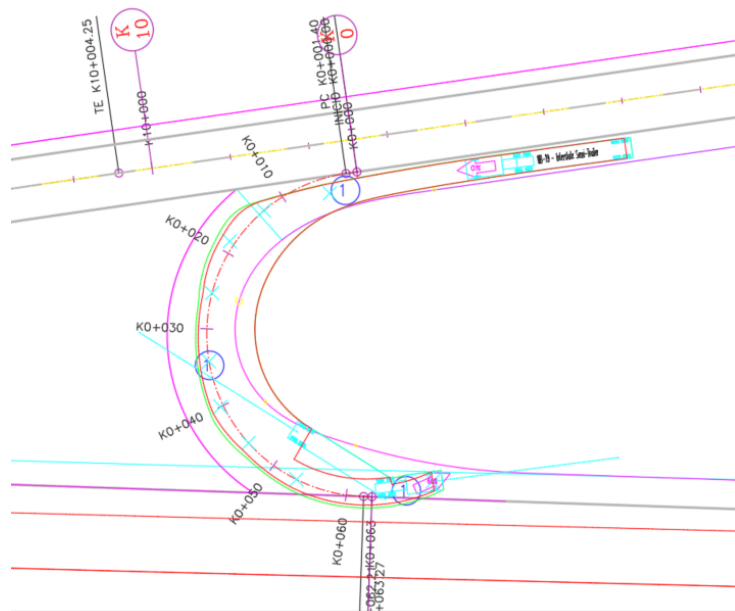


Figura 50: Trayectoria por el eje de diseño del retorno GICA Oriente - Oriente. Fuente: Autor

Si se quiere hacer comparable el diseño del radio con los parámetros antes mencionados, se debe realizar un offset del radio externo a 1.60 m, que fue el ancho que se encontró adecuado para el costado derecho del eje mas 0.30 m como la mitad del factor de aislamiento, como se vio en los capítulos anteriores; sin embargo, esta solución se debe realizar haciendo tangente el eje de trayectoria del vehículo por los carriles de aceleración y desaceleración y al radio exterior; la siguiente figura lo indica de mejor manera.

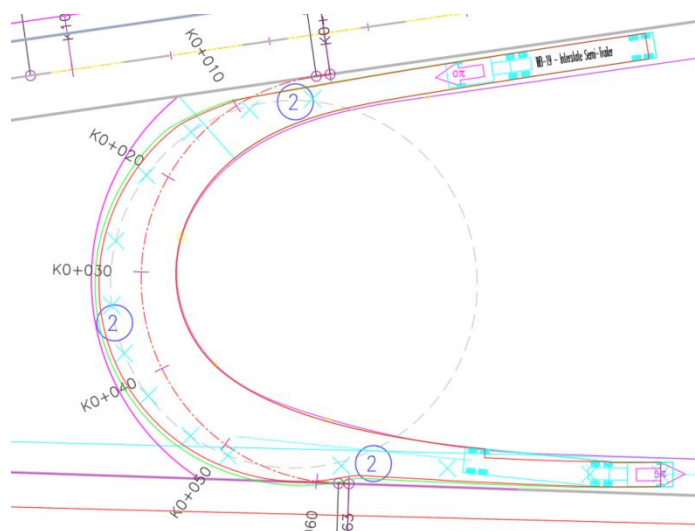


Figura 51: Trayectoria por el eje de desplazamiento del retorno GICA Oriente - Oriente. Fuente: Autor

Se puede observar que el vehículo realiza la trayectoria muy justa sobre el retorno, inclusive, alcanza a invadir la berma de la calzada sur. El giro se realizó sobre el eje de la trayectoria que equivale a 18.40 m (radio del círculo tangente, distinto al de diseño). No existe un margen de seguridad adecuado para garantizar la comodidad del usuario.

6.3.2 Análisis de peraltes

Las calzadas presentan un peralte constante en todos sus carriles, es decir que el análisis se debe hacer partiendo de que el peralte será variable.

Las dos calzadas se encuentran totalmente en tangente en el sector del retorno y se configuran con bombeo a una sola agua de -2% hacia el costado exterior, esto equivale a tener $(2) - (-2) = 4\%$ de diferencia de peraltes.

La anterior situación se presenta porque las calzadas se encuentran en tangente, sin embargo, no se puede dar el mismo peralte de 2% al retorno, ya que quedaría contraperaltado (drenando al costado externo), aunque permitiría el drenaje del agua, no es recomendable la situación y debe asignarse un peralte de 2% que permita drenar el agua hacia el interior y contrarreste la fuerza centrífuga.

6.3.2.1 Rampa de peraltes

Con el valor calculado anteriormente, se aplica la fórmula para el cálculo de la rampa de peralte, con los siguientes datos:

$L_t =$ Longitud de transición = $(K_0+050 - K_0+015) = 35.0$ m, tomado de los puntos de empalme del retorno con las calzadas.

$e =$ Diferencia aritmética de peraltes = 4 %

$a =$ Ancho desde el eje al borde de pavimento = 10.09 m, medidos en planta

Para este caso se hallaría el siguiente valor:

$m =$ Rampa de peralte = **1.15%**

El valor hallado es menor que el máximo permitido para una velocidad de 30 km/h de 1.28%, que se traduce en la posibilidad de asignar un valor de peralte de 2%.

6.3.3 Análisis de perfil longitudinal

A continuación se presenta el perfil longitudinal del retorno Oriente – Oriente

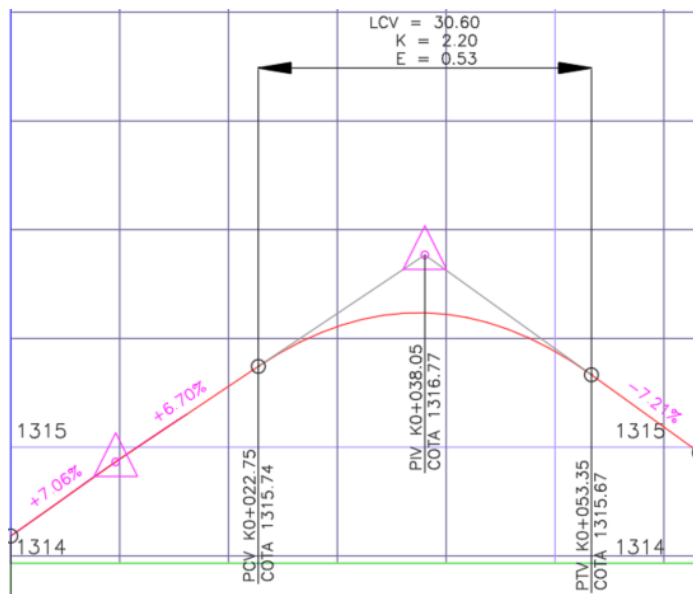


Figura 52: Perfil longitudinal del retorno GICA Occidente - Occidente. Fuente: Estudios y Diseños APP GICA

Se identifica que los carriles de aceleración y desaceleración empalman con las calzadas adyacentes. En retorno transcurre sobre una curva cóncava de longitud de 30 m y un K de 2.20, que está acorde con los valores mínimos que estipula el Manual de Diseño Geométrico para una velocidad de 30 km/h.

6.3.4 Análisis de sección transversal

Empleando la fórmula para el cálculo del ancho en relación al radio se obtiene un valor del ancho total sin factor de seguridad de:

$$a = \frac{79}{18.40^{0.75}} = 8.90 \text{ m}$$

Midiendo directamente sobre la planta del retorno, se evidencia un ancho total de 10.09 m y el ancho de la trayectoria del vehículo es de 8.70 m (se aproxima al valor calculado por fórmula de 8.90 m). No obstante, el ancho de 10.09 m tiene una sección que no será aprovechable por un vehículo 3S2, ya que no permite el tránsito por esta zona, esto se describe en la siguiente figura:

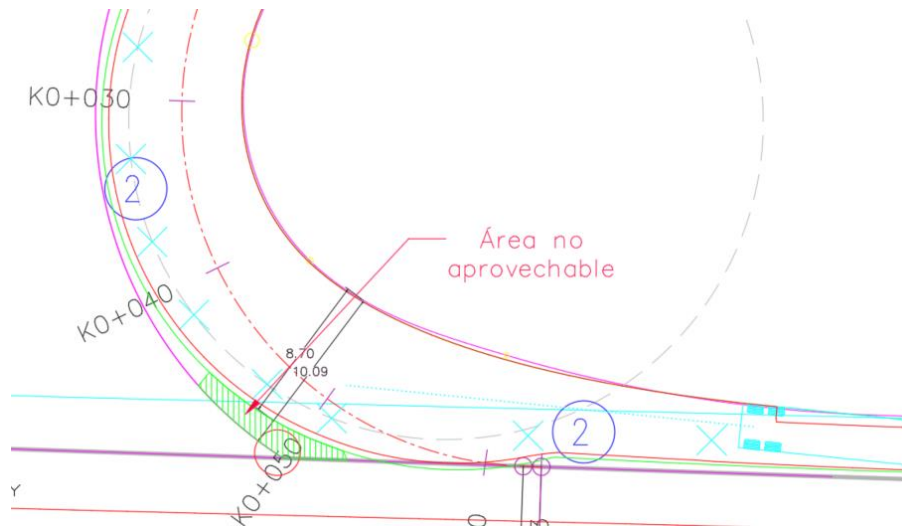


Figura 53: Medición Ancho total del retorno GICA. Fuente: Autor

Así las cosas, sumando el factor de aislamiento de 0.60 m, se tiene un total de 9.50 m. Al tener en cuenta que hay 0.39 m que no son aprovechables para que el vehículo gire, se tendría un déficit de $9.50\text{m} - 8.70 = 0.80\text{ m}$, es decir que el vehículo no puede completar el giro sin invadir la berma, situación que se observa en la figura anterior; en pocas palabras, le falta ancho al vehículo.

7. Parámetros estandarizados y recomendaciones para el diseño de retornos en Civil 3D

Partiendo de lo investigado, diseñado y analizado, es preciso decir que se deben tener en cuenta los siguientes parámetros al momento de diseñar un retorno:

7.1 Parámetros en planta

7.1.1 Distancia de cambio de carril

Esta distancia se refiere a la distancia mínima que debe recorrer un vehículo para poder incorporarse en la calzada externa, después de haber ingresado a la calzada interna a través del carril de aceleración y podrá definir una distancia mínima que se debe mantener entre el retorno y el acceso más próximo del corredor. En la siguiente tabla se muestran las distancias halladas:

Tabla 32: longitud mínima de cambio de carril y acceso. Fuente: Autor

Velocidad Específica (km/h)	Mínima longitud de cambio de carril y de acceso	
	Calculada (m)	Redondeada (m)
50	156,5	160
60	184,1	185
70	253,2	255
80	283,2	285
90	352,3	355
100	416,2	420
110	450,1	455

Esta longitud es medida desde el final de la transición del carril de aceleración. En casos donde el acceso presente carril de desaceleración, la distancia se calcula hasta el inicio de la transición del carril de desaceleración.

7.1.2 Longitud ajustada por pendientes carril de aceleración:

Cuando los carriles presentan condiciones que superan ciertos porcentajes en subida o en bajada, las longitudes de los carriles deberán ajustarse con las longitudes expuestas en las siguientes tablas:

Tabla 33: Longitud ajustada por pendientes carril de aceleración en subida. Fuente: Guía de Diseño de Vías Urbanas, Bogotá D.C

Vía primaria (calzada de destino) 3% a 4% subiendo					
Velocidad específica del ramal de entrada o de enlace (km/h)		40	50	60	80
Velocidad específica del elemento de la calzada de destino inmediatamente anterior al inicio del carril de aceleración (km/h)	Longitud de la transición (m)	Longitud total del carril de aceleración, incluyendo la transición (m)			
60	55	117	77	-	-
70	60	176	140	84	-
80	65	259	225	158	-
90	70	322	308	240	112
100	75	435	408	357	189
110	85	510	496	442	279
Vía primaria (calzada de destino) 5% a 6% subiendo					
Velocidad específica del ramal de entrada o de enlace (km/h)		40	50	60	80
Velocidad específica del elemento de la calzada de destino inmediatamente anterior al inicio del carril de aceleración (km/h)	Longitud de la transición (m)	Longitud total del carril de aceleración, incluyendo la transición (m)			
60	55	135	83		
70	60	203	160	102	
80	65	278	255	189	
90	70	368	369	320	154
100	75	493	485	462	263
110	85	680	682	676	465

Tabla 34: Longitud ajustada por pendientes carril de aceleración en bajada. Fuente: Autor

Vía primaria (calzada de destino) 3% a 4% bajando								
Velocidad específica del ramal de entrada o de enlace (km/h)	Pare	25	30	40	50	60	80	
Velocidad específica del elemento de la calzada de destino inmediatamente anterior al inicio del carril de aceleración (km/h)	Longitud de la transición (m)	Longitud total del carril de aceleración, incluyendo la transición (m)						
60	55	98	84	73,5	63	38,5	-	-
70	60	120,3	107,3	97,5	87,75	65	39	-
80	61	152,8	139,8	130	120,3	97,5	68,3	-
90	62	168	156	147	138	123	96	42
100	63	204	192	183	174	153	126	63
110	64	234	222	210	204	186	156	93
Vía primaria (calzada de destino) 5% a 6% bajando								
Velocidad específica del ramal de entrada o de enlace (km/h)	Pare	25	30	40	50	60	80	
Velocidad específica del elemento de la calzada de destino inmediatamente anterior al inicio del carril de aceleración (km/h)	Longitud de la transición (m)	Longitud total del carril de aceleración, incluyendo la transición (m)						
60	55	84	72	63	54	33		
70	60	111	99	90	81	60	36	
80	61	129,3	118,3	110	101,8	82,5	57,8	
90	62	154	143	134,8	126,5	112,8	88	38,5
100	63	170	160	152,5	145	127,5	105	52,5
110	64	195	185	175	170	155	130	77,5

Tabla 35: Longitud ajustada por pendientes carril de desaceleración en subida. Fuente: Autor

Vía primaria (calzada de destino) 3% a 4% subiendo								
Velocidad específica del ramal de salida o de enlace (km/h)	Pare	25	30	40	50	60	80	
Velocidad específica del elemento de la calzada de origen inmediatamente anterior al inicio del carril de desaceleración (km/h)	Longitud de la transición (m)	Longitud total del carril de desaceleración, incluyendo la transición (m)						
50	45	63	45	41	41	-	-	-
60	55	81	63	63	50	50	-	-
70	60	94,5	81	81	68	54	54	-
80	65	108	95	95	81	68	59	-
90	70	117	99	104	90	86	72	68
100	75	126	113	113	99	86	72	68
110	85	135	122	122	108	108	86	77
120	90	144	131	131	117	117	99	81
Vía primaria (calzada de destino) 5% a 6% subiendo								
Velocidad específica del ramal de salida o de enlace (km/h)	Pare	25	30	40	50	60	80	
Velocidad específica del elemento de la calzada de origen inmediatamente anterior al inicio del carril de desaceleración (km/h)	Longitud de la transición (m)	Longitud total del carril de desaceleración, incluyendo la transición (m)						
50	45	56	40	36	36	-	-	-
60	55	72	56	56	44	44	-	-
70	60	84	72	72	60	48	48	-
80	65	96	84	84	72	60	52	-
90	70	104	88	92	80	76	64	60
100	75	112	100	100	88	76	64	60
110	85	120	108	108	96	96	76	68
120	90	128	116	116	104	104	88	72

Tabla 36: Longitud ajustada por pendientes carril de desaceleración en bajada. Fuente: Autor

Vía primaria (calzada de destino) 3% a 4% bajando								
Velocidad específica del ramal de salida o de enlace (km/h)	Pare	25	30	40	50	60	80	
Velocidad específica del elemento de la calzada de origen inmediatamente anterior al inicio del carril de desaceleración (km/h)	Longitud de la transición (m)	Longitud total del carril de desaceleración, incluyendo la transición (m)						
50	45	84	60	54	54	-	-	-
60	55	108	84	84	66	66	-	-
70	60	126	108	108	90	72	72	-
80	65	144	126	126	108	90	78	-
90	70	156	132	138	120	114	96	90
100	75	168	150	150	132	114	96	90
110	85	180	162	162	144	144	114	102
120	90	192	174	174	156	156	132	108

Vía primaria (calzada de destino) 5% a 6% bajando								
Velocidad específica del ramal de salida o de enlace (km/h)	Pare	25	30	40	50	60	80	
Velocidad específica del elemento de la calzada de origen inmediatamente anterior al inicio del carril de desaceleración (km/h)	Longitud de la transición (m)	Longitud total del carril de desaceleración, incluyendo la transición (m)						
50	45	95	68	61	61	-	-	-
60	55	122	95	95	74	74	-	-
70	60	142	122	122	101	81	81	-
80	65	162	142	142	122	101	88	-
90	70	176	149	155	135	128	108	101
100	75	189	169	169	149	128	108	101
110	85	203	182	182	162	162	128	115
120	90	216	195,8	195,8	175,5	175,5	149	122

7.1.3 Radio mínimo del retorno

El radio mínimo de trayectoria que tendrá un retorno será de 13 m.

7.1.4 Peraltes

Como mínimo se debe implementar el 2% de bombeo en todos los radios de diseño y anchos, con el fin de evacuar el agua en el retorno y el peralte máximo debe, en lo posible, desarrollarse en toda la longitud del retorno, siempre y cuando la rampa de peraltes sea la adecuada; esto quiere decir que los carriles de aceleración y desaceleración deben variar su peralte respecto a la calzada adyacente, siempre y cuando se garantice que la rampa de peraltes cumpla para la velocidad específica del corredor.

La rampa de peraltes se calcula de acuerdo a siguiente fórmula, para una velocidad de 30 km/h, y no podrá exceder 1.28%.

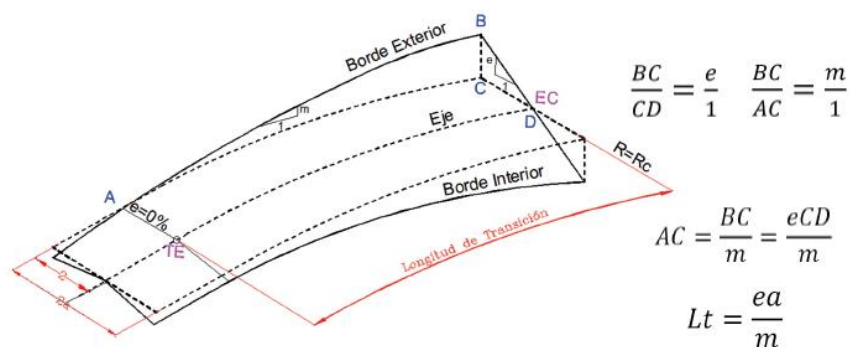


Figura 54: Cálculo de longitud de transición. Fuente Guía de Diseño de Vías Urbanas de Bogotá

Donde:

Lt=Longitud de transición

e= Diferencia aritmética de peraltes

a= Ancho desde el eje al borde de pavimento más lejano

m= Rampa de peralte o su equivalente

Haciendo uso de la ecuación, se pueden encontrar las siguientes longitudes mínimas de transición para que se cumpla la rampa de peraltes:

Tabla 37: Longitud mínima de transición. Fuente: Autor

Ancho de carril (m)	Longitud mínima de transición (m)									
	$\Delta e\%$	0	1	2	3	4	5	6	7	8
3,0		0,00	2,34	4,69	7,03	9,38	11,72	14,06	16,41	18,75
4,0		0,00	3,13	6,25	9,38	12,50	15,63	18,75	21,88	25,00
5,0		0,00	3,91	7,81	11,72	15,63	19,53	23,44	27,34	31,25
6,0		0,00	4,69	9,38	14,06	18,75	23,44	28,13	32,81	37,50
7,0		0,00	5,47	10,94	16,41	21,88	27,34	32,81	38,28	43,75
8,0		0,00	6,25	12,50	18,75	25,00	31,25	37,50	43,75	50,00

Ancho de carril (m)	Longitud mínima de transición (m)									
	$\Delta e\%$	0	1	2	3	4	5	6	7	8
9,0		0,00	7,03	14,06	21,09	28,13	35,16	42,19	49,22	56,25
10,0		0,00	7,81	15,63	23,44	31,25	39,06	46,88	54,69	62,50
11,0		0,00	8,59	17,19	25,78	34,38	42,97	51,56	60,16	68,75
12,0		0,00	9,38	18,75	28,13	37,50	46,88	56,25	65,63	75,00
13,0		0,00	10,16	20,31	30,47	40,63	50,78	60,94	71,09	81,25
14,0		0,00	10,94	21,88	32,81	43,75	54,69	65,63	76,56	87,50
15,0		0,00	11,72	23,44	35,16	46,88	58,59	70,31	82,03	93,75

Tabla 38: Longitud mínima de transición. Fuente: Autor

Ancho de carril (m)	Longitud mínima de transición (m)									
	$\Delta e\%$	9	10	11	12	13	14	15	16	
3,0		21,09	23,44	25,78	28,13	30,47	32,81	35,16	37,50	
4,0		28,13	31,25	34,38	37,50	40,63	43,75	46,88	50,00	
5,0		35,16	39,06	42,97	46,88	50,78	54,69	58,59	62,50	
6,0		42,19	46,88	51,56	56,25	60,94	65,63	70,31	75,00	
7,0		49,22	54,69	60,16	65,63	71,09	76,56	82,03	87,50	
8,0		56,25	62,50	68,75	75,00	81,25	87,50	93,75	100,00	
9,0		63,28	70,31	77,34	84,38	91,41	98,44	105,47	112,50	
10,0		70,31	78,13	85,94	93,75	101,56	109,38	117,19	125,00	
11,0		77,34	85,94	94,53	103,13	111,72	120,31	128,91	137,50	
12,0		84,38	93,75	103,13	112,50	121,88	131,25	140,63	150,00	
13,0		91,41	101,56	111,72	121,88	132,03	142,19	152,34	162,50	
14,0		98,44	109,38	120,31	131,25	142,19	153,13	164,06	175,00	
15,0		105,47	117,19	128,91	140,63	152,34	164,06	175,78	187,50	

7.2 Diseño del perfil longitudinal

Como se vio anteriormente, la planta se diseña basada en un vehículo 3S2, el cual es el más exigente para anchos y radios en Colombia. Ahora, como un vehículo liviano puede desarrollar mayores velocidades en los retornos, de hasta 30 km/h en radios de eje de diseño menores a 40 m, se deben implementar parámetros adecuados para esta velocidad.

7.3 Sección Transversal

El ancho mínimo en la parte más crítica de un retorno será de acuerdo a la siguiente tabla, teniendo en cuenta el radio de trayectoria que puede realizar un vehículo manteniéndose en la zona adecuada para su desplazamiento:

Tabla 39: Ancho total del retorno en relación al radio. Fuente: Autor

Radio (m)	Ancho total del retorno (m)
13	12,2
14	11,6
15	11,0
16	10,5
17	10,1
18	9,7
19	9,3
20	9,0
21	8,7
22	8,4
23	8,2
24	7,9
25	7,7
26	7,5
27	7,3
28	7,1
29	7,0
30	6,8

7.4 Recomendaciones

Aunque no es uno de los objetivos de este trabajo de tesis, en este apartado se verán unas recomendaciones prácticas avanzadas generales y que se deben tener en cuenta al momento de diseñar los retornos con el software Civil 3D.

- a. Se debe ubicar el retorno en un sector donde las diferencias de rasante entre las dos calzadas no sea de altura considerable y que pueda permitir el empalme entre las dos con un perfil longitudinal con una pendiente no muy alta.
- b. Se debe hacer el análisis predial, para saber si lo mejor es abrir las dos calzadas con curvas o si se puede mantener una en tangente.

- c. Se hará la separación de las calzadas con las curvas que el diseñador considere pertinentes para el caso que cumplan con las velocidades específicas de diseño y permitan que un vehículo 3S2 pueda girar sin inconveniente.
- d. Una vez se tengan definidos la planta con sus respectivos peraltes, el perfil y la ubicación exacta del retorno, es necesario proceder al diseño de los carriles de aceleración y desaceleración. Estos carriles se harán mediante un nuevo eje que vaya sobre el borde izquierdo de pavimento de la calzada existente con las mismas cotas exactas, de esta manera se garantiza que empalmarán correctamente los dos elementos. El borde izquierdo del carril se diseñará mediante una polilínea que funciona como target al momento de hacer el corredor. Es de aclarar que se utiliza un solo eje de diseño para empalmar con las dos calzadas, dejando un PI que permita diseñar la curva respectiva
- e. Una vez se tengan los carriles respectivos, es preciso realizar la curva en el eje que permita concatenar las dos calzadas, buscando el radio que más se adapte a la situación. El diseño de la curva ya dependerá del criterio del ingeniero, sin embargo, es recomendable utilizar sólo una curva circular, siempre y cuando las deflexiones lo permitan; si no es posible, se podrán utilizar dos curvas circulares del mismo radio. No es recomendable el empleo de curvas con radios compuestos.
- f. Si se planea que el retorno tenga un ancho constante, se hará un offset del eje de diseño a lado y lado, siempre considerando que entre los dos bordes debe existir como mínimo la distancia consignadas en las tablas mencionadas anteriormente (estos serán los targets del corredor) y que al momento de realizar el offset del radio externo se pueda cumplir la trayectoria del vehículo sin problema alguno.
- g. Tan pronto se haya definido el eje, se le dará el peralte correspondiente, teniendo en cuenta que el máximo debe transcurrir en toda la longitud del retorno y que los carriles de aceleración y desaceleración variarán hasta llegar al máximo. Se debe tener especial cuidado en no exagerar las diferencias de pendientes transversales entre la calzada principal y el carril de aceleración/desaceleración ya que se puede generar una torsión indeseada al vehículo que circula.
- h. Por último se definirá la rasante, procurando que sólo se utilice una curva vertical para empalmar las dos calzadas. El terreno de diseño de ese perfil serán las dos superficies TOP de las dos calzadas mas el terreno natural, así se garantiza que se tengan las mismas cotas de los bordes de pavimento de las calzadas.
- i. Después de esto se realizará el corredor de forma habitual.

8. Conclusiones

La distancia de cambio de carril está dada por los cuatro parámetros que enuncia el Manual de Diseño Geométrico para la distancia de adelantamiento, sin embargo, sus valores serán distintos, ya que algunos parámetros no aplican. También dependerá de la velocidad específica de la calzada.

Los carriles de aceleración y desaceleración estarán sujetos a unos factores de ajuste a su longitud, debido a que el vehículo puede aumentar o disminuir su velocidad si va en subida o en bajada.

Existen dos ejes: el de diseño que empalmará con las calzadas y distribuirá el peralte y el de trayectoria que es por donde se desplaza el vehículo; estos dos tienen características distintas.

El radio mínimo del retorno dependerá de la disponibilidad predial, se diseñará para un vehículo 3S2 y el radio de trayectoria mínimo es de 13 m.

Es recomendable rotar los carriles de aceleración y desaceleración independientemente de la calzada para lograr aplicar todo el peralte de manera constante en el retorno.

Cuando no es posible rotar los carriles de manera independiente, el peralte estará sujeto a las condiciones de las calzadas, ya que estas darán el margen en el cual debe rondar el peralte asignado al retorno.

El peralte mínimo deberá ser del 2% para garantizar la evacuación de las aguas.

El peralte no debe tener incidencia sobre las calzadas adyacentes (si se va a realizar la transición en el retorno).

Los vehículos livianos pueden desarrollar mayores velocidades en los retornos que un vehículo 3S2, hasta 30 km/h en radios de eje menores a 40 m. Se deben implementar parámetros adecuados para esta velocidad.

Es posible tener una pendiente longitudinal de 0% ya que las condiciones de empalme entre calzadas puede que así lo obligue, por eso se debe considerar que el bombeo o peralte permitirá la evacuación de las aguas lluvias de la superficie de rodadura.

El retorno se debe diseñar con los valores K mínimos que se encuentran en el Manual de Diseño Geométrico para una velocidad de 30 km/h curva convexa de 2.0 y curva cóncava de 6.0. La longitud de la curva será la mínima de 20 m.

El sobreancho está directamente relacionado con el radio del retorno y el vehículo de diseño. Se tomará el vehículo cuyas características son las más exigentes, el 3S2.

El ancho mayor del retorno necesitado por el vehículo 3S2 para realizar su trayectoria es equivalente al ancho mínimo que debe tener el retorno para que el vehículo pueda girar sobre la trayectoria sin invadir las calzadas o salirse del pavimento.

El Factor de aislamiento que evita que el vehículo que realiza el retorno se salga de la trayectoria pavimentada. El factor en mención será de 0.60 m, factor que indica la Guía de Diseño de Vías Urbanas de Bogotá en el numeral 5.1.5 como la mínima separación del borde del separador de la trayectoria del vehículo.

De los proyectos analizados se evidencia que el retorno de Pereira – La Victoria tiene un retorno adecuado para que el vehículo pueda realizar su trayectoria sin invadir las calzadas adyacentes e inclusive un ancho de aislamiento mucho mayor al recomendado por la normativa.

El retorno de la Concesión Costera presenta un ancho excesivo, al tener hasta 6.86 m adicionales que no son aprovechables por el vehículo al realizar el giro sobre su trayectoria, esto equivale a sobrediseños y sobrecostos.

El retorno de la APP GICA no tiene un ancho suficiente para que el vehículo pueda realizar el giro sin invadir las calzadas adyacentes, lo que se traduce en un problema de seguridad y comodidad para el usuario.

Los tres proyectos analizados tienen concatenaciones distintas en el eje. En la APP. Pereira – La Victoria el eje está compuesto por tres curvas de radios distintos; en la Concesión Costera se compone de dos radios circulares de igual dimensión y el de la APP. GICA se compone de un radio circular. Con esto se puede concluir que la composición del eje no tiene mayor relevancia al diseñar el eje, se ajusta a las condiciones que requiere el proyecto y está sujeto a la decisión del diseñador.

En los tres proyectos se detectó que los carriles de aceleración y desaceleración no rotan independientemente de las calzadas, generando que toda la transición de peralte suceda en el retorno.

9. Referencias

Instituto Nacional de Vías (2008). Subdirección de Apoyo Técnico: *Manual de Diseño Geométrico de Carreteras*. Colombia.

Banco de Desarrollo de América Latina, Universidad Nacional de Colombia, Alcaldía Mayor de Bogotá (2015). *Guía Para el Diseño de Vías Urbanas Para Bogotá D.C.*, Bogotá D.C.

Association of State Highway and Transportation Official. (2001) *A Policy on Geometric Design of Highways and Street*. Washington D.C.

Cardenas Grisales, James (2002). *Diseño Geométrico de Vías*. Primera Edición: Bogotá D.C

Ministerio de Transporte de Colombia (2015). Manual de señalización vial. Colombia.

Choconta, P. (s.f.). *Diseño Geométrico De Vías*. Escuela Colombiana De Ingeniería.

Contreras, O. U. (2013). *Diseño Geométrico De Carreteras Con Autocad Civil 3D*.

Administración Federal de Autopistas del Departamento Estadunidense de Transporte *Median (2014). U-Turn (MUT) Informational Guide & Resticted Crossing U-Turn Intersection*, Estados Unidos.

Universidad de Naresuan (2014). *The Optimal Design of U-Turns on Thai Highways*. Tailandia.

Manual Centroamericano de Normas para el diseño Geométrico de Carreteras (2011). Tercera edición.

República Unida de Tanzania, Ministerio de Trabajos (2011). *Manual de diseño geométrico de vías*. Tanzania.

Ministerio de Vivienda y Urbanismo, División de Desarrollo Urbano (2009). *Manual de Vialidad Urbana – Recomendaciones para el Diseño de Elementos de Infraestructura Vial Urbana*. Chile.

Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013). *Manual de Carreteras – Diseño Geométrico*. Perú.

Distefano, n; Leonardi, S (2016). *U-Turn Lanes in Narrow-Width Median Openings: Design Criteria For a Safe and Efficient Project*. Archives of Civil Engineering, Vol. I.XII, ISSUE.

Potts, I. Harwoof, D. Torbic, d. Richard, K. Gluck, J. Levinson, H. Garvey, P. Ghebrial, R. (2004) *Safety of U-Turns at Unsignalized Median Openings*. NCHRP Report 524, Transportation Research Board, Washington D.C.