COMPARACIÓN DE LOS VALORES DEL SOBREANCHO (U, F_A), DE LAS NORMATIVAS INVIAS-2008 Y AASHTO-2018, CON SIMULACIONES REALIZADAS CON VEHICLE TRACKING DE AUTODESK, PARA VELOCIDADES DE 20, 30 Y 40 KM/H Y VEHÍCULO RÍGIDO BUS 14, EN FUNCIÓN DE VARIACIONES DEL ÁNGULO DE DEFLEXIÓN.

KAREN JULIETH SERRATO TRUJILLO

MARIA ALEJANDRA PATIÑO AGUILAR

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales

Ingeniería Topográfica

Bogotá D.C.; Colombia

2021

COMPARACIÓN DE LOS VALORES DEL SOBREANCHO (U, F_A), DE LAS NORMATIVAS INVIAS-2008 Y AASHTO-2018, CON SIMULACIONES REALIZADAS CON VEHICLE TRACKING DE AUTODESK, PARA VELOCIDADES DE 20, 30 Y 40 KM/H Y VEHÍCULO RÍGIDO BUS 14, EN FUNCIÓN DE VARIACIONES DEL ÁNGULO DE DEFLEXIÓN.

KAREN JULIETH SERRATO TRUJILLO

MARIA ALEJANDRA PATIÑO AGUILAR

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar por el Título de INGENIERO TOPOGRÁFICO bajo la dirección de:

Ing. Carlos Javier González Vergara M Sc.

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales

Ingeniería Topográfica

Bogotá D.C.; Colombia

2021

A nuestras familias, principalmente a nuestras madres, gracias por el apoyo, la dedicación, la compresión y el amor, sin ellas no estaríamos culminando esta etapa.

A los maestros y amigos que nos brindaron su apoyo en este recorrido, gracias por hacer parte del proceso formativo y profesional.

"Lo que puedas hacer o soñar, ponte a hacerlo.

La osadía está llena de genialidad, poder y magia".

Johann Wolfgang von Goethe

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Tabla de Contenido

Resumen 11

Introducción 13

1. Planteamiento del problema 15

1.1 Pregunta Problema 17

2. Antecedentes 18

3. Objetivos 21

3.1 Objetivo General 21

3.2 Objetivos Específicos 21

4. Justificación 22

5. Marco Referencial 24

5.1. Marco teórico 24

5.2 Marco Legal 39

6. Formulación de la hipótesis 40

7. Metodología 41

7.1 Preliminares 42

7.1.1 Matriz en civil 3D. 43

7.1.2 Diseño curvas. 44

7.2 Simulaciones 46

7.2.1 Selección de vehículo en Civil 3D 46

7.2.2 Simulaciones 47

7.2.3 Obtención de Valores U y F_A 48

8. Resultados 52

8.1 U y F_A 52

9. Análisis de Resultados 58

9.1 Análisis U 58

9.2 Análisis F_A 65
9.3 Análisis diferencias valores U y F_A (Fórmula AASHTO – Medidas Simulaciones). 73
9.4 Análisis simulación 78
9.4.1 Trayectoria controlada 78
9.4.2 Trayectoria ampliación después del PT 79
9.4.3 Trayectoria sin punto obligado en PC 79
9.4.4 Trayectoria desviada saliendo de la curva 81
9.4.5 Trayectoria desviada durante el desarrollo de la curva 81
10. Conclusiones y Recomendaciones 83
Bibliografía 86
Anexos 89

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Dimensiones Bus Grande 27
Ilustración 2. Trayectoria de giro para Bus grande 27
Ilustración 3. Dimensiones Bus Padrón 28
Ilustración 4. Trayectoria de giro Bus Padrón 28
Ilustración 5. Dimensiones del BUS 14 29
Ilustración 6. Trayectoria de giro BUS 14 30
Ilustración 7. Sobreancho en curvas 33
Ilustración 8. Sobreancho de la curva para un carril en carreteras Terciarias 34
Ilustración 9. Diagrama de Procesos 41
Ilustración 10. Layers 42
Ilustración 11. Matriz Radio Vs. Deflexión 43
Ilustración 12. Orden Matriz 43
Ilustración 13. Diseño Alineamientos- Curva Radio 200m con Deflexión 40° 44
Ilustración 14. Ancho de Carril 3 m-Curva Radio de 20 m; Deflexión 180| 45
Ilustración 15. Ancho de Carril 3.3m-Curva Radio de 20 m; Deflexión 180| 45
Ilustración 16. Eje de Trayectoria seccionado cada 10 m-Curva Radio140m; Deflexión 40° 45
Ilustración 17. Librería de Vehicle Tracking 46
Ilustración 18. Bus Grande 47
Ilustración 19. BUS 14 47
Ilustración 20. Ventana parámetros iniciales Simulación 47
Ilustración 21. Simulación Velocidad 20 km/h – Curva Radio 25 m; Deflexión 170° 48
Ilustración 22. Líneas de Trayectoria – Curva Radio 40m; Deflexión 40° Vel 40km/h a:3m. 49
Ilustración 23. Medida Valores U y F_A – Curva Radio 30m; deflexión 100° Vel 20km/h 49
Ilustración 24. Anexo 5. Matriz de Simulaciones- Modelaciones Vel 30km/h a:3m 50
Ilustración 25. Anexo 3. Medidas U y F_A Simuladas – Vel20km/h, a:3m 53
Ilustración 26. Diferencia AASHTO-Simulaciones – Vel20km/h, a:3m 56

Ilustración 27. U para Radios 140 m – 3000 m. Vel 20 km/h a:3 m..... 59
Ilustración 28. U para Radios 140 m – 3000 m. Vel 30 km/h a:3 m..... 60
Ilustración 29. U para Radios 140 m – 3000 m. Vel 40 km/h a:3 m..... 60
Ilustración 30. U para Radios 140 m – 3000 m. Vel 40 km/h a:3.3 m..... 61
Ilustración 31. U para Radios 20 m – 130 m. Vel 20 km/h a:3 m..... 62
Ilustración 32. U para Radios 20 m – 130 m. Vel 30 km/h a:3 m..... 62
Ilustración 33. U para Radios 20 m – 130 m. Vel 40 km/h a:3 m..... 63
Ilustración 34. U para Radios 20 m – 130 m. Vel 40 km/h a:3.3 m..... 63
Ilustración 35. F_A para Radios 140 m – 3000 m. Vel 20 km/h a:3 m 66
Ilustración 36. F_A para Radios 140 m – 3000 m. Vel 30km/h a:3m 66
Ilustración 37. F_A para Radios 140 m – 3000 m. Vel 40km/h a:3 m 67
Ilustración 38. F_A para Radios 140 m – 3000 m. Vel 40km/h a:3.3 m 67
Ilustración 39. F_A para Radios 20 m – 130 m. Vel 20km/h a:3 m 68
Ilustración 40. F_A para Radios 20 m – 130 m. Vel 30 km/h a:3 m 69
Ilustración 41. F_A para Radios 20 m – 130 m. Vel 40 km/h a:3 m 69
Ilustración 42. F_A para Radios 20 m – 130 m. Vel 40 km/h a:3.3 m 70
Ilustración 43. Vel. 20 km/h Diferencias valores U y Fa (AASHTO-Medidas Simulaciones) ∡ 10°, 20° 73
Ilustración 44. Vel. 20 km/h Diferencias valores U y Fa (AASHTO-Medidas Simulaciones) ∡ 30°, 40° 74
Ilustración 45. Vel. 20 km/h Diferencias valores U y Fa (AASHTO-Medidas Simulaciones) ∡ 50°, 60°,70°..... 74
Ilustración 46. Vel. 30 km/h Diferencias valores U y Fa (AASHTO-Medidas Simulaciones) ∡ 10°, 20° 75
Ilustración 47. Vel. 30 km/h Diferencias valores U y Fa (AASHTO-Medidas Simulaciones) ∡ 30°, 40° 75

Ilustración 48. Vel. 40 km/h, a=3 m Diferencias valores U y Fa (AASHTO-Medidas Simulaciones) ∡ 10°, 20° 76

Ilustración 49. Vel. 40 km/h, a=3 m Diferencias valores U y Fa (AASHTO-Medidas Simulaciones) ∡ 30°, 40° 76

Ilustración 50. Vel. 40 km/h, a=3.3 m Diferencias valores U y Fa (AASHTO-Medidas Simulaciones) ∡ 10°, 20° 77

Ilustración 51. Vel. 40 km/h, a=3.3 m Diferencias valores U y Fa (AASHTO-Medidas Simulaciones) ∡ 30°, 40° 77

Ilustración 52. Trayectoria controlada - Vel 20 km/h R: 35 m Defl:60° 78

Ilustración 53. Trayectoria ampliación después del PT - Vel 30 km/h R: 30 m Defl:10° 79

Ilustración 54. Trayectoria sin punto obligado en PC- Vel 30 km/h R: 25 m Defl:30° 80

Ilustración 55. Trayectoria con punto obligado en PC - Vel 30 km/h R: 25 m Defl:30° 80

Ilustración 56. Trayectoria desviada saliendo de la curva - Vel 40 km/h a:3 m R: 25 m Defl:40° 81

Ilustración 57. Trayectoria desviada en curva - Vel 40 km/h a:3.3 m R: 35 m Defl:90° 82

Ilustración 58. Trayectoria desviada en curva - Vel 40 km/h a:3.3 m R: 25 m Defl:180° 82

Índice de Tablas

Tabla 1. Valores de la Velocidad de Diseño de los Tramos Homogéneos (VTR) en función de la categoría de la carretera y el tipo de terreno 25
Tabla 2. Nomenclatura empleada para la descripción de los vehículos de diseño 26
Tabla 3. Dimensiones principales de los vehículos de diseño 26
Tabla 4. Dimensiones autobuses según el Ministerio de Transporte 29
Tabla 5. Radios mínimos para peralte máximo emáx = 8 % y fricción máxima 31
Tabla 6. Radios mínimos para peralte máximo emáx = 6 % y fricción máxima 31
Tabla 7. Ancho de calzada para valores de C 36
Tabla 8. Dimensiones vehículo Bus Grande 47
Tabla 9. Dimensiones vehículo BUS14 47
Tabla 10. Calculo U y F_A – AASHTO- Vel (20,30,40) km/h; a:3m 54
Tabla 11. Calculo U y F_A – INVIAS- Vel,40 km/h; a:3.3m 55
Tabla 12. Calculo U y F_A – AASHTO- Vel,40 km/h; a:3.3m 55
Tabla 13. Convenciones diferencias 57
Tabla 14. Rango simulaciones erróneas. Vel. 20 km/h 64
Tabla 15. Rango simulaciones erróneas. Vel. 30 km/h 64
Tabla 16. Rango simulaciones erróneas y valores medidos. Vel. 40 km/h a=3 m 65
Tabla 17. Rango simulaciones erróneas y valores medidos. Vel. 40 km/h a=3.3 m 65
Tabla 18. Desviación estándar para Vel 20 km/h a:3 m 72
Tabla 19. Desviación estándar para Vel 30 km/h a:3 m 72
Tabla 20. Desviación estándar para Vel 40 km/h a:3 m 72
Tabla 21. Desviación estándar para Vel 40 km/h a:3.3 m 72

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1. Radio de Curvatura mínimo mediante la ecuación de equilibrio 31

Ecuación 2. Sobreancho INVIAS Vehículos Rígidos 34

Ecuación 3. Sobreancho AASHTO para todo tipo de vehículo y para vehículos articulados según el INVIAS 35

Ecuación 4. Ancho de Calzada 35

Ecuación 5. U según AASHTO 36

Ecuación 6. U según INVIAS 36

Ecuación 7. F_A AASHTO e INVIAS 37

Ecuación 8. Sobreancho adicional de Seguridad (Z) 37

Ecuación 9. Cálculo U AASHTO 51

Ecuación 10. Cálculo F_A AASHTO 51

Ecuación 11. Cálculo U INVIAS 51

Ecuación 12. Cálculo F_A INVIAS 51

Resumen

Esta investigación se planteó con el fin de determinar el valor de las variables del sobreancho U y FA, necesarias para carreteras, de 20 km/h, 30 km/h y 40 km/h, considerando el ángulo de deflexión como un factor influyente en este cálculo, a fin de concluir si este, genera una variación entre los ángulos comprendidos de 10° a 180° para un mismo radio de curvatura y velocidad especifica. Mediante el software Civil 3D, en su modulo Vehicle Tracking, se realizaron simulaciones para un Bus grande correspondiente al vehículo rígido en Colombia con su equivalente a BUS 14 de la norma norteamericana, obteniendo medidas de U y FA para los rangos establecidos en cada matriz de velocidad, posteriormente se realizó el cálculo con las fórmulas postuladas por las normativas INVIAS Y AASHTO, con el propósito de ser comparados con los valores de la modelación y determinar la dispersión de ellos para un mismo radio en función del ángulo de deflexión. Finalmente, los cálculos de las normas reflejaron un sobredimensionamiento referente a las simulaciones, cuando las condiciones son radios de giro y deflexiones pequeñas, lo cual indica que la metodología propuesta permitiría mejorar el cálculo y diseño del sobreancho.

Palabras clave: Sobreancho, Ángulo de Deflexión, Simulaciones, Vehicle Tracking, INVIAS, AASHTO, Radio de Curvatura.

Abstract

This research was proposed in order to determine the value of the widening variables (U and F_A), necessary for roads of 20 km/h, 30 km/h y 40 km/h, considering the deflection angle as an influential factor in this calculation, to conclude whether this, generates a variation between the angles included from 10° a 180° for the same radius of curvature and specific speed. Using Civil 3D software, in its Vehicle Tracking module, simulations were carried out for a Bus Grande corresponding to the rigid vehicle in Colombia with its equivalent BUS 14 of the American regulation, obtaining measures of U and F_A for ranges set in each speed matrix, later the calculation was carried out with the postulated formulas by the INVIAS and AASHTO regulations, with the proposed to be compared with se modeling values and determine their dispersion for the same radius in function of the deflection angle. Finally, the calculation of the regulations showed an oversizing referring to the simulations, when the conditions are turning radius or small deflections, which indicates that the proposed methodology would improve the calculation and design of widening.

Keywords: Widening, Deflection Angle, Simulations, Vehicle Tracking, INVIAS, AASHTO, radius of curvature.

Introducción

El diseño geométrico de vías en Colombia ha sido tema de amplia investigación a lo largo de los años, procurando buscar óptimas soluciones a los problemas que se generan debido a las variaciones del terreno, el incremento de vehículos que transitan por los corredores viales, además de querer mejorar la operación y niveles de servicio de los mismos, por ello, gran parte de los incidentes que se presentan tienden a ocurrir por la falta de condiciones apropiadas en las vías existentes, esto, referente a las variables de diseño como por ejemplo el cálculo del valor de sobreancho, el cual debe ser una ampliación adecuada con el objetivo de evitar accidentes por movimientos no seguros o invasión de carril a lo largo de las curvas, siendo así motivo de múltiples investigaciones con el fin de proporcionar diseños geométricos seguros, óptimos y funcionales.

La norma colombiana para el diseño geométrico de carreteras establece el cálculo del sobreancho según dos tipos de vehículo, para vehículos rígidos se realiza un cálculo simple en función del radio de curvatura, mientras que para vehículos articulados se consideran además del radio otros factores que indican valores significativos, pero probablemente dichos cálculos no son los más adecuados para las necesidades que presenta el país, ya que, se basan en radios de giro amplios que no son convencionales en las vías colombianas con radios y deflexiones pequeñas, por lo que, determinar este ancho adicional de carril puede afectar el presupuesto destinado al diseño de la vía, haciendo necesario encontrar las mejores metodologías para ampliaciones adecuadas y ajustadas según los elementos geométricos del corredor vial, las dimensiones de los vehículos y las necesidades del país.

El presente estudio busca realizar la comparación de los valores del sobreancho de la normativa colombiana INVIAS[1] y la norteamericana AASHTO[2] con modelaciones ejecutadas en el software de simulación Vehicle Tracking para curvas circulares simples, teniendo en cuenta velocidades de diseño específicas, anchos de carril y calzada, además de establecer los radios de curvatura, ángulos de deflexión y vehículo de diseño, dichas simulaciones tienen como objetivo representar el recorrido del vehículo a lo largo de la zona de curvatura, en condiciones cercanas a la realidad del corredor vial en operación, obteniendo el ancho de camino barrido "U" y el ancho ocupado por el voladizo delantero del vehículo "F_A", esto con el propósito de determinar la variación de las variables mencionadas del sobreancho, si experimentan alteraciones significativas y concluyendo cuales son los valores más adecuados para suplir los requerimientos del territorio colombiano.

[1] INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS (INVIAS). Manual de Diseño Geométrico de Carreteras. Bogotá: INVIAS, 2008

[2] AASHTO. American Association of State Highway and Transportation officials. A Policy on Geometric Design of Highways and Streets. Washington D.C, 2011.

1. Planteamiento del problema

Actualmente en Colombia para generar e implementar la red vial, se requiere de un diseño previo que cumpla con los parámetros dados según la normatividad del Ministerio de Transporte y el Instituto Nacional de Vías (INVIAS); cada uno de estos debe cumplir criterios calculados respecto a las variables, en función del tipo de vía, tales como: el terreno del sector, el tipo de vehículo que hará uso de dicha vía, la velocidad con la cual diseñar y demás parámetros que permitan un correcto desempeño y funcionamiento.

En el proceso de diseño, un elemento a determinar es el sobreancho, definido por el manual de diseño geométrico como: "*En curvas de radio reducido, según sea el tipo de vehículos comerciales que circulan habitualmente por la carretera, se debe ensanchar la calzada con el objeto de asegurar espacios libres adecuados entre los vehículos que se cruzan en calzadas bidireccionales o que se adelantan en calzadas unidireccionales, y entre el vehículo y el borde de la calzada*" (INVIAS, 2008) [3]. La razón de un apropiado cálculo para el valor de ampliación de la calzada en curva, se debe a la necesidad de ofrecer el tránsito del corredor vial en condiciones de seguridad y comodidad para el usuario, con ello, evitar que este maniobre el vehículo incorrectamente ocasionando accidentes e invasión de carril.

"*…dicho parámetro aumenta con el tamaño del vehículo y disminuye con el aumento de radio de curva*"(Puerto Higuera, 2017)[4], Colombia cuenta con una topografía representativa donde se ha estructurado la malla vial, haciendo que en su mayoría los diseños de la red vial se realicen en función de radios de curvatura pequeños y deflexiones variables, por lo que, se da la

[3] INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS (INVIAS). Manual de Diseño Geométrico de Carreteras. Bogotá: INVIAS, 2008

[4] PUERTO HIGUERA, G. J. *Determinación del Sobreancho Requerido para Vías con Bajas Velocidades de Diseño en Colombia*. Bogotá D.C. 2017.

necesidad de evaluar el sobreancho y sus variables para condiciones extremas como lo son las características anteriormente mencionadas además del vehículo con las dimensiones superiores correspondiente al tipo de vía por la que transita.

En el manual de diseño geométrico de carreteras, definen y explican los criterios necesarios para el diseño óptimo de una vía, sin embargo para el cálculo del sobreancho, plantea metodologías únicamente para dos vehículos, basados además en la normativa americana (AASTHO, 2011)[5], no se evidencia o refleja algún estudio para determinar un valor correcto de dicho parámetro en la red vial colombiana, lo cual se debería hacer dadas las condiciones que se presentan específicamente en el país mencionadas anteriormente. Según la misma norma, el cálculo del sobreancho se debe realizar haciendo uso de fórmulas en función del ancho de calzada, el radio de curvatura, la velocidad específica de cada curva, el parámetro C que es el espacio lateral de seguridad y las dimensiones del vehículo de diseño, que representa a los vehículos que transitarán sobre la vía, pero estas condiciones las cumple el cálculo para vehículos articulados, mientras que, en el caso de vehículos rígidos la norma adoptó la fórmula de (Barnett, 1938)[6], que considera únicamente el radio de curvatura, despreciando demás factores cuyos valores se consideran significativos.

Los valores obtenidos para el sobreancho mediante dichas formulas, no siempre generan los resultados más óptimos en cuanto a diseño y condiciones de seguridad adecuadas con respecto a la realidad de la vía en etapa de operación, además de la posibilidad de generar sobrecostos debido al sobredimensionamiento del parámetro, por lo cual se busca demostrar a través de simulaciones, que factores se deben tener en cuenta para el correcto cálculo o determinación del

[5] AASHTO. American Association of State Highway and Transportation officials. A Policy on Geometric Design of Highways and Streets. Washington D.C, 2011.
[6] BARNETT J. Transition Curves for Highway, Washington D.C, 1938.

sobreancho (U y F_A) en vehículos rígidos, agregando una nueva variable del diseño vial, que corresponde al ángulo de deflexión, a fin de justificar que en comparación con los valores resultantes habituales dados por las normativas, estos generan mejores resultados en factores de diseño, seguridad y operación.

1.1 Pregunta Problema

¿El ángulo de deflexión influye en el cálculo de las variables U y F_A para vehículo rígido y las velocidades en estudio?

- ¿Existe cambio significativo entre los métodos de cálculo de las normativas comparado con las simulaciones de giro?
- ¿Qué radios presentan mayor diferencia entre el cálculo obtenido con las normativas y los valores hallados con las simulaciones?

2. Antecedentes

El área de estudio de este proyecto ha sido tema de investigación reciente para diversos proyectos, en el ámbito nacional, Geisa Puerto (2017) en su trabajo de grado “Determinación del Sobreancho Requerido para Vías con Bajas Velocidades de Diseño en Colombia”, evaluó métodos matemáticos internacionales y nacionales para la obtención del sobreancho, comparándolos con valores resultantes de simulaciones, indicando que en un rango especifico de radio, el ángulo de deflexión influye en el cálculo del sobreancho, además de inferir que para sobreanchos parcialmente desarrollados y sobreanchos máximos, las simulaciones son un metodología óptima.(Puerto Higuera, 2017).

Elkin Cañón (2018) en su trabajo de grado “Radios de Giro en Camiones Articulados para Diseño Vial Urbano en Colombia” mediante las dimensiones de los vehículos de análisis y estudios en campo, determinó los radios de giro mínimos correspondientes, con el fin de mejorar los diseños viales de Colombia, el estado de operación y su tránsito en vías urbanas.(Cañon Buitrago, 2018).

Ginna Montoya & Yerly Cárdenas (2020) en su proyecto de grado “Propuesta de Modificación del Sobreancho Mínimo Requerido para el Vehículo C3S2 en el Diseño de Vías en Colombia”, analizan metodologías, formulaciones o expresiones matemáticas con las cuales se obtiene el valor del sobreancho, que luego se determinó mediante simulaciones en Vehicle Tracking, para posteriormente llevar a cabo una serie de pruebas piloto en una vía seleccionada demarcando el recorrido del vehículo, finalmente desarrollaron una herramienta en el software Microsoft Visual Studio 2019, la cual realiza el cálculo del sobreancho basado en las metodologías que se plantearon durante la investigación.(Montoya Suarez & Cárdenas Rodriguez, 2020).

Además, Internacionalmente también se presentan problemas de esta índole como menciona Jorge Saavedra (2021) en su tesis "Propuesta de Diseño de Ancho y Sobreancho de Curva de Volteo para un Semi Tráiler en la Carretera de Canta" *"A nivel internacional, por el mal diseño geométrico en cuanto al radio de curva y sobreancho han ocasionado muchos accidentes, no solo basta con tener una buena educación vial, también hace falta que el trazo vial sea consistente."*(Saavedra Ramirez, 2021).

En Pennsylvania, Eric Donnell, Michelle Adolini, Darren Torbic, John Mason & Lily Elefteriadou, en "Truck Safety Considerations for Geometric Design and Traffic Operations", evalúan si las dimensiones de los vehículos y las características operativas, afectan la infraestructura vial, cuyos impactos deben considerarse en el diseño geométrico, para las trayectorias de giro mencionan que los vehículos más grandes presentan mayores desvíos y se deben considerar las características del mismo, además de mencionar estudios de trayectorias de giro y que tipo de vehículos no la realizan exitosamente, generando invasiones de carril.(Donnell et al., n.d.).

En Serbia, Dušan Stojnić, Milorad Janić, Milorad Zlatanović & Bogdan Stefanović (2015) en "Impact of vehicle movement simulation on the size of forest road traveled way widening in small radius curves", realizaron la comparación del método tradicional de cálculo, con simulaciones de movimientos en el software System Survey para vehículos en curvas de radio pequeños, ambos aplicados a la reconstrucción de la carretera Rasadnik – Pustinac, con el fin de determinar la correcta ampliación requerida, concluyendo que mediante el método tradicional se realiza mayor movimiento de tierra, afectando directamente el presupuesto.(Stojnic et al., 2015).

En normas de diseño extranjeras las cuales contemplan *"Los sobreanchos se diseñan siempre en las curvas horizontales de radios pequeños, combinadas con carriles angostos, para facilitar*

las maniobras de los vehículos en forma eficiente, segura, cómoda y económica" como el Manual Centroamericano para el Diseño de Carreteras (Secretaría de Integración Económica Centroamericana, 2011), el Manual de Carreteras de Paraguay (Ministerio de Obras Publicas y Comunicaciones, 2011), *"De la misma forma, el Servicio de Estudios Técnicos de Carreteras y Autopistas de Francia*[7]*, detalla que las curvas que requieren sobreancho, son aquellas con radios menores a 200m, aclarando que para la proyección de sobreanchos en radios muy pequeños se deben hacer estudios detallados de giro"* (Puerto Higuera, 2017).

[7] SERVICE D'ÉTUDES TECHNIQUES DES ROUTES ET AUTOROUTES. Comprendre les principaux paramètres de conception géométrique des routes. Francia: Ministère des Transports de l'Équipement du Tourisme et de la Mer,2006. p.17.

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

- Hallar el valor de las variables del sobreancho (U y F_A) que se requieren para unos radios determinados, calculadas mediante simulaciones realizadas en Vehicle Tracking de Civil 3D en función de ángulos de deflexión para un vehículo BUS 14 en velocidades de 20 km/h, 30 km/h y 40 km/h.

3.2 Objetivos Específicos

- Realizar las simulaciones de giro para el vehículo tipo rígido BUS-14 para los radios de 20m a 55m en intervalos de 5 en 5, de 60m a 250m en intervalos 10 en 10, de 300m a 1000m en intervalos de 100 en 100 y de 1000m a 3000m en intervalos de 500 en 500 para velocidades de 20 km/h, 30 km/h y 40 km/h con ángulos de deflexión de 10° a 180° en intervalos de 10° en 10°, obteniendo los valores de U y F_A.
- Establecer el valor de las variables del sobreancho (U y F_A) para los valores simulados de radio, ancho de carril, velocidad y vehículo con las ecuaciones de la norma INVIAS.
- Establecer el valor de las variables del sobreancho (U y F_A) para los valores simulados de radio, ancho de carril, velocidad y vehículo con las ecuaciones de la norma AASHTO 2018.
- Realizar una comparación a partir de los resultados obtenidos con las modelaciones y los valores de las normativas INVIAS y AASHTO, y así establecer si los valores simulados sufren modificaciones respecto a las ecuaciones planteadas en las normativas.

4. Justificación

A lo largo de las últimas décadas se ha considerado que el sobreancho es uno de los parámetros más importante a la hora de evaluar y ajustar en el diseño de vías, debido a que gran parte de los accidentes viales tiene entre sus causales fallos en el diseño debido a espacios sobredimensionados de sobreancho o por el contrario la falta del mismo. Por tal motivo con el paso del tiempo se busca profundizar en métodos que permitan identificar la mejor manera de desarrollar diseños eficientes que cumplan todos los factores de seguridad y permitan una óptima operación vial. *"Si bien el Manual de Diseño Geométrico plantea que los sobreanchos se deben calcular mediante la metodología contemplada en el numeral 5.4.1.1 y 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."*[8] (Calixto Hernández, 2018,p. 72).

Adicionalmente, la metodología del numeral 5.4.1.1 está basada en la norma (AASHO, 1973)[9] en donde se dispone la formula Barnett[10] para el cálculo del sobreancho, lo cual, considerando los años de estudio, no es probable que se ajusten a las necesidades de Colombia. De igual manera, este manual no contempla las condiciones del país ya que, es característico por su topografía, así como, la frecuente implementación de curvas cerradas incrementando el uso de radios de giro mínimo, lo que conlleva a un sobrecosto en el presupuesto por el diseño y construcción de un eje vial exagerado.

[8] CALIXTO HERNANDEZ. 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. Bogotá D.C, 2018

[9] AASHO. American Association of State Highway Officials A Policy on Design of Urban Highways and Arterial Streets, Washington D.C, 1973

[10] BARNETT J. Transition Curves for Highway, Washington D.C, 1938.

Con este proyecto se busca hallar el valor real de las variables U y F_A del sobreancho, para vías diseñadas con el vehículo rígido BUS GRANDE para INVIAS[11] y su equivalente en la AASHTO[12] BUS 14, ya que, es el estipulado por la normativa para vías terciarias (urbanas locales y colectoras) de velocidades de 20 km/h, 30 km/h y 40 km/h, con el fin de lograr diseños económicos, eficientes y adecuados a las necesidades del país.

[11]INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS (INVIAS). Manual de Diseño Geométrico de Carreteras. Bogotá D.C, INVIAS, 2008

[12]AASHTO. American Association of State Highway and Transportation officials. A Policy on Geometric Design of Highways and Streets. Washington D.C, 2011.

5. Marco Referencial

5.1. Marco teórico

En el diseño geométrico de vías se evalúan varios factores internos y externos los cuales deben satisfacer los aspectos de seguridad y funcionamiento. Este proceso comienza al identificar la problemática o necesidad a solucionar; iniciando con la etapa de preinversión la cual contempla el perfil del proyecto. Luego se tiene el estudio de prefactibilidad (fase I) el cual permite reunir la información necesaria, filtra las alternativas y realiza la elección de las más convenientes, se identifican las posibles soluciones económicas y en pro del medio ambiente, estimando costos y beneficios de cada una, con el fin de optar por efectuar la evaluación final, invertir o descartar el proyecto. Por último, se ejecuta el estudio de factibilidad (fase II) en el cual a la alternativa seleccionada se le perfeccionan los estudios que proporcionen toda la información para la elaboración de presupuestos y cronogramas para los tiempos de ejecución del proyecto.

Posteriormente se entra a la etapa de ejecución donde se realizan los diseños definitivos y el estudio de criterios; la velocidad de diseño es un componente que se define en la trayectoria de una carretera dependiendo del terreno y las zonas circundantes, que además permite precisar el tipo de vía requerida, por lo tanto, corresponde a una velocidad de referencia que sirve de guía para definir las especificaciones mínimas del diseño geométrico de carreteras, en ese sentido se asumirá que las curvas diseñadas presentarán velocidades de diseño homogéneas, es decir, V_{TR} "*definida en función de la categoría de la carretera y el tipo de terreno. En ella se resume el equilibrio entre el mejor nivel de servicio que se puede ofrecer a los usuarios de las carreteras*

colombianas y las posibilidades económicas del país"(Agudelo, 2012)[13] , especificado por la normativa de la siguiente manera:

CATEGORÍA DE LA CARRETERA	TIPO DE TERRENO	VELOCIDAD DE DISEÑO DE UN TRAMO HOMOGÉNEO VTR (km/h)									
		20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
Primaria de dos calzadas	Plano										
	Ondulado										
	Montañoso										
	Escarpado										
Primaria de una calzada	Plano										
	Ondulado										
	Montañoso										
	Escarpado										
Secundaria	Plano										
	Ondulado										
	Montañoso										
	Escarpado										
Terciaria	Plano										
	Ondulado										
	Montañoso										
	Escarpado										

***Tabla 1**. Valores de la Velocidad de Diseño de los Tramos Homogéneos (VTR) en función de la categoría de la carretera y el tipo de terreno*
***Fuente:** INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS (INVIAS). Manual de Diseño Geométrico de Carreteras. Bogotá: INVIAS, 2008. Cap. 2 p.72.*

Esta velocidad esta designada desde los estudios de prefactibilidad, con la cual se comienzan a realizar el trazado de la línea de ceros y el diseño del alineamiento horizontal, para esto también es necesario determinar el vehículo de diseño acorde al tipo de vía, *"es necesario tener en cuenta que esta selección incide directamente en la definición de las dimensiones de los anchos de carril, calzada, bermas y sobreanchos de la sección transversal"* (Instituto Nacional de Vías, 2008), el cual está estipulado de la siguiente manera en las normativas:

[13] AGUDELO, John Jairo Ospina. 2002. Diseño Geométrico de vías ajustado al manual colombiano. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de minas. Medellín: s.n., 2002. P135.

El INVIAS[14] adopta la clasificación vehicular del Ministerio Transporte en la Resolución 4100 del 28 de diciembre de 2004 y establece una nomenclatura para describir los vehículos de diseño (Ministerio de Transporte de Colombia, 2004):

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

Tabla 2. *Nomenclatura empleada para la descripción de los vehículos de diseño*
Fuente: *INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS (INVIAS). Manual de Diseño Geométrico de Carreteras. Bogotá: INVIAS, 2008. Cap. 2 p.85.*

De la misma manera indica las dimensiones de los vehículos de diseño:

CATEGORIA	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

Tabla 3. *Dimensiones principales de los vehículos de diseño*
Fuente: *INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS (INVIAS). Manual de Diseño Geométrico de Carreteras. Bogotá: INVIAS, 2008. Cap. 2 p.85.*

Para las velocidades de 20 km/h, 30 km/h y 40 km/h, el vehículo de diseño según el manual del INVIAS por ser vías terciarias, correspondiente a un BUS GRANDE, definido en las siguientes dimensiones y trayectoria:

[14]INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS (INVIAS). Manual de Diseño Geométrico de Carreteras. Bogotá D.C, INVIAS, 2008

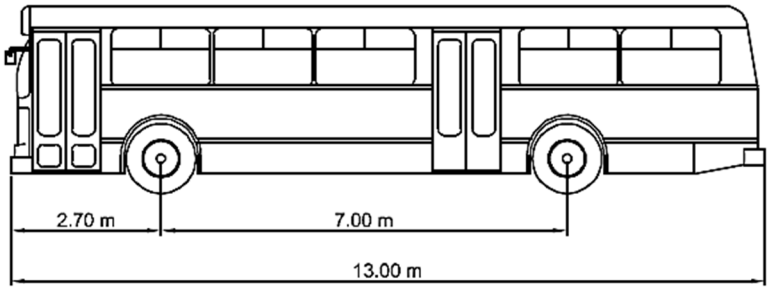


Ilustración 1. *Dimensiones Bus Grande*
Fuente: *INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS (INVIAS). Manual de Diseño Geométrico de Carreteras. Bogotá: INVIAS, 2008. Cap. 2 p.88.*

Estas trayectorias definen el espacio que necesita el vehículo para realizar un giro de 180°.

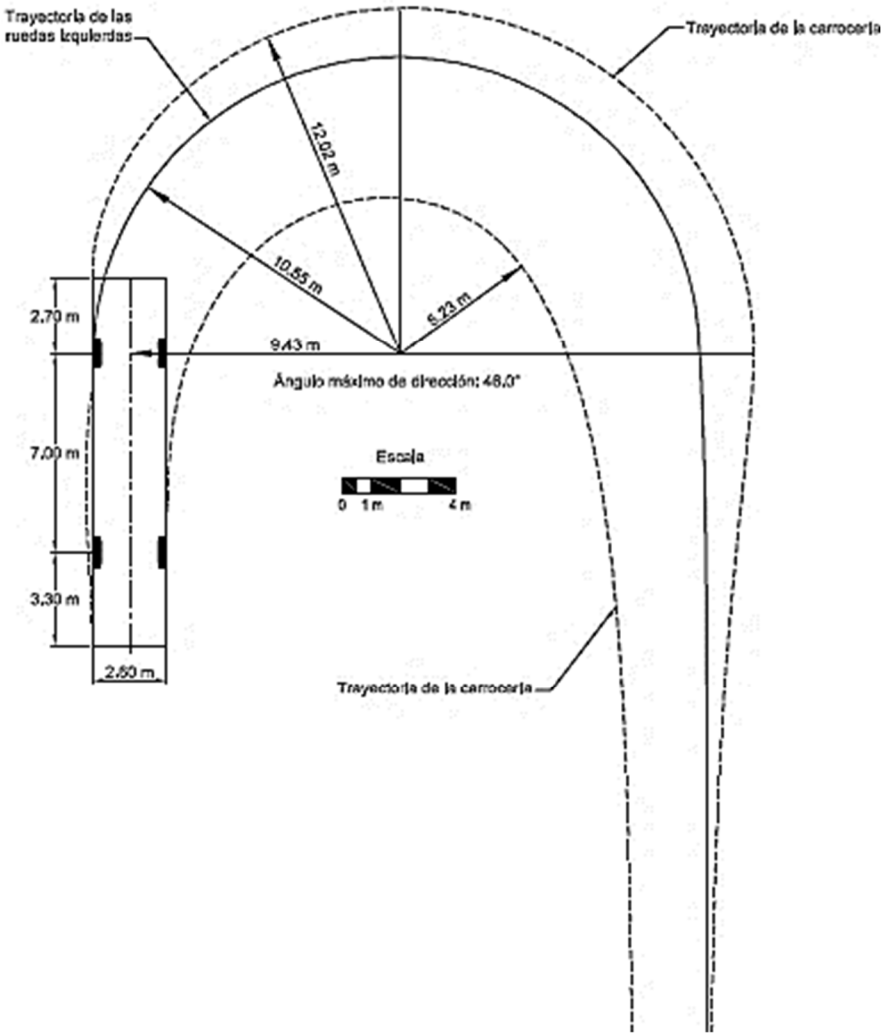


Ilustración 2. *Trayectoria de giro para Bus grande*
Fuente*: INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS (INVIAS). Manual de Diseño Geométrico de Carreteras. Bogotá: INVIAS, 2008. Cap. 2 p.88.*

Teniendo en cuenta las necesidades de la ciudad de Bogotá, la Guía de Diseño Urbano de Bogotá[15] (CAF et al., 2019) también establece unos vehículos de diseño, donde el vehículo equivalente al del manual del INVIAS es el BUS PADRÓN que cuenta con las siguiente dimensiones y trayectoria:

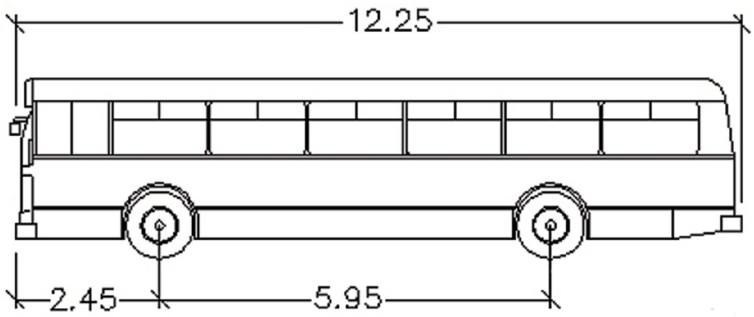


Ilustración 3. *Dimensiones Bus Padrón*
Fuente: *ALCALDIA MAYOR DE BOGOTÁ, UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, BANCO DE DESARROLLO DE ÁMERICA LATINA. Guía Para El Diseño De Vías Urbanas Para Bogotá D.C. 2019. p. 104*

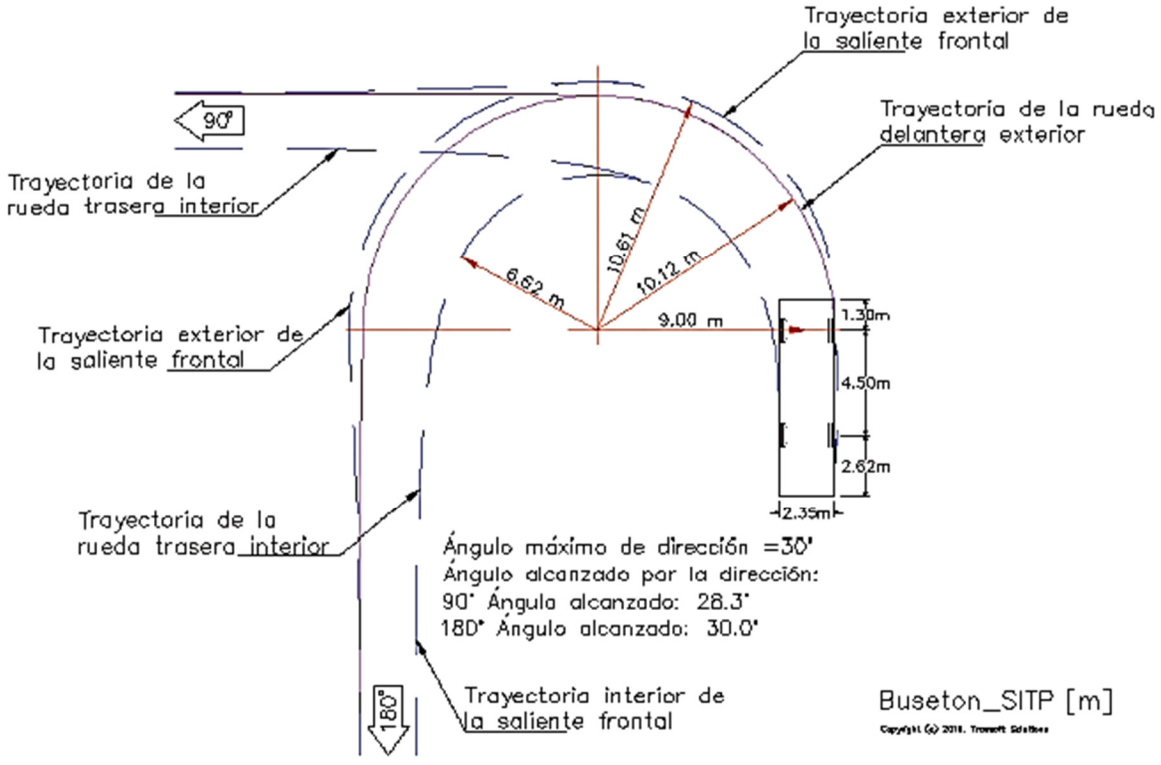


Ilustración 4. *Trayectoria de giro Bus Padrón*
Fuente: *ALCALDIA MAYOR DE BOGOTÁ, UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, BANCO DE DESARROLLO DE ÁMERICA LATINA. Guía Para El Diseño De Vías Urbanas Para Bogotá D.C. 2019. p. 104*

[15] ALCALDIA MAYOR DE BOGOTÁ, UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, BANCO DE DESARROLLO DE ÁMERICA LATINA. Guía Para El Diseño De Vías Urbanas Para Bogotá D.C. 2019

Así mismo, la guía indica que se pueden tener varios vehículos de diseño para un mismo proyecto ya que la vía puede contar con calzadas rápidas de transporte particular, calzadas de transporte público o calzadas de transporte de carga; esto se define mediante el estudio del estado más crítico a nivel geométrico y de composición vehicular proyectada.

Por último, para la normativa AASHTO[16] se escoge el vehículo BUS 14 ya que, el Ministerio de Transporte de Colombia en la Resolución 007126 de 1995 especifica las dimensiones de los autobuses de la siguiente manera:

ANCHO DEL VEHÍCULO	2.60 m Máx.
ALTURA DEL VEHÍCULO	4.10 m Máx.
LONGITUD DEL VEHÍCULO	1. Vehículo de hasta 2 ejes: 13.30 m
	2. Vehículo de hasta 3 ejes: 14.0 m
	3. Vehículo Articulado: 18.0 m
VOLADIZO ANTERIOR	2.7 m Máx.
VOLADIZO POSTERIOR	No debe ser superior al 65% de la distancia entre ejes.

Tabla 4. *Dimensiones autobuses según el Ministerio de Transporte*
Fuente: *Elaboración propia adaptado del Ministerio de Transporte Resolución 007126 de 1995*

Por tal razón, el BUS 14 es el más acorde para el estudio de las condiciones críticas del diseño, además la AASHTO indica que estas dimensiones son más grandes que todos las de los vehículos correspondientes a su clase.

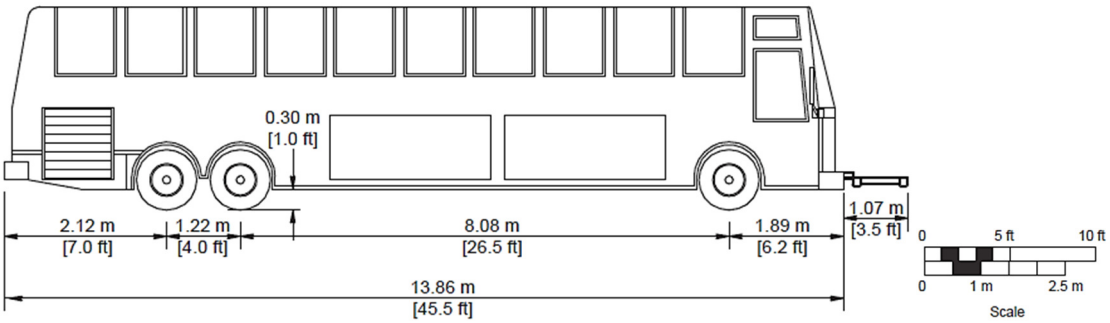


Ilustración 5. *Dimensiones del BUS 14*
Fuente: *AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO) A Policy on Geometric Design of Highways and Streets. Washington D.C, 2011. p. 2-14*

[16] AASHTO. American Association of State Highway and Transportation officials. A Policy on Geometric Design of Highways and Streets. Washington D.C, 2011.

Las trayectorias de giro están hechas a 15km/h o inferiores y si se va a realizar a mayores velocidades la norma recomienda usar curvas de transición con radios más grandes.

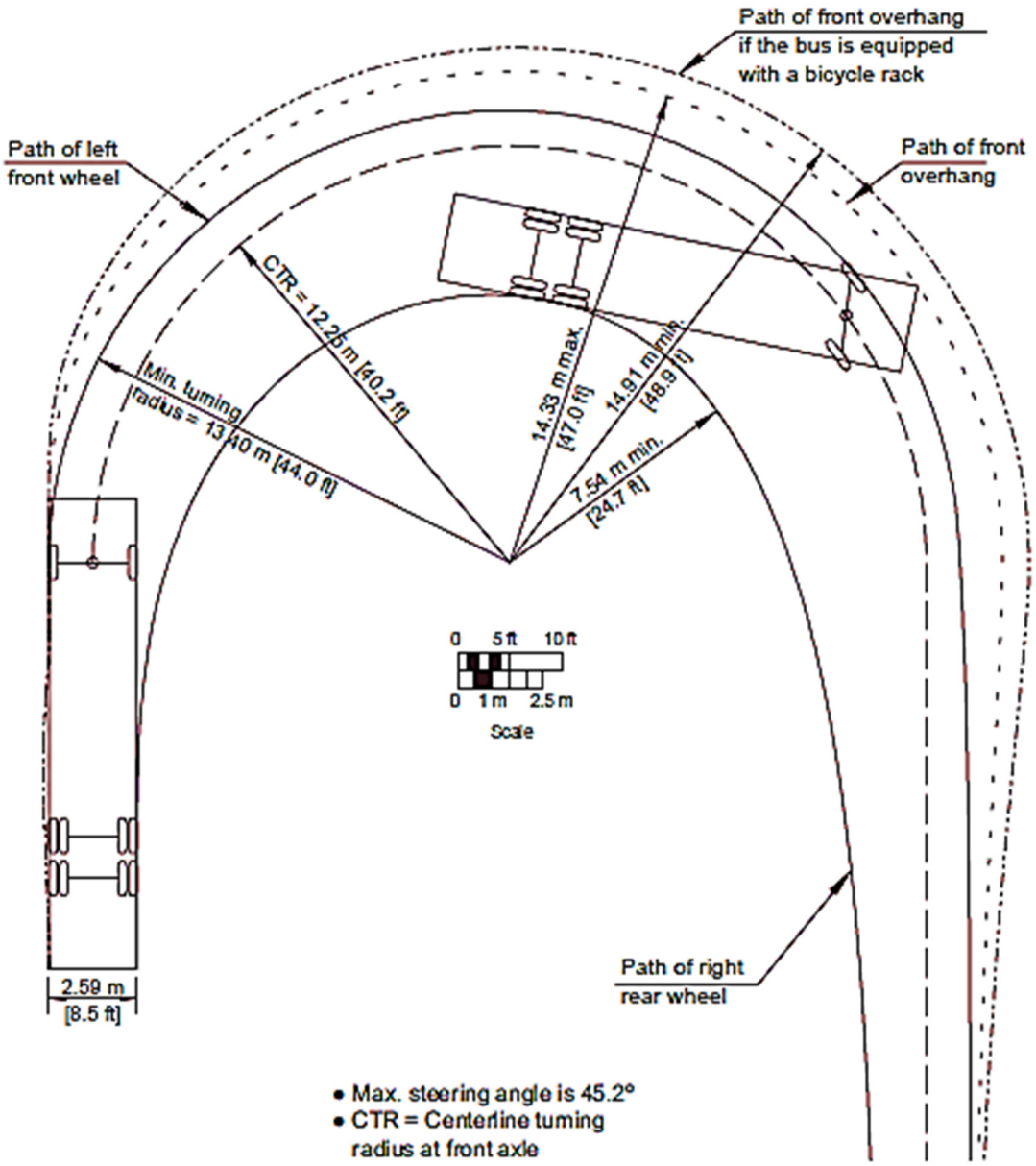


Ilustración 6. *Trayectoria de giro BUS 14*
Fuente: *AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO) A Policy on Geometric Design of Highways and Streets. Washington D.C, 2011. p. 2-14*

Actualmente la normativa INVIAS establece unos radios de curvatura mínimos tomados de la AASHTO, lo que significa que no se cuenta con un estudio propio, estos radios mínimos están organizados en dos tablas definidas por el valor del peralte máximo. La primera de e=8%:

VELOCIDAD ESPECÍFICA (V_{CH}) (km/h)	PERALTE MÁXIMO (%) (e)	COEFICIENTE DE FRICCIÓN TRANSVERSAL $f_{Tmáx}$	TOTAL $e_{máx} + f_{Tmáx}$	RADIO MÍNIMO (m)	
				CALCULADO	REDONDEADO
40	8,0	0,23	0,31	40,6	41
50	8,0	0,19	0,27	72,9	73
60	8,0	0,17	0,25	113,4	113
70	8,0	0,15	0,23	167,8	168
80	8,0	0,14	0,22	229,1	229
90	8,0	0,13	0,21	303,7	304
100	8,0	0,12	0,20	393,7	394
110	8,0	0,11	0,19	501,5	501
120	8,0	0,09	0,17	667,0	667
130	8,0	0,08	0,16	831,7	832

Tabla 5. *Radios mínimos para peralte máximo emáx = 8 % y fricción máxima*
Fuente*: INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS (INVIAS). Manual de Diseño Geométrico de Carreteras. Bogotá: INVIAS, 2008. Cap. 2 p.104.*

Y la segunda con un e=6%

VELOCIDAD ESPECÍFICA (V_{CH}) (km/h)	PERALTE MÁXIMO (%) (e)	COEFICIENTE DE FRICCIÓN TRANSVERSAL $f_{Tmáx}$	TOTAL $e_{máx} + f_{Tmáx}$	RADIO MÍNIMO (m)	
				CALCULADO	REDONDEADO
20	6,0	0,35	0,41	7,7	15
30	6,0	0,28	0,34	20,8	21
40	6,0	0,23	0,29	43,4	43
50	6,0	0,19	0,25	78,7	79
60	6,0	0,17	0,23	123,2	123

Tabla 6. *Radios mínimos para peralte máximo emáx = 6 % y fricción máxima*
Fuente*: INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS (INVIAS). Manual de Diseño Geométrico de Carreteras. Bogotá: INVIAS, 2008. Cap. 2 p.105.*

Estos valores se hallaron mediante la ecuación de equilibrio:

$$Rcmin = \frac{{V_{CH}}^2}{127 * (e_{máx} + f_{Tmáx})}$$

Ecuación 1. *Radio de Curvatura mínimo mediante la ecuación de equilibrio*

Donde:

V_{CH}: Velocidad especifica

$e_{máx}$: Peralte máximo

$f_{Tmáx}$: Fricción transversal máxima

Se recomienda utilizar los radios de curvatura mínimos solo en situaciones extremas, de lo posible diseñar las curvas con radios más grandes lo cual permita a los vehículos desplazarse de manera más cómoda.

Luego de establecer los datos iniciales, se procede a realizar el diseño del alineamiento horizontal donde se observa cual es el ángulo de deflexión y con esto se evalúa cual es el tipo de empalme adecuado para ese tramo. Para las simulaciones a realizar se recomienda trabajar con Curvas Circulares Simples las cuales permiten trabajar de manera completa la curvatura.

Los empalmes de curvas circulares presentan una curvatura constante, la cual es inversamente proporcional al valor del radio. En el diseño de carreteras corresponde a un elemento geométrico de curvatura rígida, se recomienda utilizar las curvas circulares simples únicamente cuando los ángulos de deflexión sean inferiores a 6º; también están los empalmes espirales los cuales diseñados apropiadamente proporciona una trayectoria natural y fácil de seguir por los conductores, de tal manera que la fuerza centrífuga crece o decrece gradualmente, a medida que el vehículo entra o sale de una curva horizontal.[17] Teniendo en cuenta la velocidad de diseño se asignan los radios de curvatura, se definen las entretangencias y con esto la velocidad específica para cada una de las curvas horizontales la cual según el INVIAS debe considerar la V_{TR} en que se encuentra la curva horizontal, el sentido en que el vehículo realiza el recorrido, la velocidad especifica asignada a la curva horizontal anterior, la longitud del segmento recto anterior y el

[17] INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS (INVIAS). Manual de Diseño Geométrico de Carreteras. Bogotá: INVIAS, 2008 P74-75

ángulo de deflexión, después de verificar que el empalme de las curvas y sus entretangencias cumplan, se procede a calcular el peralte dependiendo del tipo de curva que se esté analizando.

Posteriormente se lleva a cabo el cálculo del sobreancho el cual se define como el ancho adicional de calzada en curva requerido para la circulación cómoda y segura de los vehículos, dicha dimensión depende básicamente del radio de giro mínimo de curva, tamaño del vehículo y trayectoria del neumático trasero[18], esto se debe a que el ancho de calzada mínimo para una vía es de 6 m con el fin de permitir el cruce de dos vehículos en sentido contrario. Generalmente en curvas con radios y deflexiones pequeñas el vehículo no cuenta con el espacio suficiente para maniobrar sin interferir en el paso de otro vehículo al mismo tiempo, adicional a esto, la rigidez del vehículo, la geometría de la vía, la dificultad del conductor para mantener el vehículo centrado en su carril al transitar por una curva es grande, haciendo necesario realizar un ensanchamiento denominado sobreancho. Este ancho depende las condiciones de la vía y la misma curva por lo cual tiende a variar.

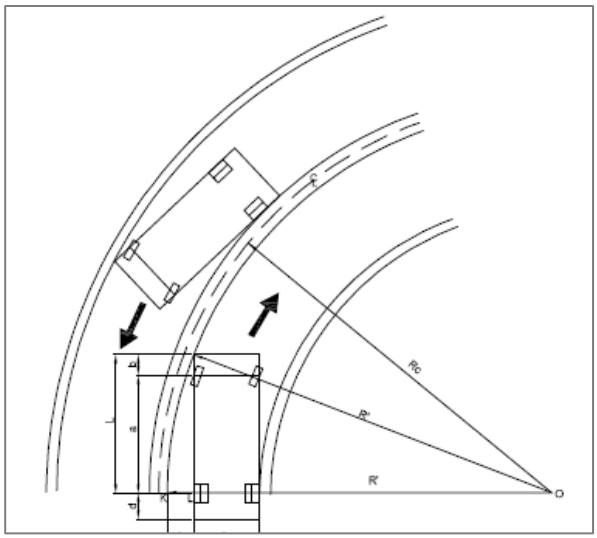


Ilustración 7. *Sobreancho en curvas*

Fuente: *INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS (INVIAS). Manual de Diseño Geométrico de Carreteras. Bogotá: INVIAS, 2008. Cap. 2 p.154.*

[18] DONNE, E., ADOLINI, M., TORBIC, D., MANSON, J & ELEFTERIADOU, L. Truck. Safety Considerations for Geometric Design and Traffic Operations. Chicago, IL: National Association of City Transportation Officials.2001. p.16

Los elementos que influyen en la determinación del ancho adicional según el INVIAS para los vehículos rígidos son: radio de la curva y número de carriles. La ecuación para la determinación de cualquier número de carriles está dada de la siguiente manera:

$$S = n\frac{32}{R}$$

Ecuación 2. *Sobreancho INVIAS Vehículos Rígidos*

Donde:

S: sobreancho de la calzada (m).

R: Radio de la curva (m).

n: Número de carriles por calzada.

32: Es el resultado de adoptar como longitud "L" del vehículo el valor de 8 m.

Según el INVIAS, un sobreancho inferior a los 0.20m se deprecia, como se puede ver en la Ilustración 8.

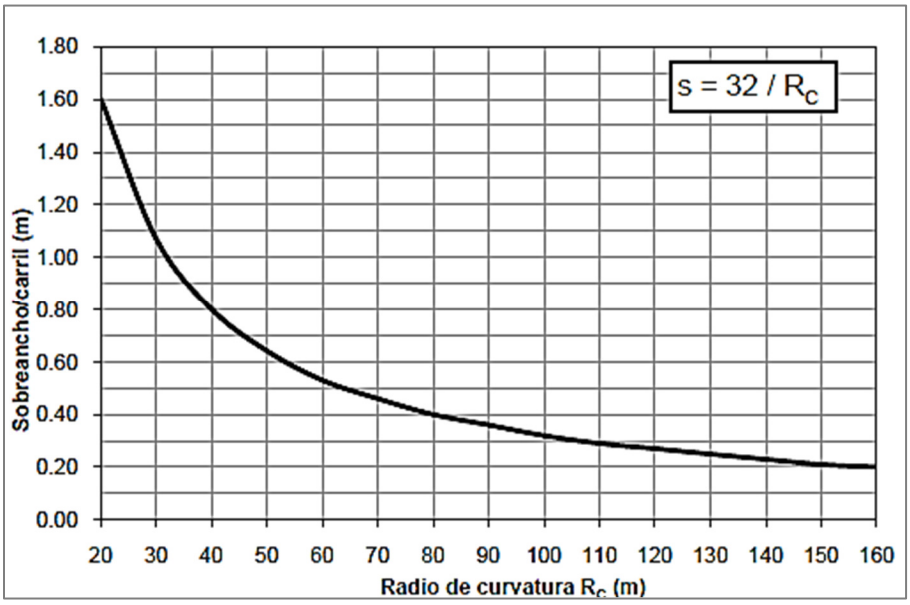


Ilustración 8. *Sobreancho de la curva para un carril en carreteras Terciarias*

Fuente: *INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS (INVIAS). Manual de Diseño Geométrico de Carreteras. Bogotá: INVIAS, 2008. Cap. 2 p.156.*

La AASHTO en su versión 2018 indica que el tamaño del sobreancho en curvas horizontales depende de la longitud y características del vehículo de diseño, a mayor tamaño del vehículo mayor sobreancho y disminuye a medida que el radio de la curva aumenta, establece el cálculo del sobreancho como la diferencia del ancho de requerido en curva y el ancho usado en recta, el INVIAS adopta este procedimiento para vehículos articulados de la siguiente manera:

$$S = AC - AT$$

Ecuación 3. *Sobreancho AASHTO para todo tipo de vehículo y para vehículos articulados según el INVIAS*

Donde:

S: Ancho requerido por la calzada, m.

AC: Ancho de calzada en curva, m.

AT: Ancho de calzada en tangente, m.

El ancho de calzada requerido en una curva A*c* corresponde a:

$$AC = n(U + C) + (n - 1) * FA + Z$$

Ecuación 4. *Ancho de Calzada*

Donde:

n: Número de carriles de la calzada.

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

C: Espacio lateral de seguridad que requiere cada vehículo, en m. Se presenta el valor de C en función del ancho de la calzada.

F_A: Avance del voladizo delantero del vehículo sobre el carril adyacente cuando describe la trayectoria de la curva, m.

Z: Sobreancho adicional de seguridad, que depende de la curvatura y de la Velocidad Específica de la curva horizontal (VCH) y cuyo propósito es facilitar la conducción sobre la curva, en m. Este valor es experimental.

El valor del ancho de seguridad lateral C, también esta adoptado por el INVIAS tal cual lo dispone la AASHTO.

ANCHO DE CALZADA EN TANGENTE (AT), m			
	6.00	6.60	7.20
C(m)	0.60	0.75	0.90

Tabla 7. *Ancho de calzada para valores de C*
Fuente: *Manual de diseño geométrico de carreteras (2008)*

El ancho ocupado por el vehículo cuando está describiendo la trayectoria en la curva (U) se determina con la siguiente formula según la AASHTO:

$$U = u + Rc - \sqrt{Rc^2 - \sum_{i=1}^{n} L_i^2}$$

Ecuación 5. *U según AASHTO*

Donde:

u: Ancho del vehículo en tangente, en m.

Rc: Radio de la curva, en m.

L_i: Dimensiones del vehículo, en m.

Mientras que el INVIAS presenta una variación en la misma lo cual infiere en un cambio del valor de U:

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

Ecuación 6. *U según INVIAS*

El avance del voladizo delantero del vehículo sobre el carril adyacente, cuando está describiendo la trayectoria curva, se determina con la siguiente ecuación:

$$\text{Fa} = \sqrt{Rc^2 + A * (2L1 + A)} - Rc$$

Ecuación 7. *F_A AASHTO e INVIAS*

Donde:

R_C: Radio de la curva, en m.

A: Valor del voladizo o saliente delantero del vehículo, en m

L_1: Distancia entre el eje delantero y el eje trasero de la unidad tractora, en m.

$$Z = 0.1 * \frac{V}{\sqrt{Rc}}$$

Ecuación 8. *Sobreancho adicional de Seguridad (Z)*

Donde:

V_{CH}: Velocidad Específica de la curva, en km/h.

R_C: Radio de la curva, en m.

Analizando las dos normativas se puede apreciar que el INVIAS no dispone de estudios que identifiquen las necesidades del país, y a su vez precisa una formula sencilla para el cálculo del sobreancho en vías terciarias en donde no reconoce vehículos con distancias entre ejes diferentes, además las plantillas de giro que presenta el manual, no especifican las condiciones de vía optimas por las cuales deben transitar los vehículos.

La guía de diseño urbano de Bogotá establece el cálculo del sobreancho de igual manera que lo asume la AASHTO y como lo calcula el INVIAS para los vehículos articulados, como la diferencia entre el ancho usado en curva y el ancho usado en recta, y tomando las mismas ecuaciones anteriormente descritas, ya que las vías de la ciudad son o primarias o secundarias.

Para realizar la investigación del presente proyecto se hace uso del software Civil 3D el cual sirve para el cálculo y diseño de infraestructuras diversas, principalmente relacionada con el movimiento de tierras, topografía y redes de tuberías, el cual proporciona características integradas para mejorar los bocetos, el diseño y la documentación de construcción. Dentro de sus principales funciones esta la generación de superficies de terreno, corredores, perfiles longitudinales, secciones transversales, funciones de análisis geoespacial, entre muchos otros ya que permite la automatización y optimización de tareas con grandes flujos de trabajo.

Para realizar las simulaciones se hace uso de Autodesk Vehicle Tracking, extensión para CIVIL 3D, es un software de completa solución de análisis y de diseño de transporte, análisis de ruta y trayectorias de vehículos. "*El software permite a los profesionales, diseñadores y planificadores modelar las trayectorias y evaluar los movimientos de los vehículos a emplear en diseños geométricos de vías entre otras funcionalidades, a partir de las dimensiones que estos tengan"*[19], permite realizar revisiones al diseño de nuestros caminos, de acuerdo con el tipo de vehículo, comportamiento de la simulación y animaciones de las trayectorias, ya que al ir realizando la simulación y ubicando la parte delantera del vehículo, permite ver el comportamiento de los ejes traseros. La ventaja de estos softwares es la obtención de sobreanchos parcialmente desarrollados que no se pueden obtener con ecuaciones simples.[20]

El software maneja configuración norteamericana, por tal razón, cuenta con una librería de vehículos basada en diversas normativas a nivel mundial, además la herramienta permite la creación de vehículos de acuerdo a las necesidades a partir de las dimensiones requerida, numero

[19] Modulo knowledge.autodesk.com

[20] HARWOOD, D. W., POTTS, I. B., TORBIC, D. J., & GLAUZ, W. D. Commercial Truck and Bus Safety. Washington, D.C.: Transportation Research Board.2003. p. 2-8

de ejes y características. Posteriormente se generan las plantillas correspondientes al estudio que se va a realizar y se procede a calcular lo necesario.

5.2 Marco Legal

Se consideran las siguientes normativas para el desarrollo de problema de estudio:

- Manual de Diseño Geométrico de Carreteras 2008. – Instituto Nacional de Vías
- A Policy on Geometric Design of Highways and Streets - American Association of State Highway and Transportation Officials 2018

6. Formulación de la hipótesis

En la actualidad las diferentes normativas al realizar el cálculo del valor del sobreancho con sus fórmulas establecidas, solo tienen en cuenta, con respecto a las características de la vía, el radio y la velocidad, mientras que en la normativa nacional INVIAS[21] lo anterior solo aplica en vehículos articulados, en el caso de vehículos rígidos únicamente se utiliza el valor del radio, despreciando en ambos casos el ángulo de deflexión, lo que significa que no hay variación del valor del sobreancho para un mismo radio de curvatura y velocidad, a diferentes valores de deflexión.

El ángulo de deflexión, junto con el radio de curvatura y la velocidad tienen incidencia directa en la determinación del valor de sobreancho (U y F_A), generando una variación de este cálculo entre los ángulos de deflexión de 10° a 180° para un mismo radio de curvatura y velocidad especifica. La hipótesis se verificará con los valores obtenidos para el sobreancho (U y F_A), en la medición de datos hecha a partir de simulaciones realizadas con la herramienta Vehicle Tracking del software Civil 3D, para los diferentes valores de radio y deflexión en cada una de las velocidades estudiadas.

[21] INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS (INVIAS). Manual de Diseño Geométrico de Carreteras. Bogotá: INVIAS, 2008 P74-75

7. Metodología

La metodología descrita en la ilustración 9 está dirigida a determinar los valores óptimos de las variables U y F_A, necesarias en el cálculo del sobreancho para vías con características específicas.

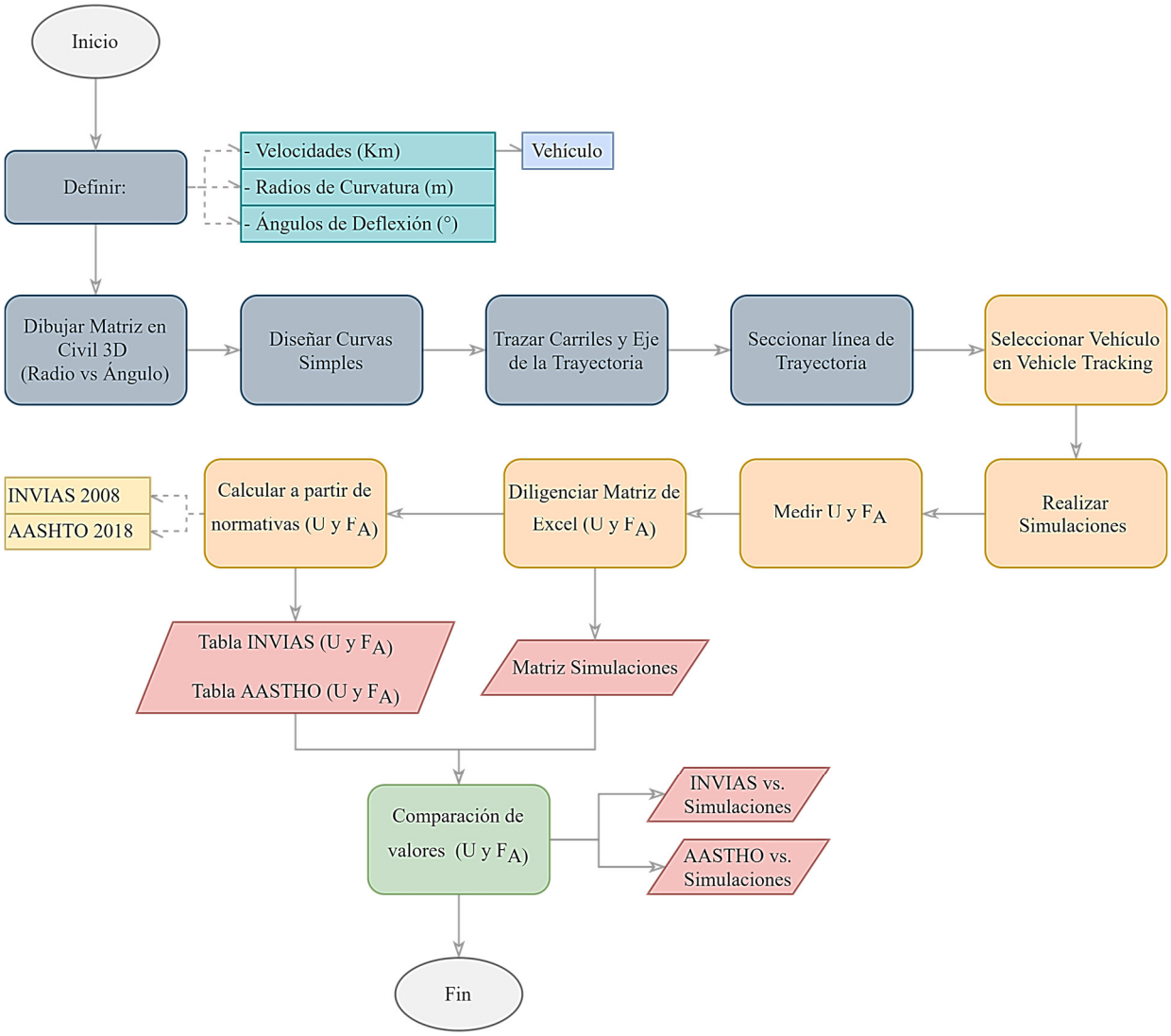
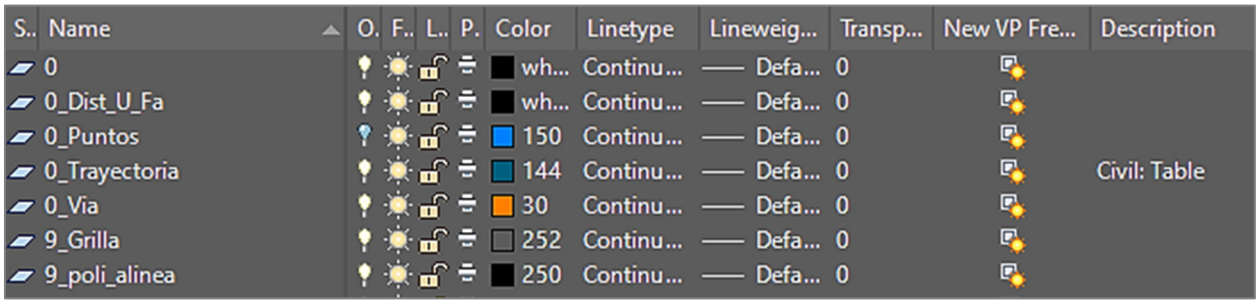


Ilustración 9. *Diagrama de Procesos*
Fuente: *Elaboración Propia*

7.1 Preliminares

Como primera medida se definen las características de las vías a evaluar, tales como velocidades de 20km/h, 30km/h y 40km/h, radios de curvatura de 20m a 55m de 5 en 5, de 60m a 250m de 10 en 10, de 300m a 1000m de 100 en 100, de 1000m a 3000m de 500 en 500, ángulos de deflexión de 10° a 180° de 10 en 10, el valor de ancho de carril para cada velocidad siendo de 3 m para 20km/h y 30km/h, y de 3 y 3.3 m para 40km/h. Se disponen estos rangos de curvatura y ángulos de deflexión porque permiten identificar los cambios más significativos de las variables. La normativa indica que el vehículo más grande que puede transitar por estas vías es el vehículo rígido Bus grande, por lo tanto, este será con el cual se realizará el estudio.

En el software Civil 3D se establecen los Layers necesarios para desarrollar satisfactoriamente las etapas de proceso, cada uno con su respectiva simbología. Adicional a los que se indican a continuación, durante la creación de curvas y simulaciones, se generaran nuevos automáticamente.



S..	Name	O.	F..	L..	P.	Color	Linetype	Lineweig...	Transp...	New VP Fre...	Description
	0					wh...	Continu...	Defa...	0		
	0_Dist_U_Fa					wh...	Continu...	Defa...	0		
	0_Puntos					150	Continu...	Defa...	0		
	0_Trayectoria					144	Continu...	Defa...	0		Civil: Table
	0_Via					30	Continu...	Defa...	0		
	9_Grilla					252	Continu...	Defa...	0		
	9_poli_alinea					250	Continu...	Defa...	0		

Ilustración 10. *Layers*
Fuente: *Elaboración Propia Extraído de Civil 3D*

7.1.1 Matriz en civil 3D.

Inicialmente se diseña una retícula para cada velocidad con el ancho de carril correspondiente, en la que se disponen los radios anteriormente mencionados versus las deflexiones definidas.

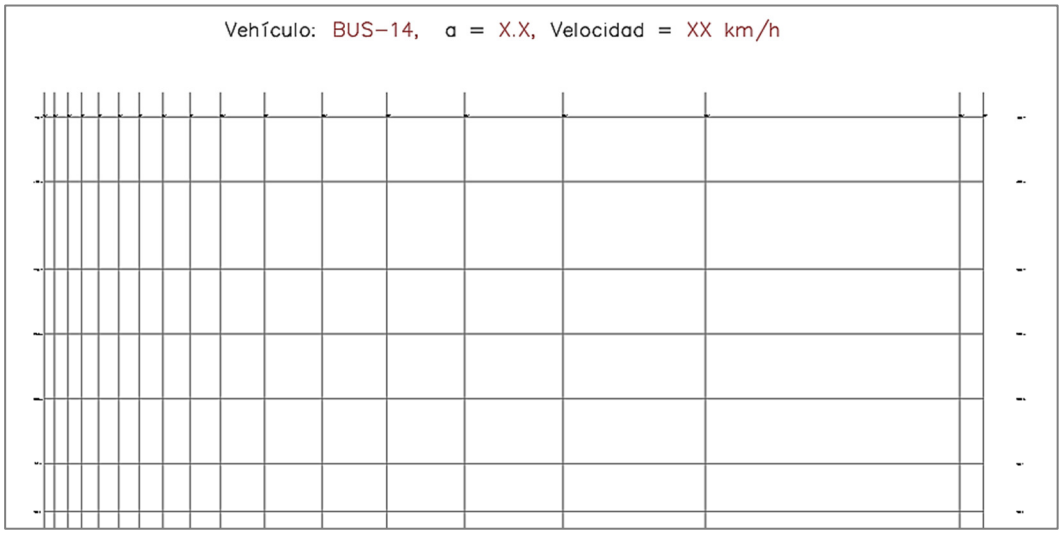


Ilustración 11. *Matriz Radio Vs. Deflexión*
Fuente: *Elaboración Propia*

Específicamente aumentando el valor de la deflexión hacia la derecha y disminuyendo el radio hacia abajo.

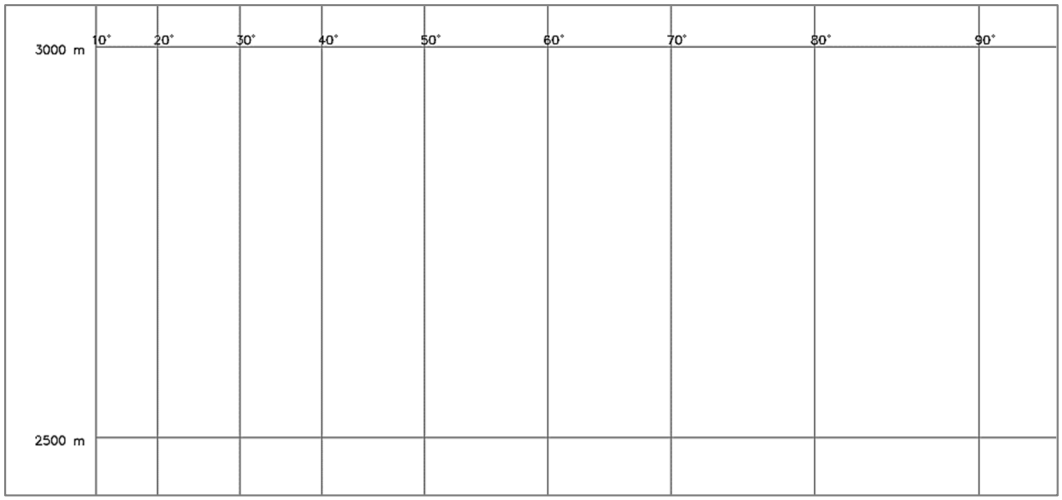


Ilustración 12. *Orden Matriz*
Fuente: *Elaboración Propia*

7.1.2 Diseño curvas.

A continuación, se realiza el diseño para cada vía en Civil 3D con los radios de curvatura y deflexiones específicas, para el presente estudio se precisó el uso de Curvas Circulares Simples debido a que el sobreancho se mide en la parte circular, y aunque en los empalmes Espiral–Circulo–Espiral cuentan con parte circular, en deflexiones mínimas con radios pequeños se debe colocar una espiral arbitraria fuera de norma para hacer cumplir el radio, sin embargo no cumpliría con los parámetros, de esta manera se convertirían en empalmes Espiral-Espiral.

Inicialmente se diseña la poligonal guía para realizar el alineamiento, compuesta por la tangente de entrada y la tangente de salida las cuales deben cumplir con el ángulo de deflexión correspondiente a la columna donde estén ubicadas. Posteriormente se crea el alineamiento con base en dicha poligonal, teniendo en cuenta los parámetros de diseño establecidos como la velocidad de estudio y seleccionando la normativa AASHTO, luego se inserta la curva simple con el radio respectivo, finalmente al alineamiento se le adicionan los Labels de puntos de geometría los cuales permiten identificar el inicio y fin de la curva. De esta manera se realiza el diseño de todas las curvas en la matriz.

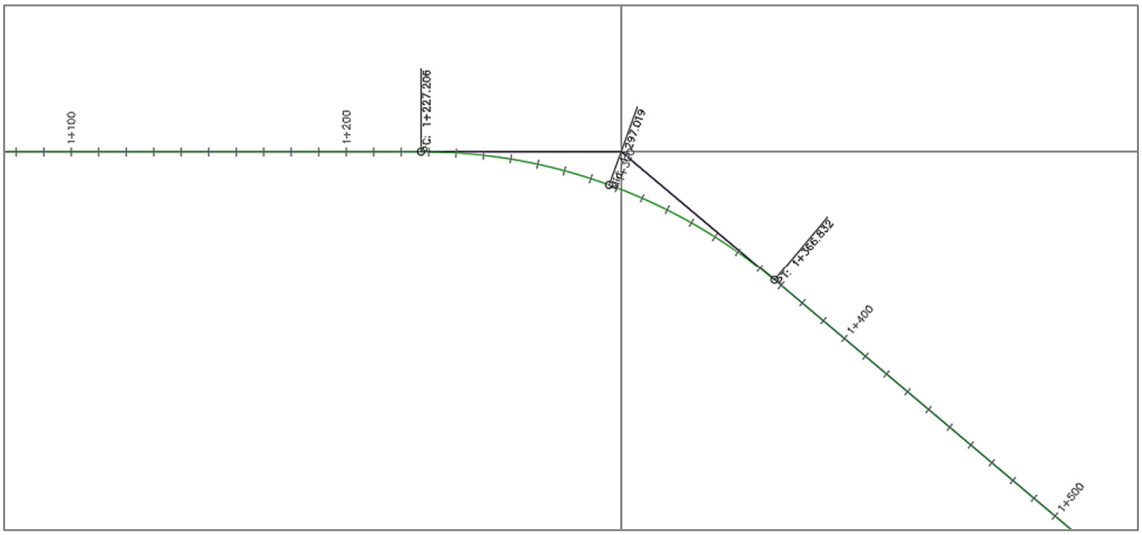


Ilustración 13. *Diseño Alineamientos- Curva Radio 200m con Deflexión 40°*
Fuente: *Elaboración Propia*

Trazar carriles, línea de Trayectoria y seccionamiento

A cada alineamiento diseñado se le generan los carriles con el ancho correspondiente a la velocidad, en este caso los bordes de vía se generan como una entidad de AutoCAD.

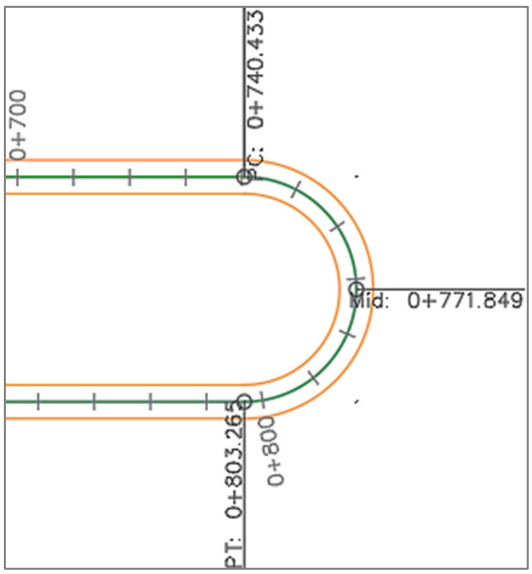


Ilustración 14. *Ancho de Carril 3 m-Curva Radio de 20 m; Deflexión 180*
Fuente: *Elaboración Propia*

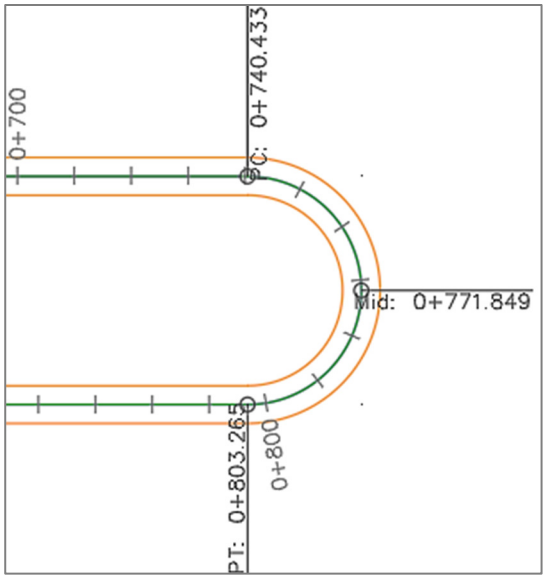


Ilustración 15. *Ancho de Carril 3.3m-Curva Radio de 20 m; Deflexión 180*
Fuente: *Elaboración Propia*

Se crea el eje de la trayectoria para el vehículo, a 1.5 o 1.65 m del eje principal en el carril derecho, según corresponda, el cual se secciona cada 10 m indicando los puntos obligatorios de paso dentro de la parte circular de la vía.

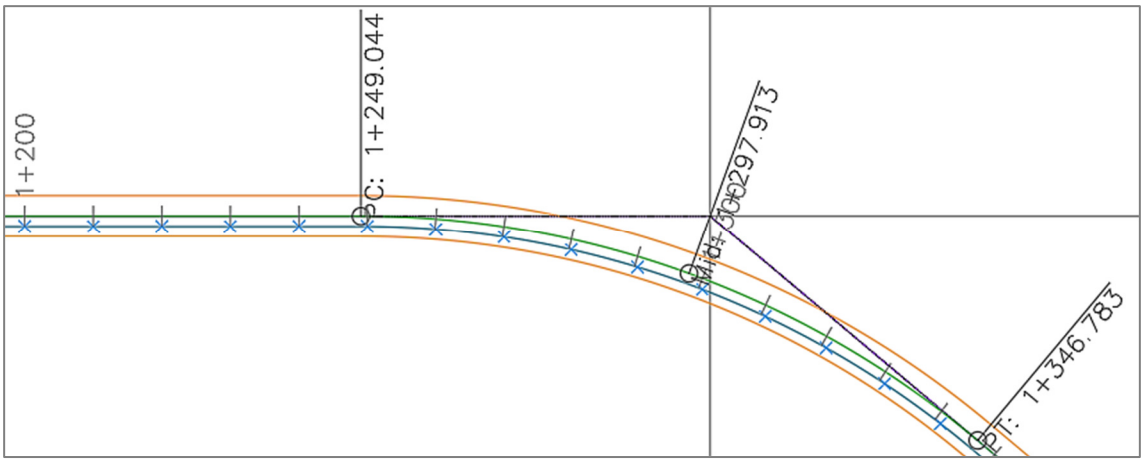


Ilustración 16. *Eje de Trayectoria seccionado cada 10 m-Curva Radio140m; Deflexión 40°*
Fuente: *Elaboración Propia*

7.2 Simulaciones

7.2.1 Selección de vehículo en Civil 3D

Por lo que se refiere a la selección del vehículo, Civil 3D maneja una librería basada en la normativa AASHTO, la cual cuenta con un catálogo de modelos extranjeros. Para las simulaciones de giro del presente proyecto se elige el BUS 14, equivalente al vehículo rígido de la normativa Colombiana INVIAS.

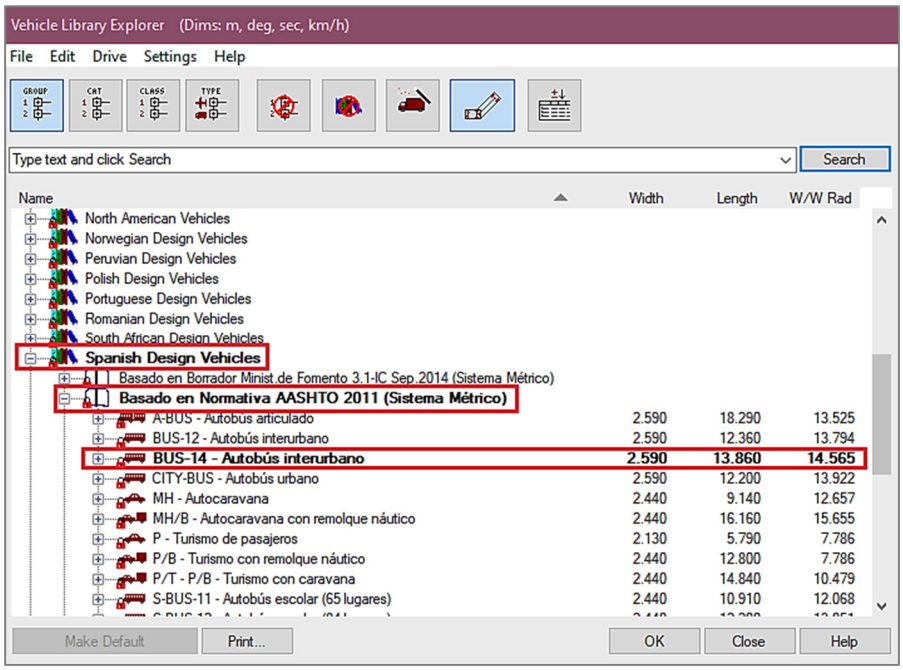


Ilustración 17. *Librería de Vehicle Tracking*
Fuente: *Extraído de Civil 3D – Vehicle Tracking*

Los diseños de vehículo rígido Bus Grande y BUS 14, evidencian sus dimensiones en la ilustración 18 y la ilustración 19, respectivamente, permitiendo inferir la cercana equivalencia en medidas, lo que satisface las necesidades requeridas en cuanto a selección del vehículo para el desarrollo del estudio. Aunque según la norma americana AASHTO el vehículo que tendría las dimensionas semejantes sería el BUS 12, un poco más pequeñas que el Bus Grande, el BUS 14 permite analizar las condiciones críticas de la geometría y movilidad, desarrollando un mejor estudio para la simulación de condiciones cercanas a la realidad.

Vehículo Bus Grande Normativa INVIAS

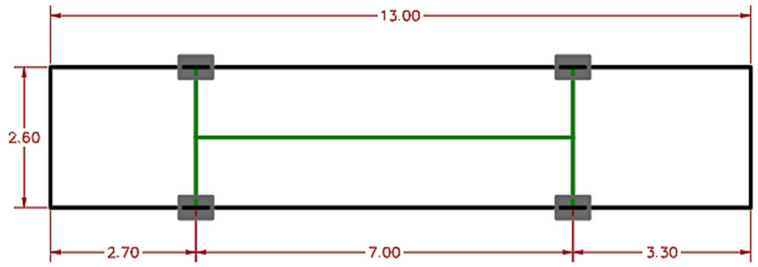


Ilustración 18. *Bus Grande*
Fuente: *Elaboración Propia*

Vehículo		BUS GRANDE
Medidas Vehículo Rígido (m)	**a**	7.00
	b	2.70
	d	3.30
	e	2.60
	L	9.70

Tabla 8. *Dimensiones vehículo Bus Grande*
Fuente: *Elaboración Propia adaptado del INVIAS*

Vehículo BUS 14 Normativa AASHTO (Vehicle Tracking)

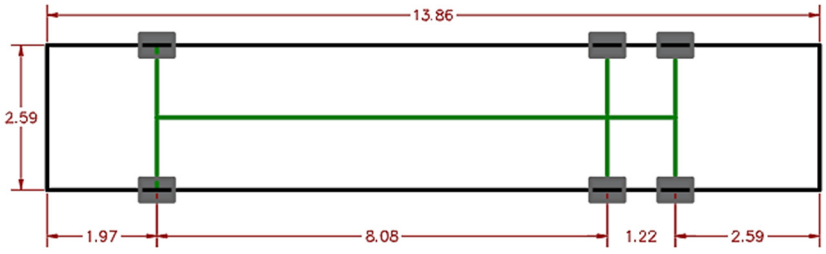


Ilustración 19. *BUS 14*
Fuente: *Elaboración Propia*

Vehículo		BUS-14
Medidas Vehículo Rígido (m)	**L**	8.69
	A	1.97
	b	3.20
	u	2.59

Tabla 9. *Dimensiones vehículo BUS14*
Fuente: *Elaboración Propia adaptado del INVIAS*

7.2.2 Simulaciones

Se selecciona la herramienta "AutoDrive Arc" perteneciente al módulo Vehicle Tracking, de la cual emerge una ventana donde se configura la velocidad a la cual va a transitar el vehículo y dar inicio a la simulación.

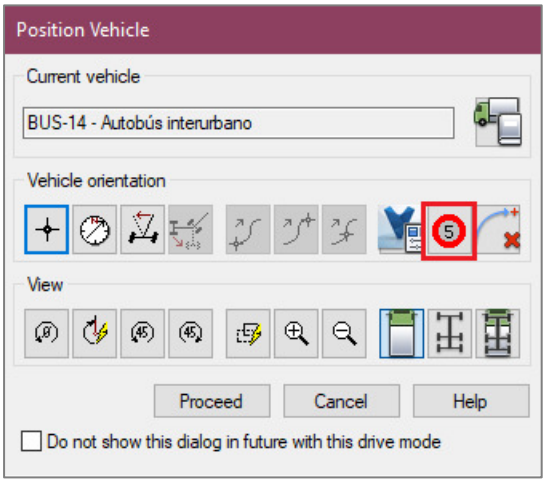


Ilustración 20. *Ventana parámetros iniciales Simulación*
Fuente: *Extraído de Civil 3D – Vehicle Tracking*

La simulación del vehículo inicia la trayectoria en el tramo recto antes del "PC" de la curva, donde el intervalo de puntos obligados del vehículo puede ser mayor a los 10 m ya que en esta zona no se presenta desviación, mientras que, en la parte circular de la vía, del "PC" hasta "PT", el vehículo no debe sobrepasar una distancia entre puntos de 10 m, debido a que entre mayor sea la distancia mayor será la deformación de la trayectoria de la parte circular, además, generalmente con ese intervalo se diseñan y materializan los proyectos en la vía.

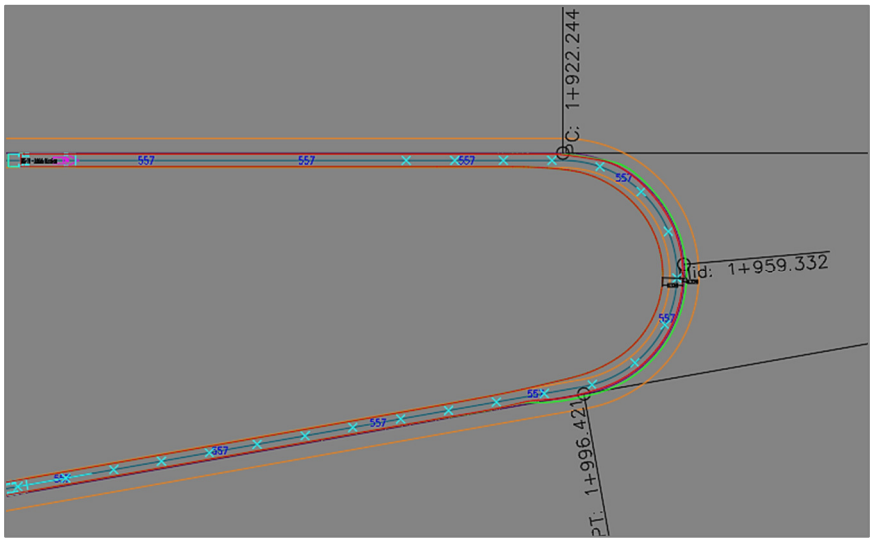


Ilustración 21. *Simulación Velocidad 20 km/h – Curva Radio 25 m; Deflexión 170°*
Fuente: *Elaboración Propia*

7.2.3 Obtención de Valores U y F_A

7.2.3.1. Simulaciones

Las variables a analizar serán U (ancho del vehículo más el sobreancho ocupado por sus ejes al realizar el giro) y F_A (ancho ocupado por el voladizo delantero del vehículo), mas no el sobreancho requerido en la calzada, ya que las trayectorias del vehículo corresponden a los anchos de barrido que se describe en la curva, y no se evidencian los anchos adicionales de seguridad.

Las trayectorias de la simulación se representan como líneas rojas y verdes tal como se aprecia en la ilustración 22, de la siguiente manera:

- La línea verde en la parte izquierda (1) señala la trayectoria del voladizo delantero izquierdo del vehículo.
- La línea roja de la parte izquierda (2) indica la trayectoria de la llanta izquierda delantera.
- La línea roja de la parte derecha (3) marca la trayectoria de las llantas derechas traseras.

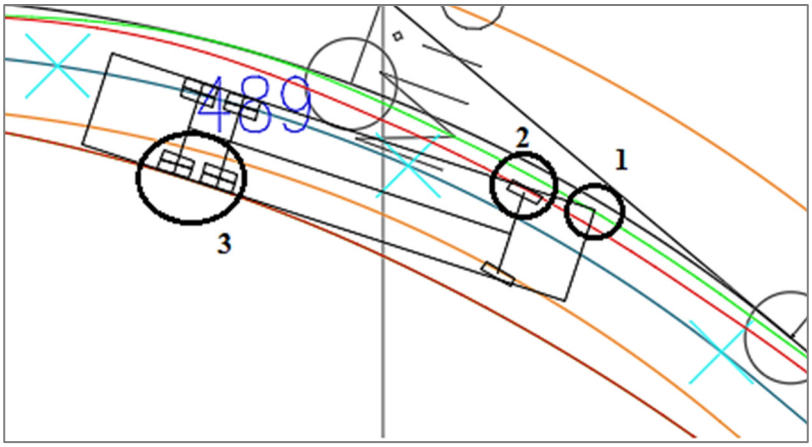


Ilustración 22. *Líneas de Trayectoria – Curva Radio 40m; Deflexión 40° Vel 40km/h a:3m*
Fuente: *Elaboración Propia*

Para hallar los valores de U y F_A, en primer lugar, se traza una línea sobre los puntos la cual debe ser perpendicular a la vía, proyectando dicha línea hacia las líneas de trayectoria, lo que permite medir entre las líneas rojas, siendo este el valor U y entre la línea verde y roja de la parte izquierda el valor F_A, por cada curva se realizan tres tomas de medidas seleccionando los valores donde la sumatoria de ambas variables es mayor.

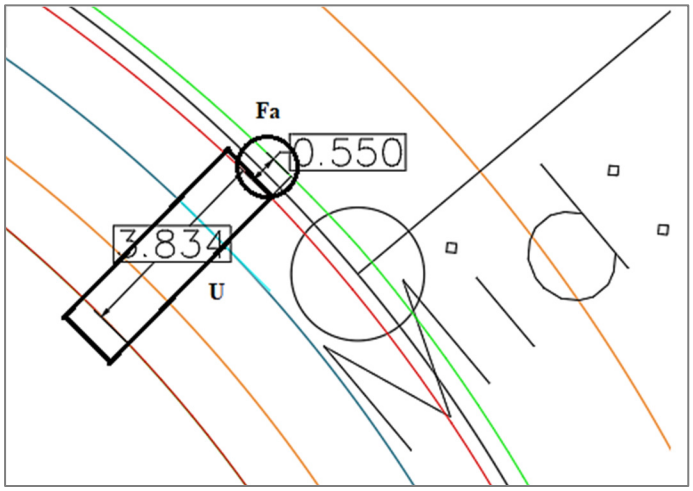


Ilustración 23. *Medida Valores U y F_A – Curva Radio 30m; deflexión 100° Vel 20km/h*
Fuente: *Elaboración Propia*

Las matrices de simulación junto con sus respectivas medidas en cada curva, se encuentra en:

- **Anexo 1.** Modelaciones Vel 20-3.dwg
- **Anexo 5.** Modelaciones Vel 30-3.dwg
- **Anexo 9.** Modelaciones Vel 40-3.dwg
- **Anexo 13.** Modelaciones Vel 40-3.3.dwg

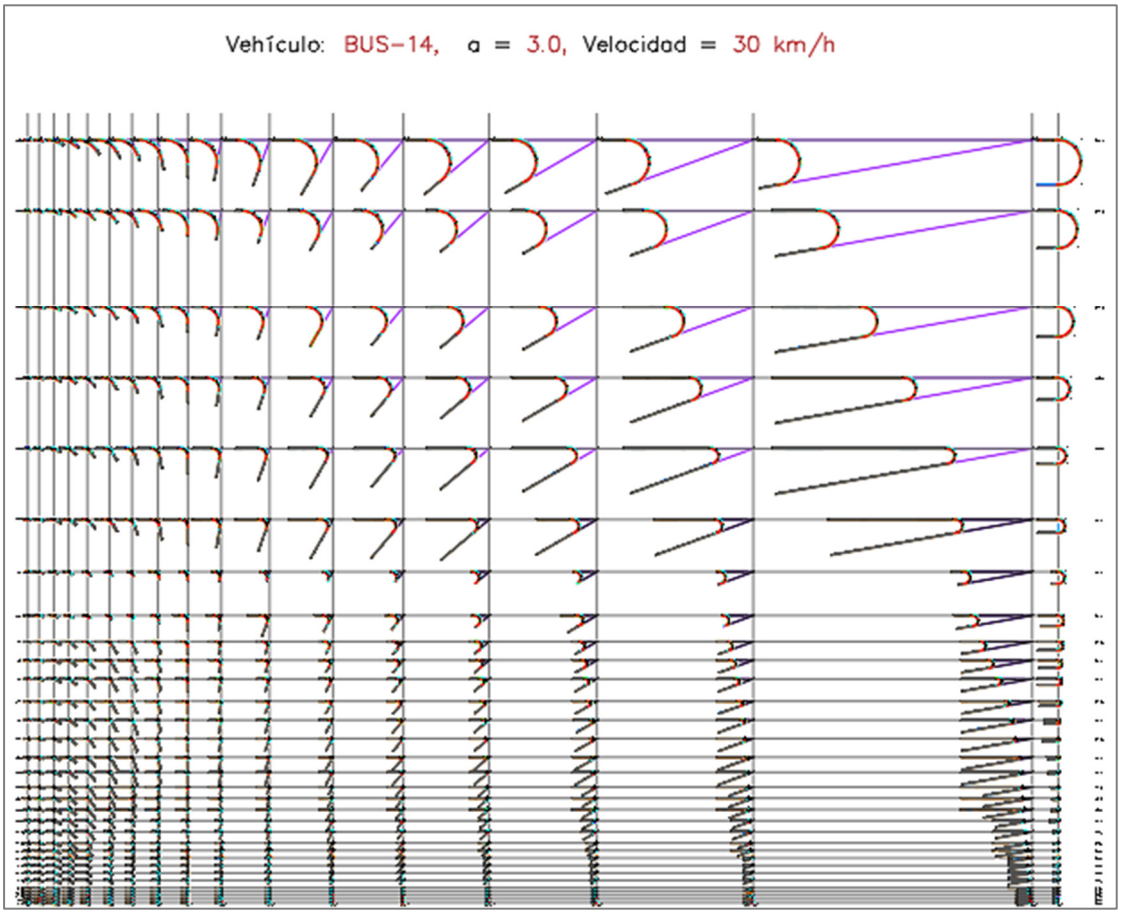


Ilustración 24. *Anexo 5. Matriz de Simulaciones- Modelaciones Vel 30km/h a:3m*
Fuente: *Elaboración Propia*

7.2.3.2. Normativas INVIAS y AASHTO

Simultáneamente con las fórmulas dadas por la normativa americana AASHTO y la colombiana INVIAS se realizan los cálculos respectivos para obtener el valor de las variables U y F_A.

AASHTO

Para el cálculo de las variables U y F_A, la norma americana maneja las siguientes formulas:

$$U = u + Rc - \sqrt{Rc^2 - \sum_{i=1}^{n} L_i^2}$$

Ecuación 9. *Cálculo U AASHTO*

$$\text{Fa} = \sqrt{Rc^2 + A * (2L1 + A)} - Rc$$

Ecuación 10. *Cálculo F_A AASHTO*

INVIAS

Para el cálculo del sobreancho en vías donde el vehículo más grande que transita es el rígido "Bus grande" la normativa INVIAS no considera dichas variables en el cálculo.

Aunque para la velocidad de 40 km/h con un ancho de carril de 3.3 m, la norma indica que se debe realizar el cálculo del sobreancho con la fórmula para vehículos articulados, la cual tiene en cuenta las variables U y F_A.

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

Ecuación 11. *Cálculo U INVIAS*

$$\text{Fa} = \sqrt{Rc^2 + A * (2L1 + A)} - Rc$$

Ecuación 12. *Cálculo F_A INVIAS*

8. Resultados

Mediante la obtención de los valores, se generan matrices para cada velocidad y ancho de carril en las cuales los datos están clasificados por radio de curvatura y ángulo de deflexión.

Además, tanto resultados de medidas, cálculos de variables según las normativas, y matrices de comparación, se encuentran en las hojas de cálculo dispuestas en los anexos del presente trabajo.

- **Anexo 2.** Matriz valores vel 20-3.xlsx
- **Anexo 6.** Matriz valores vel 30-3.xlsx
- **Anexo 10.** Matriz valores vel 40-3.xlsx
- **Anexo 14.** Matriz valores vel 40-3.3.xlsx

8.1 U y F_A

Luego de medir los valores de U y F_A de todas las simulaciones realizadas se obtienen 4 matrices de Excel correspondientes a cada velocidad, por otro lado, se tiene el cálculo de los mismos mediante las fórmulas de las normativas con los cuales se realiza la comparación.

En los anexos que se mencionan a continuación, muestran las matrices con las variables de Fa y U para la velocidad de 20 km/h con un ancho de carril de 3 m, la velocidad de 30 km/h con un ancho de carril de 3 m, la velocidad de 40 km/h con un ancho de carril de 3 m, la velocidad de 40 km/h con un ancho de carril de 3.3 m, respectivamente.

- **Anexo 3**. Medidas U y F_A Simuladas – Vel 20-3.png
- **Anexo 7**. Medidas U y F_A Simuladas – Vel 30-3.png
- **Anexo 11**. Medidas U y F_A Simuladas – Vel 40-3.png
- **Anexo 15**. Medidas U y F_A Simuladas – Vel 40-3.3.png

Simulaciones - Medidas Fa y U para Vel 20 km/h a=3.0m																																		
Rc \ Δ	10		20		30		40		50		60		70		80		90		100		110		120		130		140		150		160		170		180	
	F_A	U	F_A	U	F_A	U	F_A	U	F_A	U	F_A	U	F_A	U	F_A	U	F_A	U	F_A	U	F_A	U	F_A	U	F_A	U	F_A	U	F_A	U	F_A	U	F_A	U	F_A	U
3000	0.006	2.603	0.006	2.603	0.006	2.602	0.007	2.602	0.007	2.603	0.006	2.603	0.008	2.602	0.007	2.602	0.006	2.602	0.006	2.602	0.006	2.602	0.006	2.603	0.007	2.602	0.006	2.604	0.007	2.602	0.006	2.602	0.006	2.603
2500	0.007	2.606	0.008	2.605	0.008	2.604	0.007	2.605	0.008	2.605	0.007	2.605	0.007	2.605	0.008	2.605	0.008	2.605	0.007	2.605	0.008	2.605	0.008	2.604	0.008	2.605	0.008	2.605	0.008	2.605	0.007	2.605	0.008	2.605
2000	0.014	2.612	0.008	2.610	0.009	2.609	0.009	2.608	0.009	2.609	0.009	2.609	0.010	2.608	0.010	2.609	0.009	2.609	0.009	2.608	0.010	2.609	0.010	2.608	0.009	2.609	0.009	2.608	0.009	2.609	0.009	2.609	0.010	2.608
1500	0.012	2.632	0.013	2.614	0.012	2.616	0.013	2.615	0.013	2.615	0.013	2.615	0.012	2.615	0.013	2.615	0.013	2.615	0.013	2.615	0.013	2.614	0.013	2.615	0.012	2.615	0.012	2.615	0.013	2.615	0.012	2.615	0.013	2.615
1000	0.019	2.627	0.019	2.628	0.019	2.628	0.019	2.627	0.019	2.628	0.019	2.628	0.019	2.627	0.019	2.628	0.019	2.627	0.018	2.627	0.018	2.628	0.019	2.628	0.019	2.628	0.019	2.627	0.019	2.628	0.018	2.628	0.019	2.627
900	0.021	2.632	0.022	2.632	0.022	2.632	0.021	2.632	0.021	2.632	0.021	2.632	0.021	2.631	0.021	2.632	0.021	2.632	0.022	2.631	0.021	2.632	0.021	2.632	0.021	2.632	0.020	2.632	0.024	2.638	0.023	2.637	0.025	2.637
800	0.024	2.637	0.024	2.637	0.024	2.637	0.025	2.637	0.024	2.637	0.024	2.637	0.023	2.637	0.024	2.637	0.025	2.636	0.024	2.637	0.024	2.637	0.024	2.637	0.025	2.637	0.024	2.637	0.023	2.637	0.024	2.636	0.023	2.638
700	0.027	2.643	0.028	2.644	0.027	2.644	0.027	2.644	0.026	2.644	0.027	2.644	0.028	2.644	0.028	2.644	0.028	2.643	0.027	2.645	0.027	2.644	0.027	2.644	0.027	2.644	0.027	2.643	0.027	2.644	0.027	2.644	0.027	2.644
600	0.032	2.651	0.032	2.653	0.031	2.653	0.032	2.652	0.031	2.652	0.032	2.653	0.031	2.653	0.031	2.653	0.032	2.653	0.032	2.652	0.032	2.652	0.032	2.653	0.032	2.652	0.032	2.653	0.031	2.653	0.032	2.653	0.032	2.653
500	0.033	2.662	0.038	2.665	0.038	2.666	0.038	2.666	0.038	2.666	0.038	2.665	0.038	2.665	0.038	2.666	0.039	2.665	0.038	2.666	0.038	2.666	0.038	2.665	0.038	2.665	0.038	2.665	0.038	2.665	0.038	2.665	0.038	2.665
400	0.041	2.681	0.047	2.683	0.048	2.684	0.046	2.685	0.048	2.684	0.048	2.684	0.047	2.685	0.048	2.684	0.048	2.683	0.047	2.685	0.048	2.685	0.048	2.685	0.048	2.685	0.047	2.684	0.047	2.684	0.047	2.685	0.048	2.684
300	0.056	2.711	0.061	2.714	0.063	2.716	0.063	2.715	0.063	2.716	0.064	2.715	0.063	2.716	0.064	2.714	0.064	2.716	0.064	2.716	0.064	2.716	0.064	2.716	0.064	2.715	0.064	2.715	0.063	2.715	0.063	2.716	0.064	2.715
250	0.060	2.730	0.074	2.739	0.076	2.740	0.076	2.740	0.076	2.743	0.076	2.740	0.076	2.742	0.076	2.741	0.076	2.741	0.076	2.740	0.076	2.740	0.076	2.741	0.076	2.741	0.076	2.740	0.077	2.740	0.076	2.741	0.076	2.740
200	0.090	2.769	0.095	2.779	0.095	2.778	0.096	2.778	0.095	2.778	0.095	2.778	0.095	2.778	0.096	2.778	0.095	2.778	0.095	2.778	0.096	2.779	0.095	2.779	0.095	2.778	0.095	2.778	0.095	2.779	0.095	2.779	0.095	2.778
150	0.111	2.786	0.124	2.841	0.128	2.841	0.126	2.842	0.128	2.841	0.127	2.842	0.127	2.843	0.128	2.842	0.128	2.841	0.128	2.841	0.127	2.842	0.128	2.840	0.127	2.841	0.128	2.841	0.127	2.842	0.128	2.841	0.127	2.842
140	0.117	2.787	0.132	2.858	0.136	2.859	0.137	2.859	0.135	2.860	0.135	2.860	0.135	2.860	0.136	2.860	0.136	2.859	0.136	2.858	0.137	2.859	0.137	2.859	0.136	2.860	0.135	2.860	0.136	2.859	0.135	2.860	0.136	2.860
130	0.124	2.787	0.141	2.878	0.146	2.881	0.146	2.880	0.146	2.879	0.146	2.880	0.147	2.880	0.147	2.880	0.147	2.881	0.146	2.880	0.146	2.881	0.147	2.880	0.146	2.881	0.146	2.881	0.146	2.881	0.146	2.881	0.146	2.881
120	0.067	2.852	0.151	2.901	0.156	2.903	0.159	2.904	0.159	2.904	0.158	2.904	0.158	2.904	0.158	2.905	0.158	2.905	0.160	2.904	0.158	2.905	0.158	2.904	0.158	2.904	0.158	2.906	0.158	2.904	0.158	2.906	0.158	2.905
110	0.062	2.869	0.163	2.926	0.156	2.904	0.172	2.934	0.173	2.934	0.173	2.932	0.173	2.934	0.173	2.933	0.173	2.933	0.174	2.933	0.173	2.934	0.173	2.934	0.173	2.933	0.175	2.934	0.172	2.934	0.173	2.933	0.172	2.934
100	0.056	2.884	0.179	2.946	0.187	2.966	0.190	2.968	0.191	2.968	0.191	2.969	0.191	2.968	0.191	2.963	0.190	2.968	0.191	2.968	0.191	2.969	0.190	2.968	0.191	2.968	0.190	2.968	0.191	2.968	0.190	2.969	0.191	2.968
90	0.050	2.902	0.194	2.963	0.206	3.007	0.209	3.010	0.213	3.010	0.212	3.011	0.212	3.010	0.211	3.010	0.212	3.010	0.212	3.011	0.212	3.010	0.212	3.010	0.212	3.010	0.212	3.010	0.212	3.011	0.212	3.011	0.212	3.011
80	0.044	2.919	0.212	2.971	0.227	3.057	0.235	3.062	0.237	3.063	0.238	3.064	0.237	3.062	0.238	3.064	0.238	3.064	0.238	3.064	0.238	3.063	0.238	3.064	0.237	3.064	0.238	3.064	0.239	3.063	0.239	3.063	0.237	3.063
70	0.040	2.933	0.235	3.074	0.255	3.106	0.265	3.129	0.269	3.131	0.271	3.132	0.271	3.132	0.271	3.130	0.274	3.131	0.271	3.132	0.271	3.131	0.273	3.131	0.272	3.132	0.271	3.133	0.271	3.132	0.271	3.133	0.271	3.132
60	0.033	2.949	0.142	3.115	0.250	3.167	0.305	3.208	0.312	3.221	0.314	3.223	0.316	3.225	0.316	3.224	0.317	3.224	0.316	3.225	0.317	3.224	0.316	3.224	0.318	3.224	0.316	3.224	0.317	3.224	0.318	3.224	0.320	3.225
55	0.031	2.955	0.130	3.146	0.311	3.149	0.328	3.239	0.336	3.279	0.342	3.280	0.344	3.280	0.345	3.281	0.345	3.283	0.346	3.283	0.345	3.281	0.345	3.281	0.345	3.283	0.345	3.282	0.346	3.282	0.347	3.283	0.346	3.282
50	0.029	2.964	0.118	3.176	0.333	3.151	0.355	3.258	0.367	3.342	0.375	3.350	0.377	3.350	0.380	3.359	0.380	3.353	0.378	3.354	0.379	3.353	0.378	3.351	0.379	3.354	0.379	3.353	0.378	3.354	0.378	3.354	0.378	3.354
45	0.025	2.971	0.107	3.204	0.249	3.316	0.362	3.371	0.400	3.401	0.411	3.428	0.414	3.436	0.419	3.438	0.420	3.439	0.419	3.441	0.419	3.441	0.420	3.440	0.420	3.441	0.420	3.439	0.421	3.440	0.421	3.439	0.424	3.441
40	0.022	2.978	0.095	3.232	0.231	3.381	0.390	3.451	0.420	3.489	0.456	3.489	0.460	3.544	0.467	3.549	0.473	3.550	0.472	3.550	0.472	3.549	0.473	3.551	0.471	3.552	0.471	3.552	0.473	3.549	0.476	3.550	0.477	3.549
35	0.020	2.985	0.083	3.258	0.202	3.446	0.411	3.550	0.481	3.594	0.474	3.640	0.474	3.646	0.513	3.671	0.535	3.690	0.538	3.692	0.538	3.668	0.539	3.693	0.540	3.694	0.541	3.695	0.541	3.694	0.541	3.694	0.541	3.696
30	0.020	2.996					0.440	3.660	0.540	3.724	0.587	3.780	0.582	3.785	0.555	3.843	0.613	3.845	0.620	3.837	0.619	3.881	0.623	3.885	0.626	3.887	0.628	3.887	0.626	3.887	0.627	3.887	0.630	3.888
25	0.015	2.998					0.375	3.778	0.569	3.889	0.719	3.952	0.712	3.954	0.668	4.069	0.645	4.097	0.674	4.122	0.725	4.145	0.671	4.125	0.710	4.138	0.736	4.154	0.730	4.149	0.736	4.156	0.736	4.156
20	0.012	3.005							0.518	4.089	0.861	4.168	0.737	4.233					0.796	4.496	0.890	4.514	0.823	4.577	0.867	4.569	0.931	4.579			0.877	4.570	0.889	4.575

Ilustración 25. *Anexo 3. Medidas U y F_A Simuladas – Vel20km/h, a:3m*
Fuente: *Elaboración Propia*

En las tablas de medidas las celdas que se encuentran en rojo, corresponden a valores, los cuales, debido al comportamiento de la trayectoria evidenciada en la simulación, no representan correctamente el desplazamiento del vehículo, aun cuando la velocidad evaluada según la tabla 5 de radios mínimos indique que es posible diseñar el sobreancho, por lo tanto, no se pueden hallar los valores de U y F_A para estos. Sin embargo, se puede evidenciar que, en algunos radios que no cumplen por norma, en ciertas deflexiones, la trayectoria es uniforme y permite medir las variables.

En cuanto a la normativa, para las velocidades de 20 km/h, 30 km/h y 40 km/h, todos con un ancho de carril de 3 m, el INVIAS no cuenta con una fórmula para calcular dichas variables, mientras que, para la normativa AASHTO todos los sobreanchos son calculados con la misma fórmula, en la cual se deben determinar U y F_A, de esta manera se genera una sola tabla para los valores (Tabla 10), ya que están en función del radio de curvatura y no presentan diferencias en sus cálculos para distintas velocidades.

RC (m)	AASHTO	
	F_A (m)	U (m)
3000	0.006	2.603
2500	0.008	2.605
2000	0.010	2.609
1500	0.013	2.615
1000	0.019	2.628
900	0.021	2.632
800	0.024	2.637
700	0.027	2.644
600	0.032	2.653
500	0.038	2.666
400	0.048	2.684
300	0.064	2.716
250	0.076	2.741
200	0.095	2.779
150	0.127	2.842
140	0.136	2.860
130	0.147	2.881
120	0.159	2.905
110	0.173	2.934
100	0.190	2.968
90	0.212	3.011
80	0.238	3.063
70	0.272	3.131
60	0.317	3.223
55	0.345	3.281
50	0.380	3.351
45	0.422	3.437
40	0.474	3.545
35	0.540	3.686
30	0.629	3.876
25	0.751	4.149
20	0.931	4.577

Tabla 10. *Calculo U y F_A – AASHTO- Vel (20,30,40) km/h; a:3m*
Fuente: *Elaboración Propia*

Para la velocidad de 40 km/h con un ancho de carril de 3.3 m el INVIAS considera el cálculo del sobreancho con la fórmula para vehículos articulados puesto que, su diseño es de una vía secundaria, aunque en la fórmula de U hay un cambio considerable, para vehículos rígidos no se evidencia variación en los resultados, como se muestra en las siguientes tablas (Tabla 11 y Tabla 12), debido a que solo hay un L. Además, se calculan las variables para los radios que según la norma no cumplen ya que, se realizarán posteriores análisis con ellos.

RC (m)	INVIAS	
	F_A (m)	U (m)
3000	0.006	2.603
2500	0.008	2.605
2000	0.010	2.609
1500	0.013	2.615
1000	0.019	2.628
900	0.021	2.632
800	0.024	2.637
700	0.027	2.644
600	0.032	2.653
500	0.038	2.666
400	0.048	2.684
300	0.064	2.716
250	0.076	2.741
200	0.095	2.779
150	0.127	2.842
140	0.136	2.860
130	0.147	2.881
120	0.159	2.905
110	0.173	2.934
100	0.190	2.968
90	0.212	3.011
80	0.238	3.063
70	0.272	3.131
60	0.317	3.223
55	0.345	3.281
50	0.380	3.351
45	0.422	3.437
40	0.474	3.545
35	0.540	3.686
30	0.629	3.876
25	0.751	4.149
20	0.931	4.577

Tabla 11. *Calculo U y F_A – INVIAS- Vel,40 km/h; a:3.3m*
Fuente: *Elaboración Propia*

RC (m)	AASHTO	
	F_A (m)	U (m)
3000	0.006	2.603
2500	0.008	2.605
2000	0.010	2.609
1500	0.013	2.615
1000	0.019	2.628
900	0.021	2.632
800	0.024	2.637
700	0.027	2.644
600	0.032	2.653
500	0.038	2.666
400	0.048	2.684
300	0.064	2.716
250	0.076	2.741
200	0.095	2.779
150	0.127	2.842
140	0.136	2.860
130	0.147	2.881
120	0.159	2.905
110	0.173	2.934
100	0.190	2.968
90	0.212	3.011
80	0.238	3.063
70	0.272	3.131
60	0.317	3.223
55	0.345	3.281
50	0.380	3.351
45	0.422	3.437
40	0.474	3.545
35	0.540	3.686
30	0.629	3.876
25	0.751	4.149
20	0.931	4.577

Tabla 12. *Calculo U y F_A – AASHTO- Vel,40 km/h; a:3.3m*
Fuente: *Elaboración Propia*

Comparación

La comparación de los valores obtenidos se evidencia en los siguientes anexos, dicha comparación está dada por la diferencia de la normativa ASSHTO y las simulaciones. El INVIAS no presenta fórmula para calcular las variables, por lo tanto, solo es posible realizar el análisis de esta normativa en la velocidad de 40 km/h con ancho de carril de 3.3 m.

- **Anexo 4.** Diferencia AASHTO – Simulaciones Vel 20-3.png
- **Anexo 8.** Diferencia AASHTO – Simulaciones Vel 30-3.png
- **Anexo 12.** Diferencia AASHTO – Simulaciones Vel 40-3.png
- **Anexo 16.** Diferencia AASHTO – Simulaciones Vel 40-3.3.png
- **Anexo 17.** Diferencia INVIAS – Simulaciones Vel 40-3.3.png

Diferencia Valores Fa y U (Formula AASTHO - Medidas Simulaciones) para Vel 20 km/h a=3.0 m

Rc \ Δ	10		20		30		40		50		60		70		80		90		100		110		120		130		140		150		160		170		180	
	F_A	U	F_A	U	F_A	U	F_A	U	F_A	U	F_A	U	F_A	U	F_A	U	F_A	U	F_A	U	F_A	U	F_A	U	F_A	U	F_A	U	F_A	U	F_A	U	F_A	U	F_A	U
3000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2500	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1500	0.00	-0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
900	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	-0.01	0.00	-0.01	0.00	0.00
800	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
700	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
600	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
500	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
400	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
300	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
250	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
200	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
150	0.02	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
140	0.02	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
130	0.02	0.09	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
120	0.09	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
110	0.11	0.06	0.01	0.01	0.02	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
100	0.13	0.08	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
90	0.16	0.11	0.02	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
80	0.19	0.14	0.03	0.09	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
70	0.23	0.20	0.04	0.06	0.02	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
60	0.28	0.27	0.17	0.11	0.07	0.06	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
55	0.31	0.33	0.22	0.13	0.03	0.13	0.02	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
50	0.35	0.39	0.26	0.17	0.05	0.20	0.02	0.09	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
45	0.40	0.47	0.31	0.23	0.17	0.12	0.06	0.07	0.02	0.04	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
40	0.45	0.57	0.38	0.31	0.24	0.16	0.08	0.09	0.05	0.06	0.02	0.06	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	-0.01	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
35	0.52	0.70	0.46	0.43	0.34	0.24	0.13	0.14	0.06	0.09	0.07	0.05	0.07	0.04	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.02	0.00	-0.01	0.00	-0.01	0.00	-0.01	0.00	-0.01	0.00	-0.01	0.00	-0.01	0.00	-0.01
30	0.61	0.88					0.19	0.22	0.09	0.15	0.04	0.10	0.05	0.09	0.07	0.03	0.02	0.03	0.01	0.04	0.01	0.00	0.01	-0.01	0.00	-0.01	0.00	-0.01	0.00	-0.01	0.00	-0.01	0.00	-0.01	0.00	-0.01
25	0.74	1.15					0.38	0.37	0.18	0.26	0.03	0.20	0.04	0.19	0.08	0.08	0.11	0.05	0.08	-0.03	0.03	0.00	0.08	0.02	0.04	0.01	0.02	-0.01	0.02	0.00	0.02	-0.01	0.02	-0.01	0.01	-0.01
20	0.92	1.57							0.41	0.49	0.07	0.41	0.19	0.34					0.14	0.08	0.04	0.06	0.11	0.00	0.06	0.01	0.00	0.00			0.05	0.01	0.04	0.00	0.02	-0.02

Ilustración 26. *Anexo 4. Diferencia AASHTO-Simulaciones Vel20km/h, a:3m*
Fuente: *Elaboración Propia*

En la tabla 13 se fijan los intervalos para el análisis de la siguiente manera: El intervalo hasta -0.05 m, son valores a revisar en la matriz ya que indican mayor valor de sobreancho en comparación a los calculados con la normativa; los valores entre -0.05 m hasta 0.05 m no son significativos, ya que, no se encuentra gran variación, por lo tanto, se asume que la norma y la

simulación están en igualdad de condición; entre 0.05 m hasta 0.2 m, aunque podrían representar un cambio significativo, la fórmula del sobreancho que usa el INVIAS para vehículo rígido no considera el factor seguridad, e incluso desprecia un sobreancho menor a 0.20 m, por lo cual para el posterior análisis se asume que ese rango de diferencias podrían ser evaluados como anchos de seguridad, de tal manera los valores superiores a 0.20 m se consideraron relevantes.

CONVENCIONES (m)				
	-999 m	--	-0.049 m	Revisar
	-0.05 m	--	0.049 m	No significativo
	0.05 m	--	0.19 m	No considerado
	0.2 m	--	999 m	Significativo

Tabla 13. *Convenciones diferencias*
Fuente: *Elaboración Propia*

9. Análisis de Resultados

Para realizar el respectivo análisis de comparación entre las simulaciones, los cálculos y sus resultados correspondientes, inicialmente se separó el análisis de U y F_A para cada velocidad, teniendo en cuenta la cantidad de datos, se realizó un fraccionamiento en función de los radios para apreciar mejor su comportamiento en cada gráfica, posteriormente para realizar el análisis correspondiente a las diferencias, se examinaron los radios y las deflexiones que presentan cambios considerables, adicional a esto, se exponen y analizan gráficamente los tipos de trayectorias resultantes de las simulaciones, evaluando su comportamiento.

Además, se incluyen los valores de las normas para comparar la variación de los datos, las velocidades de 20 km/h, 30 km/h y 40 km/h, a=3 m con respecto a la AASHTO, sin embargo, para 40 km/h, a=3.3 m se tienen los valores con ambas normativas, mas no hay diferencias en sus resultados como se evidencia en las tablas 11 y 12, por las razones expuestas en ese mismo apartado, las gráficas que se muestran a continuación representan la diferencia de resultados obtenidos mediante las simulaciones en contraste con las normativas AASHTO e INVIAS respectivamente

9.1 Análisis U

Según las gráficas de los valores de U para todas las velocidades, la mayoría de los radios de giro grandes, considerados entre 140 m a 3000 m, presentan un comportamiento lineal de sus valores entre deflexiones para el mismo radio con variaciones significativas de la siguiente manera:

- Ilustración 27. Para Velocidad 20 km/h los radios de 140 m y 150 m en las deflexiones de 10° y 20° presentan una diferencia de 0.07 m y 0.06 m
- Ilustración 28. Para Velocidad 30 km/h los radios de 140 m y 150 m en las deflexiones de 10° y 20° presentan una diferencia de 0.06 m y 0.05 m
- Ilustración 29. Para Velocidad 40 km/h a= 3m los radios de 140 m y 150 m en las deflexiones de 10° y 20° presentan una diferencia de 0.04 m
- Ilustración 30. Para Velocidad 40 km/h a= 3.3m los radios de 140 m y 150 m en las deflexiones de 10° y 20° presentan una diferencia de 0.07 m y 0.05 m

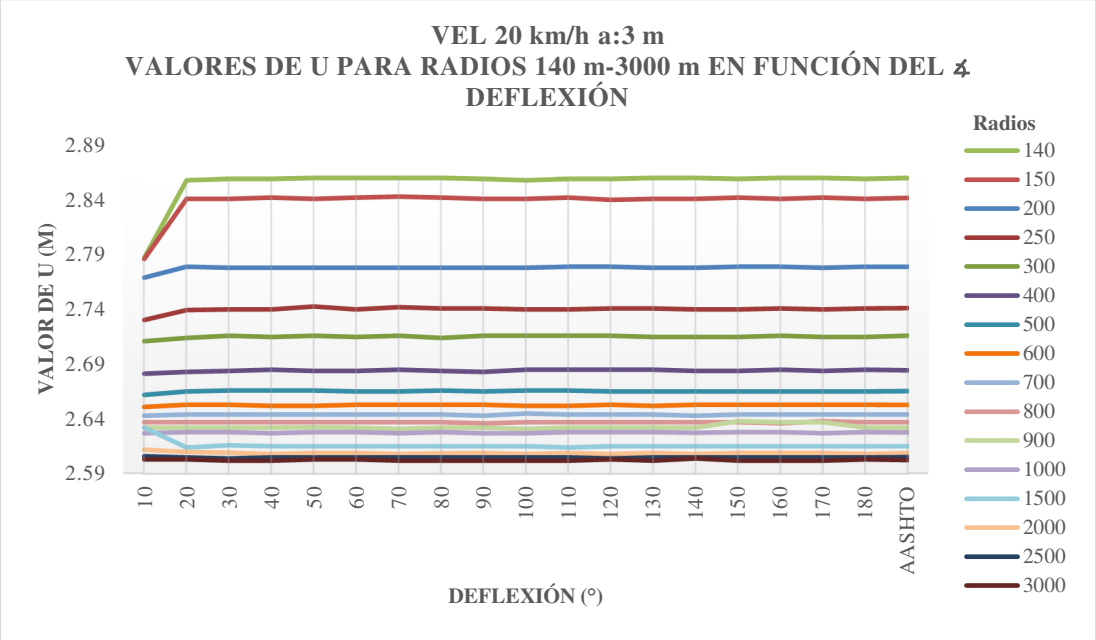


Ilustración 27. *U para Radios 140 m – 3000 m. Vel 20 km/h a:3 m*
Fuente: *Elaboración Propia*

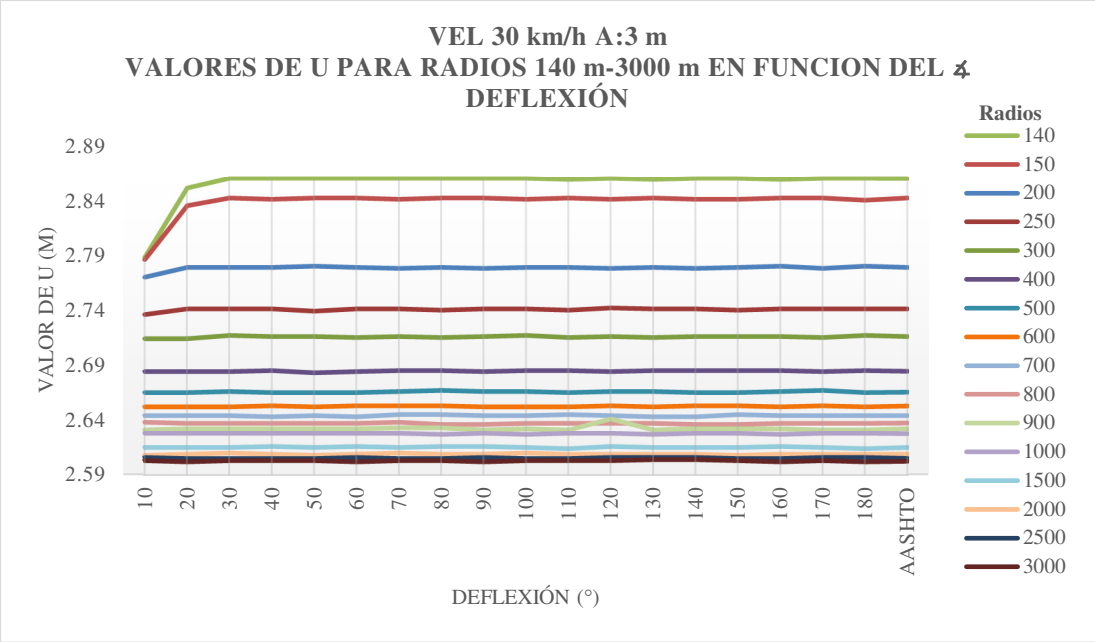


Ilustración 28. *U para Radios 140 m – 3000 m. Vel 30 km/h a:3 m*
Fuente: *Elaboración Propia*

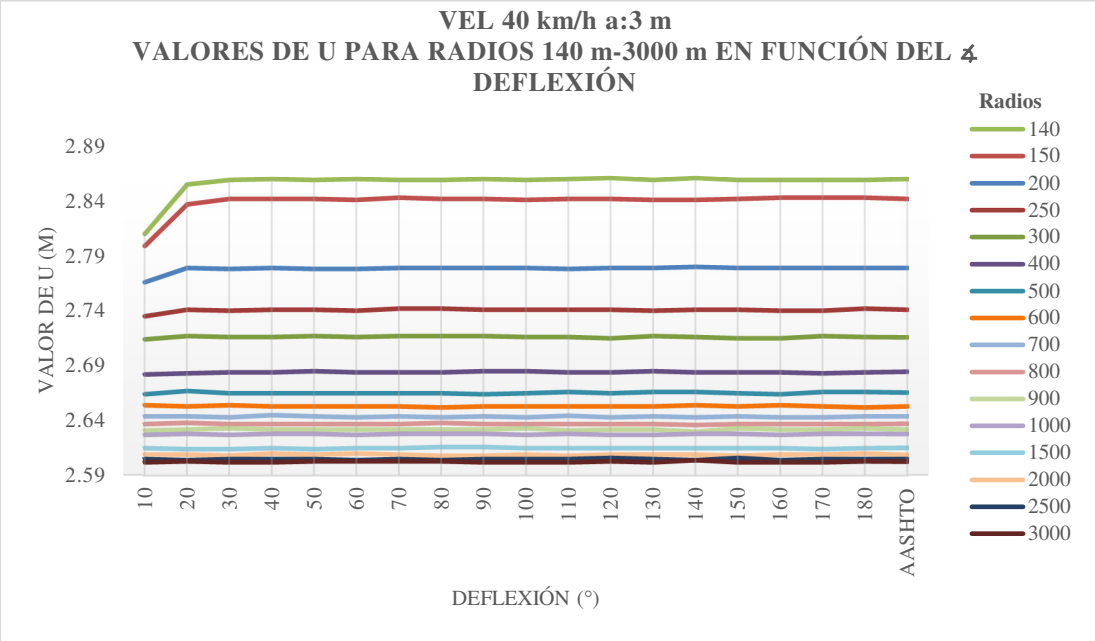


Ilustración 29. *U para Radios 140 m – 3000 m. Vel 40 km/h a:3 m*
Fuente: *Elaboración Propia*

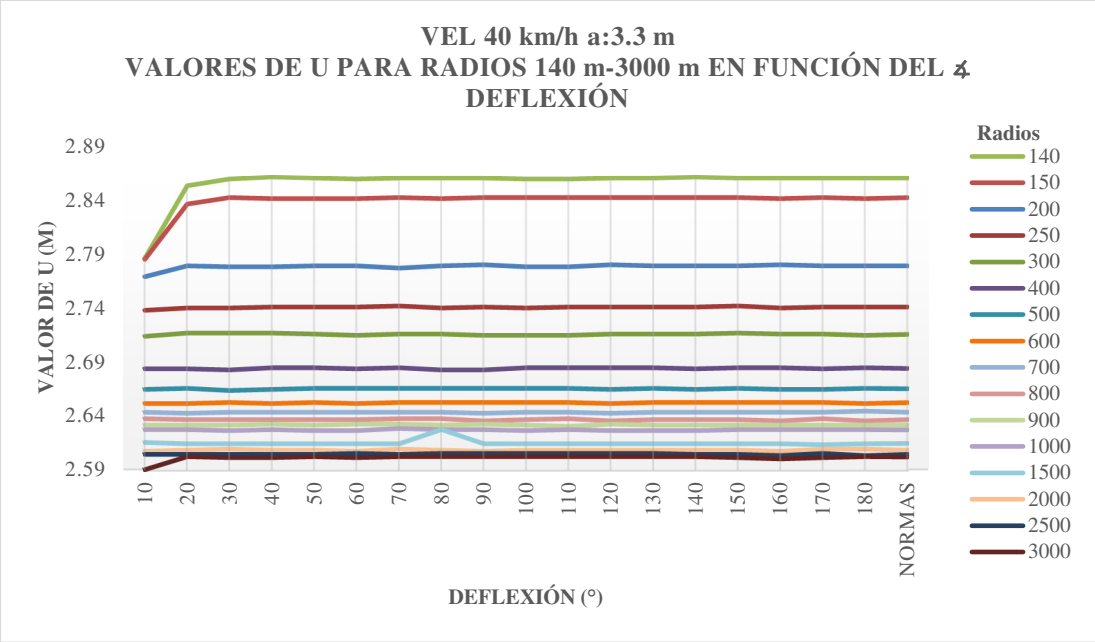


Ilustración 30. *U para Radios 140 m – 3000 m. Vel 40 km/h a:3.3 m*
Fuente: *Elaboración Propia*

Mientras que, para radios de giro entre 20 m a 130 m entre las deflexiones de 10° a 50°, a medida que disminuye el radio, el valor de U aumenta lo cual indica que las llantas solicitan mayor espacio para que el conductor maniobre el vehículo adecuadamente, no obstante, este valor es menor en comparación al calculado con la norma. Esto evidenciado en las ilustraciones:

- Ilustración 31 Velocidad 20 km/h
- Ilustración 32 Velocidad 30 km/h
- Ilustración 33 Velocidad 40 km/h a = 3 m
- Ilustración 34 Velocidad 40 km/h a = 3.3 m

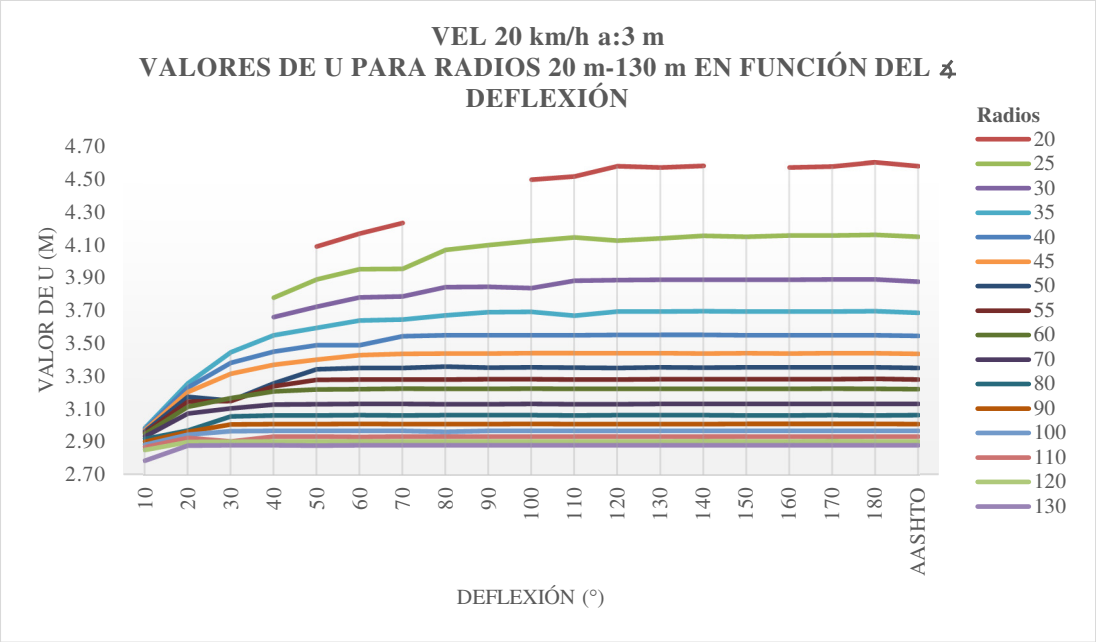


Ilustración 31. *U para Radios 20 m – 130 m. Vel 20 km/h a:3 m*
Fuente: *Elaboración Propia*

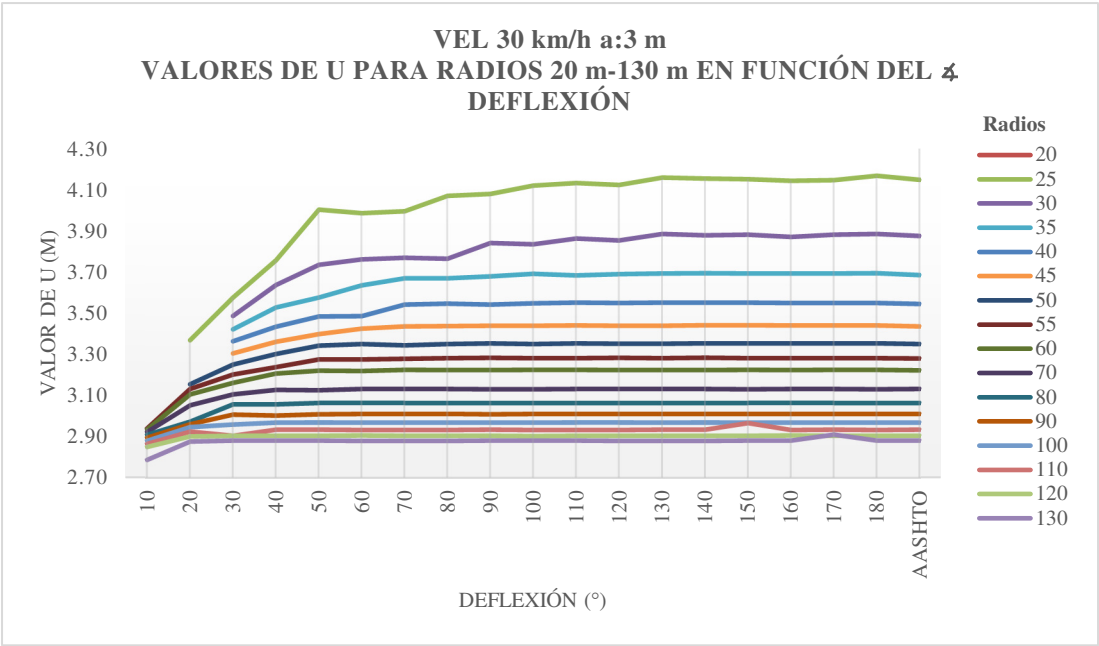


Ilustración 32. *U para Radios 20 m – 130 m. Vel 30 km/h a:3 m*
Fuente: *Elaboración Propia*

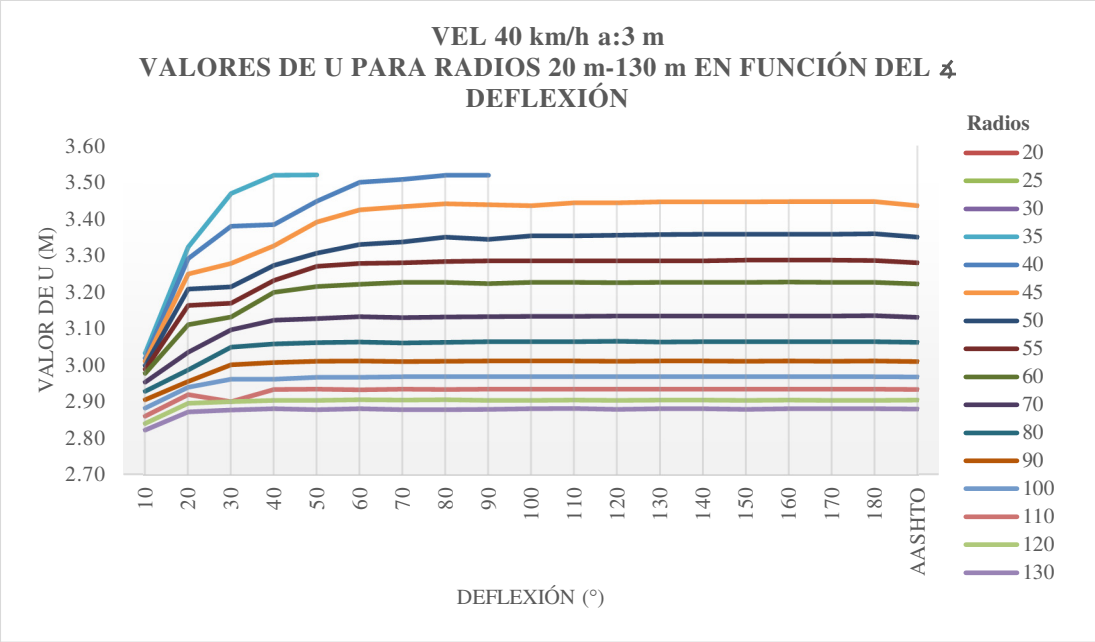


Ilustración 33. *U para Radios 20 m – 130 m. Vel 40 km/h a:3 m*
Fuente: *Elaboración Propia*

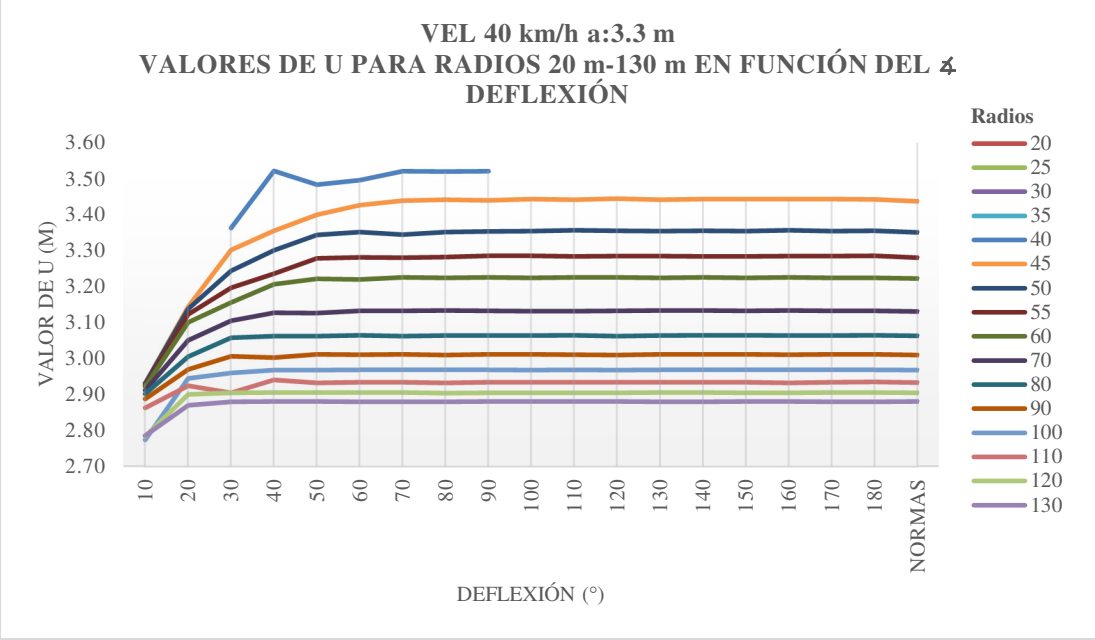


Ilustración 34. *U para Radios 20 m – 130 m. Vel 40 km/h a:3.3 m*
Fuente: *Elaboración Propia*

Por otro lado, el radio mínimo para cada velocidad especificado en las tablas 5 y 6 dependiendo del tipo de vía, indica hasta que radio es posible realizar todas las simulaciones, aun así, no todos los radios y las deflexiones presentan un comportamiento uniforme por lo cual no fue posible medir las variables correctamente.

Sin embargo, para la velocidad de 40 km/h en ambos anchos de carril, en algunos radios que no cumplen con el mínimo, la simulación fue más controlada lo cual, permitió medir las variables de estudio, por lo tanto, a estos datos se les realizo análisis como a todos los demás. Dichos radios y deflexiones se identifican en las tablas:

- Tabla 14. Velocidad 20 km/h
- Tabla 15. Velocidad 30 km/h
- Tabla 16. Velocidad 40 km/h a = 3 m
- Tabla 17. Velocidad 40 km/h a = 3.3 m

RADIOS (m)	DEFLEXIONES (°)
20	20° Y 30°
25	20° Y 30°
30	20°, 30°, 40°, 80°, 90° Y 150°

Tabla 14. *Rango simulaciones erróneas. Vel. 20 km/h*
Fuente: *Elaboración Propia*

RADIOS (m)	DEFLEXIONES (°)
20	No cumple Radio Mínimo
25	10°
30	10° Y 20°
35	10° Y 20°
40	10° Y 20°
45	10° Y 20°
50	10°

Tabla 15. *Rango simulaciones erróneas. Vel. 30 km/h*
Fuente: *Elaboración Propia*

RADIOS (m)	DEFLEXIONES (°)
20	No cumple Radio Mínimo
25	No cumple Radio Mínimo
30	No cumple Radio Mínimo, Valor medido: ∡10°
35	No cumple Radio Mínimo, Valor medido: ∡10°, 20°, 30°, 40° y 50°
40	No cumple Radio Mínimo, Valor medido: ∡10°, 20°, 30°, 40°, 50°, 60°, 70°, 80° y 90°

Tabla 16. *Rango simulaciones erróneas y valores medidos. Vel. 40 km/h a=3 m*
Fuente: *Elaboración Propia*

RADIOS (m)	DEFLEXIONES (°)
20	No cumple Radio Mínimo
25	No cumple Radio Mínimo
30	No cumple Radio Mínimo
35	No cumple Radio Mínimo, Valor medido: ∡30°
40	No cumple Radio Mínimo, Valor medido: ∡ 30°, 40°, 50°, 60°, 70°, 80° y 90°

Tabla 17. *Rango simulaciones erróneas y valores medidos. Vel. 40 km/h a=3.3 m*
Fuente: *Elaboración Propia*

9.2 Análisis F_A

Según las gráficas de F_A para todas las velocidades, la mayoría de los radios de giro grandes considerados entre 140 m a 3000 m presentan un comportamiento lineal de sus valores entre deflexiones para el mismo radio y la variación más grande que presentan algunos es de aproximadamente 0.02 m como se muestra en las siguientes ilustraciones:

- Ilustración 35. Velocidad 20 km/h
- Ilustración 36. Velocidad 30 km/h
- Ilustración 37. Velocidad 40 km/h a = 3 m
- Ilustración 38. Velocidad 40 km/h a = 3.3 m

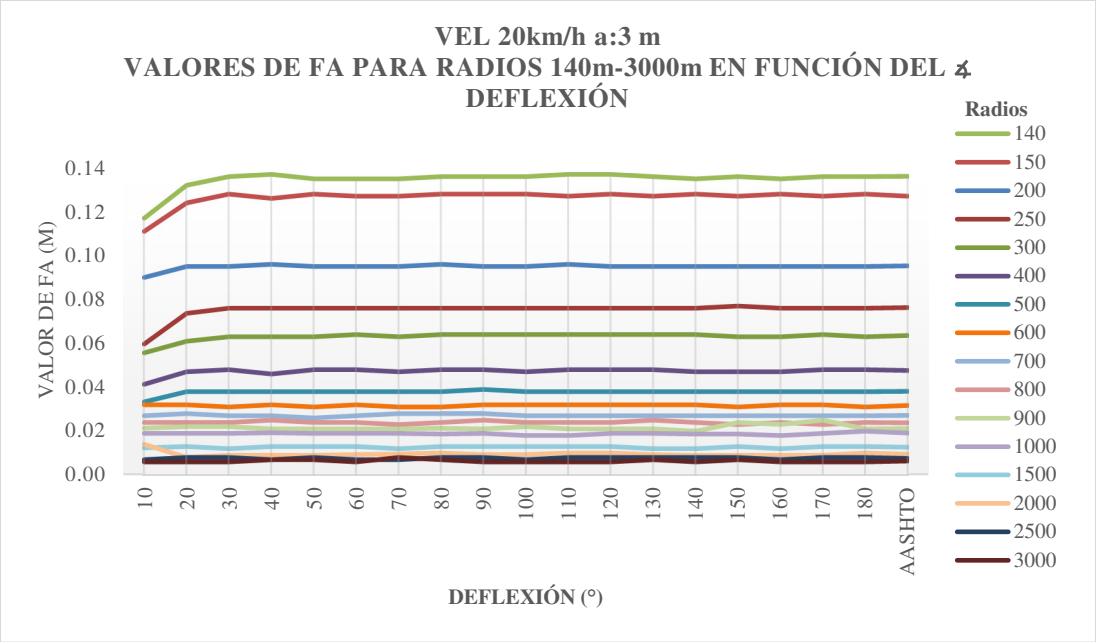


Ilustración 35. *F_A para Radios 140 m – 3000 m. Vel 20 km/h a:3 m*
Fuente: *Elaboración Propia*

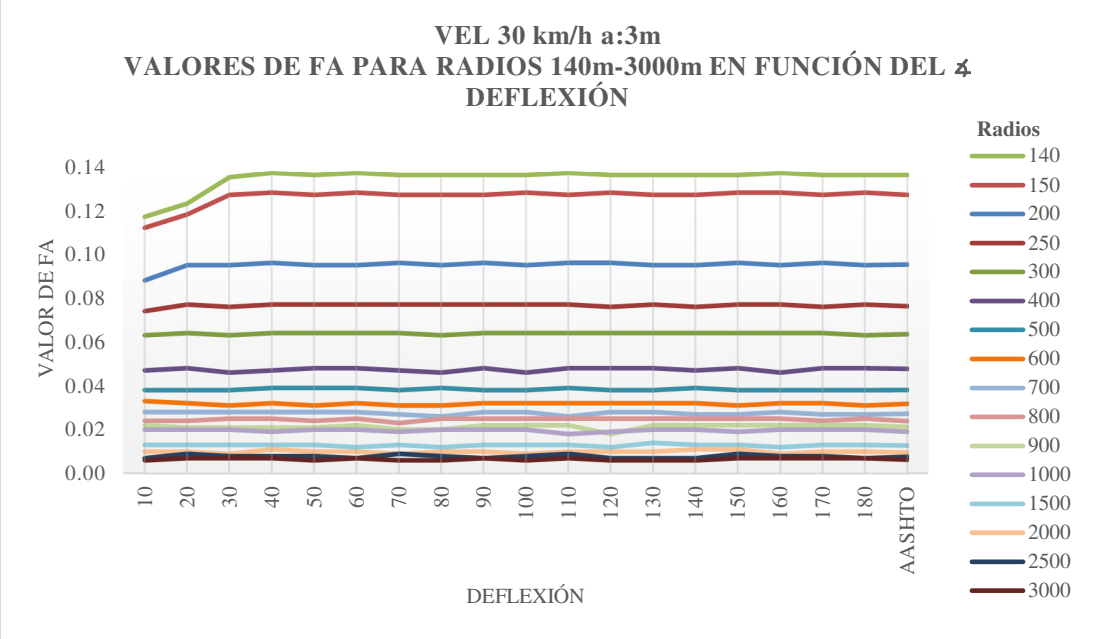


Ilustración 36. *F_A para Radios 140 m – 3000 m. Vel 30km/h a:3m*
Fuente: *Elaboración Propia*

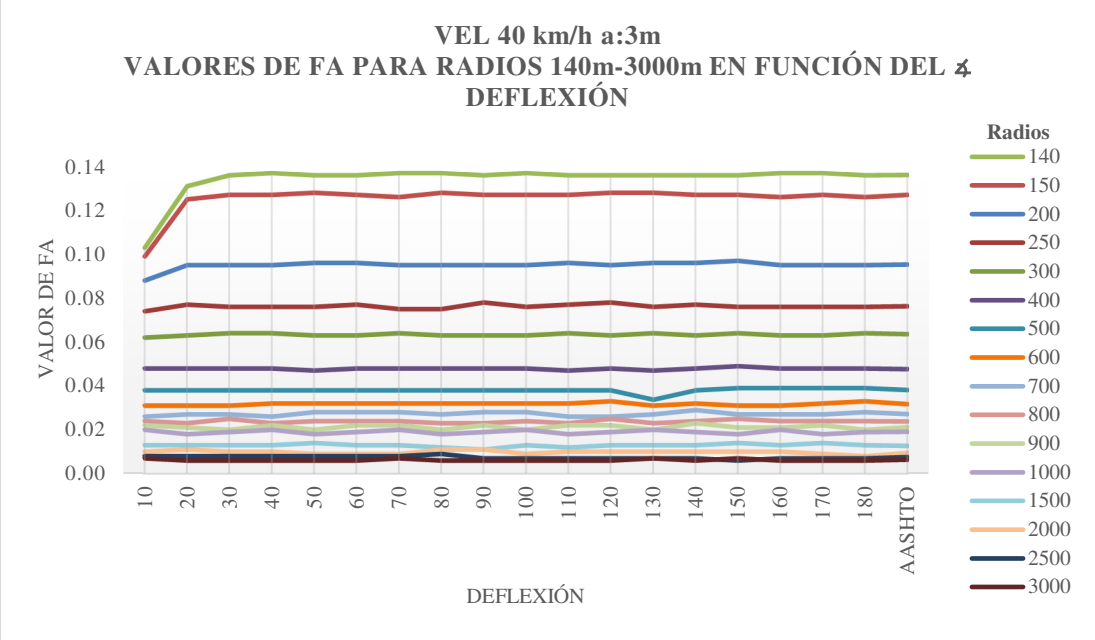


Ilustración 37. *F_A para Radios 140 m – 3000 m. Vel 40km/h a:3 m*
Fuente: *Elaboración Propia*

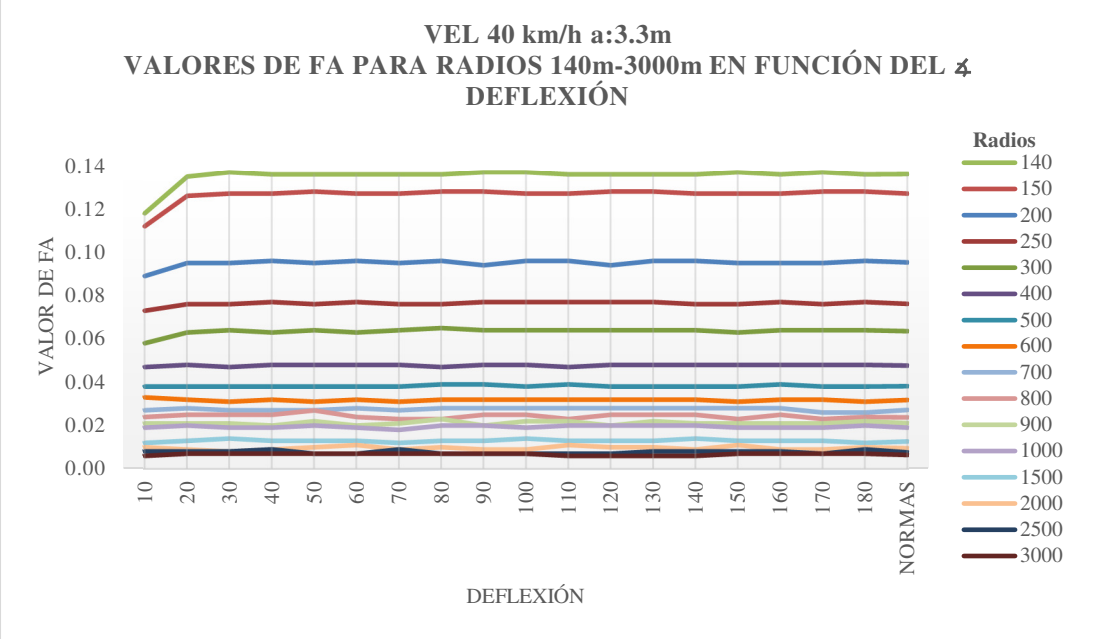


Ilustración 38. *F_A para Radios 140 m – 3000 m. Vel 40km/h a:3.3 m*
Fuente: *Elaboración Propia*

Mientras que, para radios de giro entre 20 m a 130 m entre las deflexiones de 10° a 50° en algunas hasta 60°, a medida que disminuye el radio, el valor de F_A aumenta lo cual indica que el voladizo delantero izquierdo del vehículo solicita mayor espacio para que el conductor maniobre el vehículo adecuadamente, por otra parte, se puede observar que los radios de más pequeños presentan fluctuaciones notorias, no obstante, este valor es menor en comparación al calculado con la norma. Esto evidenciado en las ilustraciones:

- Ilustración 39. Velocidad 20 km/h
- Ilustración 40. Velocidad 30 km/h
- Ilustración 41. Velocidad 40 km/h a = 3 m
- Ilustración 42. Velocidad 40 km/h a = 3.3 m

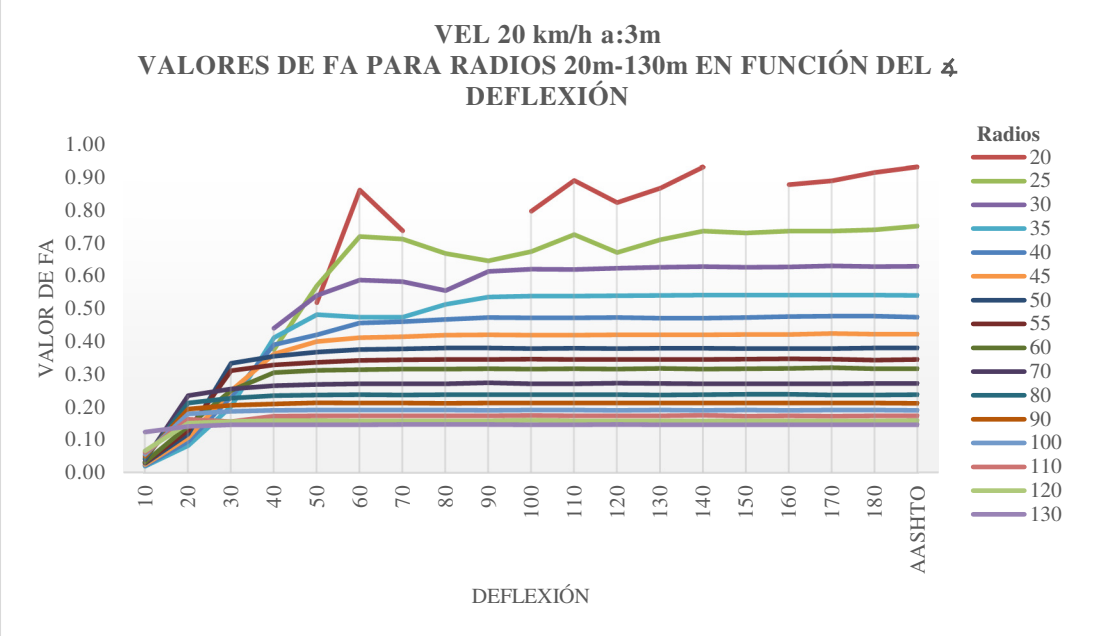


Ilustración 39. *F_A para Radios 20 m – 130 m. Vel 20km/h a:3 m*
Fuente: *Elaboración Propia*

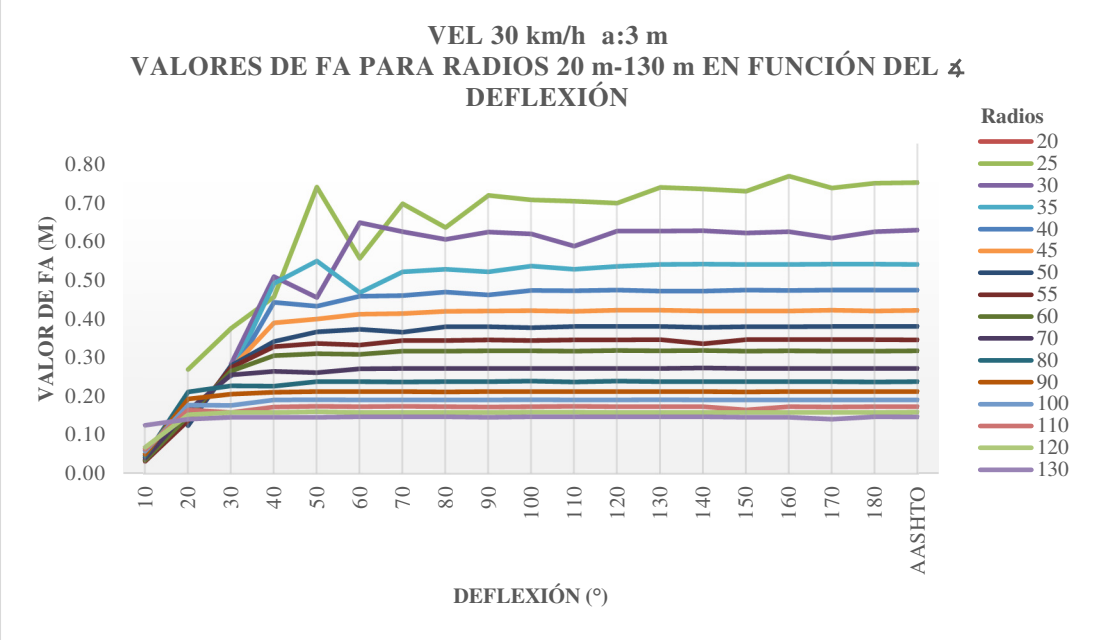


Ilustración 40. *F_A para Radios 20 m – 130 m. Vel 30 km/h a:3 m*
Fuente: *Elaboración Propia*

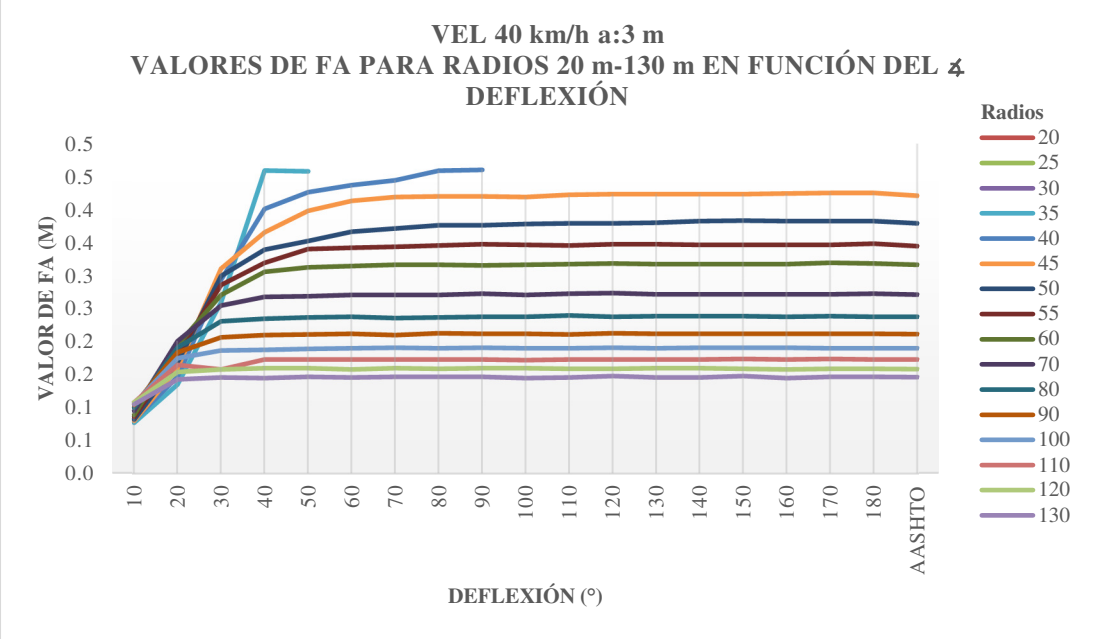


Ilustración 41. *F_A para Radios 20 m – 130 m. Vel 40 km/h a:3 m*
Fuente: *Elaboración Propia*

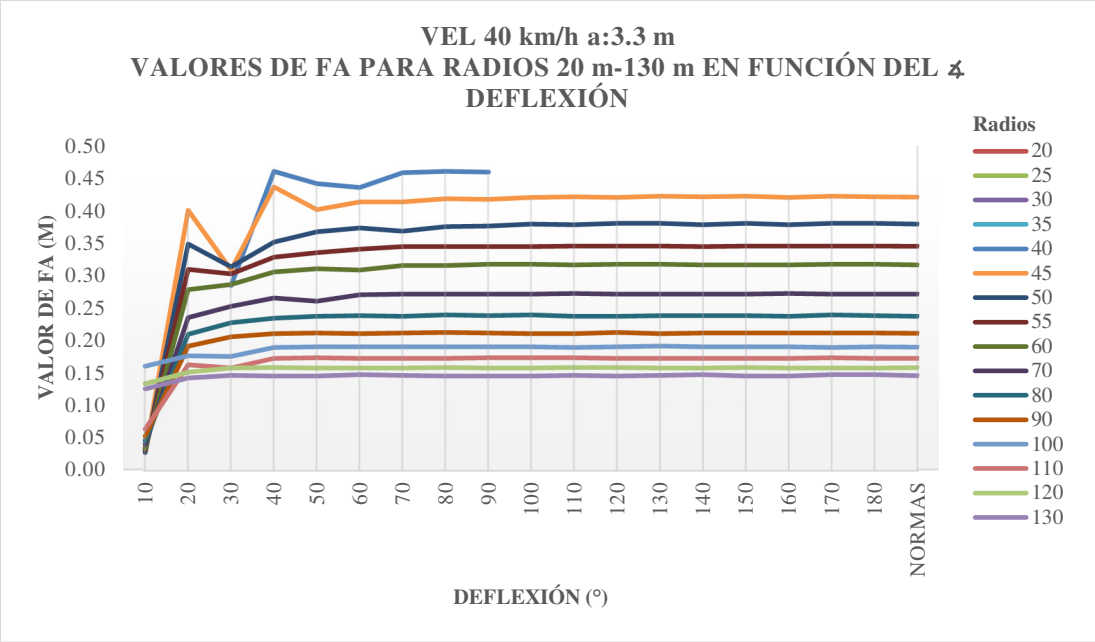


Ilustración 42. *F_A para Radios 20 m – 130 m. Vel 40 km/h a:3.3 m*
Fuente: *Elaboración Propia*

Por otro lado, el radio mínimo para cada velocidad especificado en las tablas 5 y 6 dependiendo del tipo de vía, indica hasta que radio es posible realizar todas las simulaciones, aun así, no todos los radios y las deflexiones presentan un comportamiento uniforme por lo cual no fue posible medir las variables correctamente.

Sin embargo, para la velocidad de 40 km/h en ambos anchos de carril, en algunos radios que no cumplen con el mínimo, la simulación fue más controlada lo cual permitió medir las variables de estudio, por lo tanto, a estos datos se les realizo análisis como a todos los demás. Dichos radios y deflexiones se identifican en las tablas:

- Tabla 14. Velocidad 20 km/h
- Tabla 15. Velocidad 30 km/h
- Tabla 16. Velocidad 40 km/h a = 3 m
- Tabla 17. Velocidad 40 km/h a = 3.3 m

Para considerar de manera numérica y más clara la dispersión de los datos, con la función "DESVEST" de Excel 2019, se determinó la desviación estándar de los valores simulados para cada radio en función del ángulo de deflexión.

Se infiere que el comportamiento entre los radios 200 m a 3000 m para todas las velocidades es similar, donde la dispersión de los datos tiende a cero, mientras que a partir del radio 150 la distorsión de los datos tiende a aumentar en tanto disminuye el radio. El comportamiento de cada velocidad se evidencias así:

- En la velocidad 20 km/h con ancho de carril de 3 m los valores de dispersión se muestran en la tabla 18, siendo la mayor dispersión en el radio 20 m para U de 0.46 y para F_A 0.09, además se tiene en cuenta todos los radios en el cálculo.
- En la velocidad 30 km/h con ancho de carril de 3 m los valores de dispersión se muestran en la tabla 19, siendo la mayor dispersión en el radio 25 m para U de 0.23 y para F_A 0.15, además se tiene en cuenta que el radio de 20 m no se le realiza dicho calculo por inexistencia de valores.
- En la velocidad 40 km/h con ancho de carril de 3 m los valores de dispersión se muestran en la tabla 20, siendo la mayor dispersión en el radio 35 m para U de 0.21 y para F_A 0.18, además se tiene en cuenta que los radios de 20 m, 25 m y 30 m no se le realiza dicho cálculo por inexistencia de valores.
- En la velocidad 40 km/h con ancho de carril de 3.3 m los valores de dispersión se muestran en la tabla 21, siendo la mayor dispersión en el radio 45 m para U de 0.14 y para F_A 0.18, además se tiene en cuenta que los radios de 20 m, 25 m, 30 m y 35 m no se le realiza dicho cálculo por inexistencia de valores.

VELOCIDAD 20 km/h a:3m		
Rc (m)	**Desviación U (m)**	**Desviación F_A (m)**
200	0.00	0.00
150	0.01	0.00
140	0.02	0.00
130	0.02	0.01
120	0.01	0.02
110	0.02	0.03
100	0.02	0.03
90	0.03	0.04
80	0.04	0.05
70	0.05	0.05
60	0.07	0.08
55	0.08	0.09
50	0.11	0.10
45	0.12	0.12
40	0.15	0.14
35	0.19	0.17
30	0.22	0.15
25	0.29	0.19
20	0.46	0.26

Tabla 18. *Desviación estándar para Vel 20 km/h a:3 m*

Fuente: *Elaboración Propia*

VELOCIDAD 30 km/h a:3m		
Rc (m)	**Desviación U (m)**	**Desviación F_A (m)**
200	0.00	0.00
150	0.01	0.00
140	0.02	0.01
130	0.02	0.01
120	0.01	0.02
110	0.02	0.03
100	0.02	0.03
90	0.03	0.04
80	0.04	0.05
70	0.05	0.06
60	0.07	0.07
55	0.09	0.09
50	0.05	0.06
45	0.04	0.04
40	0.05	0.05
35	0.08	0.07
30	0.11	0.09
25	0.23	0.15
20	-	-

Tabla 19. *Desviación estándar para Vel 30 km/h a:3 m*

Fuente: *Elaboración Propia*

VELOCIDAD 40 km/h a:3m		
Rc (m)	**Desviación U (m)**	**Desviación F_A (m)**
200	0.00	0.00
150	0.01	0.01
140	0.01	0.01
130	0.01	0.01
120	0.01	0.01
110	0.02	0.02
100	0.02	0.02
90	0.03	0.03
80	0.04	0.03
70	0.05	0.04
60	0.06	0.06
55	0.08	0.07
50	0.09	0.08
45	0.11	0.10
40	0.162	0.14
35	0.21	0.18
30	-	-
25	-	-
20	-	-

Tabla 20. *Desviación estándar para Vel 40 km/h a:3 m*

Fuente: *Elaboración Propia*

VELOCIDAD 40 km/h a:3.3m		
Rc (m)	**Desviación U (m)**	**Desviación F_A(m)**
200	0.00	0.00
150	0.01	0.00
140	0.02	0.00
130	0.02	0.00
120	0.03	0.01
110	0.02	0.03
100	0.05	0.01
90	0.03	0.04
80	0.04	0.05
70	0.05	0.05
60	0.08	0.07
55	0.09	0.07
50	0.11	0.08
45	0.14	0.09
40	0.06	0.06
35	-	-
30	-	-
25	-	-
20	-	-

Tabla 21. *Desviación estándar para Vel 40 km/h a:3.3 m*

Fuente: *Elaboración Propia*

Los radios que presentan mayor desviación, indican que los valores de U y F_A para cada ángulo de deflexión en un mismo radio, tienen mayor diferencia entre ellos; además se infiere que para todas las velocidades el radio más pequeño evidencia dicha variación, sin embargo, para la velocidad de 40 km/h con ancho de carril de 3.3 m, aunque 40 m es el radio más pequeño, genera menos desviación que el radio de 45 m ya que presenta menos cantidad de datos que cumplen con la trayectoria para evaluar las medidas.

9.3 Análisis diferencias valores U y F_A (Fórmula AASHTO – Medidas Simulaciones)

Las diferencias halladas entre la normativa y las medidas de las simulaciones tienen como punto en común que los valores significativos se encuentran entre los radios de 20 m a 130 m, por lo tanto, las gráficas son analizadas en este intervalo con respecto al ángulo de deflexión.

- **Velocidad 20 km/h**

Se puede apreciar en las ilustraciones que, para esta velocidad, los valores significativos se presentan considerablemente en la deflexión de 10° a partir de un radio de 70 m y a medida el ángulo de deflexión va aumentando, disminuyen estas diferencias.

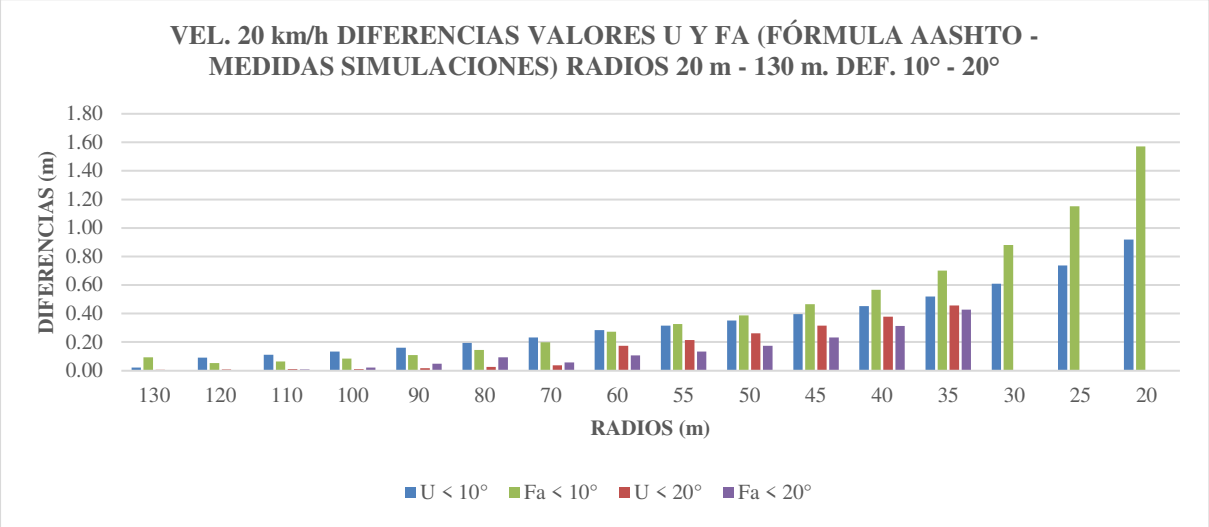


Ilustración 43. *Vel. 20 km/h Diferencias valores U y Fa (AASHTO-Medidas Simulaciones) ∡ 10°, 20°*
Fuente: *Elaboración Propia*

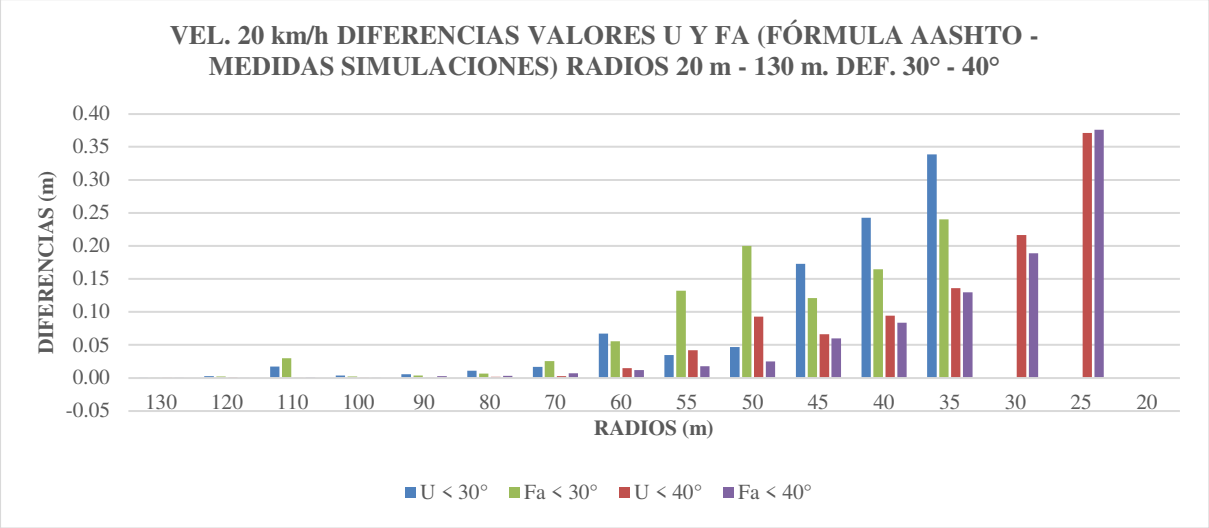


Ilustración 44. *Vel. 20 km/h Diferencias valores U y Fa (AASHTO-Medidas Simulaciones) ∢ 30°, 40°*
Fuente: *Elaboración Propia*

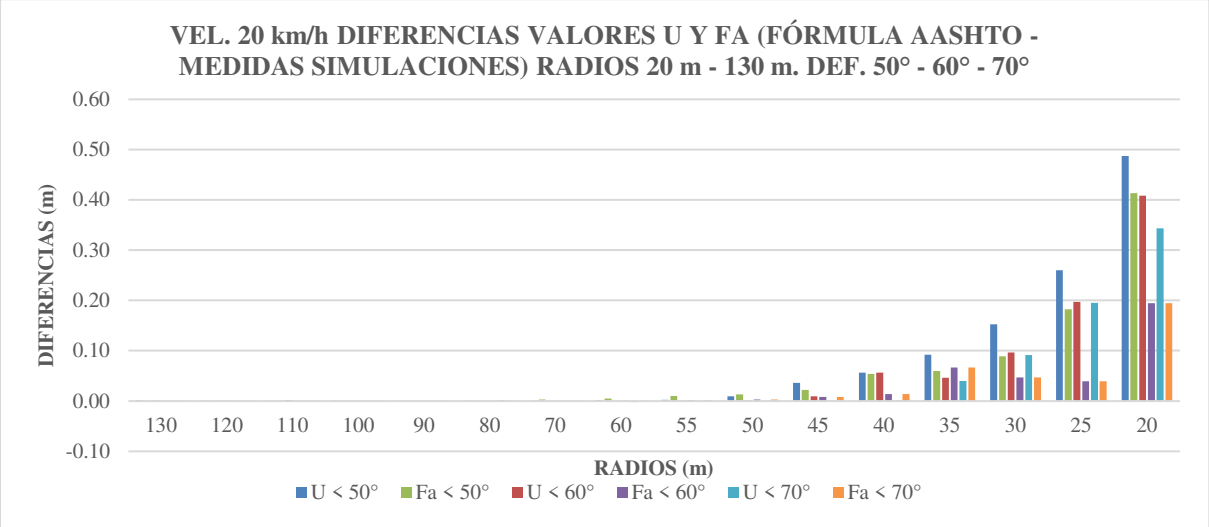


Ilustración 45. *Vel. 20 km/h Diferencias valores U y Fa (AASHTO-Medidas Simulaciones) ∢ 50°, 60°,70°*
Fuente: *Elaboración Propia*

- **Velocidad 30 km/h**

Para la velocidad de 30 km/h la diferencia más grande se presenta en una deflexión de 20° en un radio de 25 m, sin embargo, hay varias simulaciones en estas deflexiones pequeñas que no presentaban un comportamiento uniforme por lo cual no se pudieron obtener valores para U y F_A, por tal razón, varios radios pequeños no cuentan con diferencia. Del mismo modo, a medida el ángulo de deflexión va aumentando, disminuyen estas diferencias.

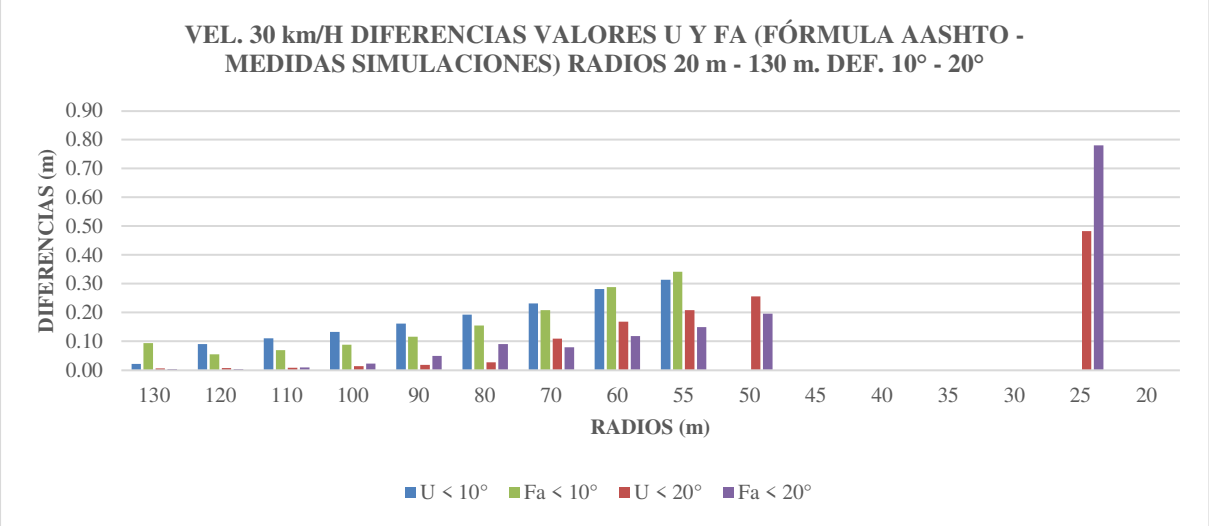


Ilustración 46. *Vel. 30 km/h Diferencias valores U y Fa (AASHTO-Medidas Simulaciones) ∡ 10°, 20°*
Fuente: *Elaboración Propia*

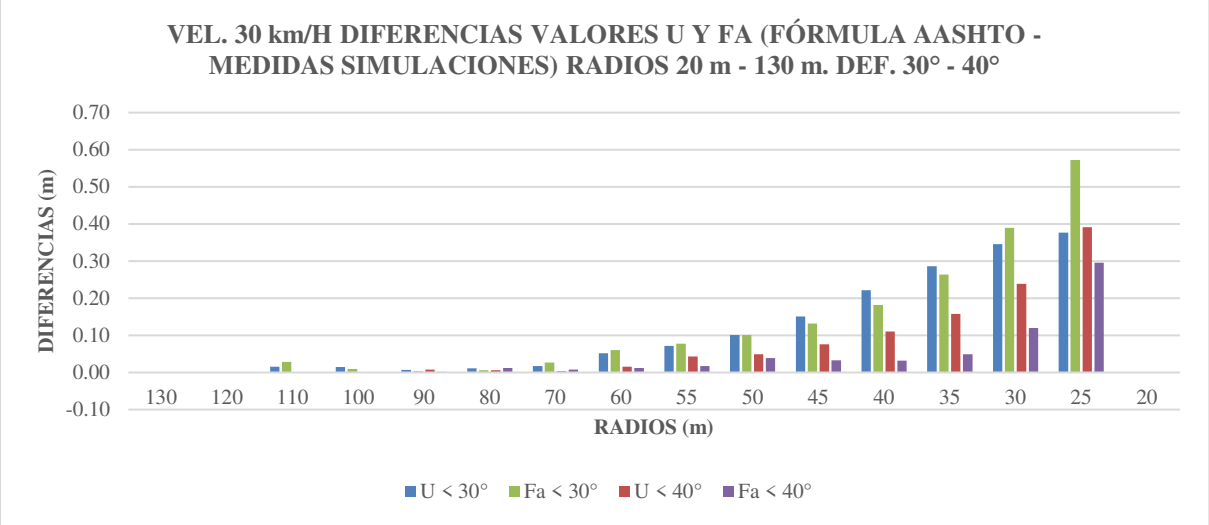


Ilustración 47. *Vel. 30 km/h Diferencias valores U y Fa (AASHTO-Medidas Simulaciones) ∡ 30°, 40°*
Fuente: *Elaboración Propia*

- **Velocidad 40 km/h, a=3m**

En esta velocidad fue posible tomar medidas en radios que, aunque no se diseñan por norma, la simulación tuvo un comportamiento uniforme en la trayectoria del vehículo, por este motivo, las diferencias más grandes se encuentran en radios de 30 m y 35 m en las deflexiones más pequeñas. Para los radios que, si cumplen según norma, en el ángulo de 10° es donde se encuentran los valores significativos. De igual manera, a medida el ángulo de deflexión va aumentando, disminuyen estas diferencias.

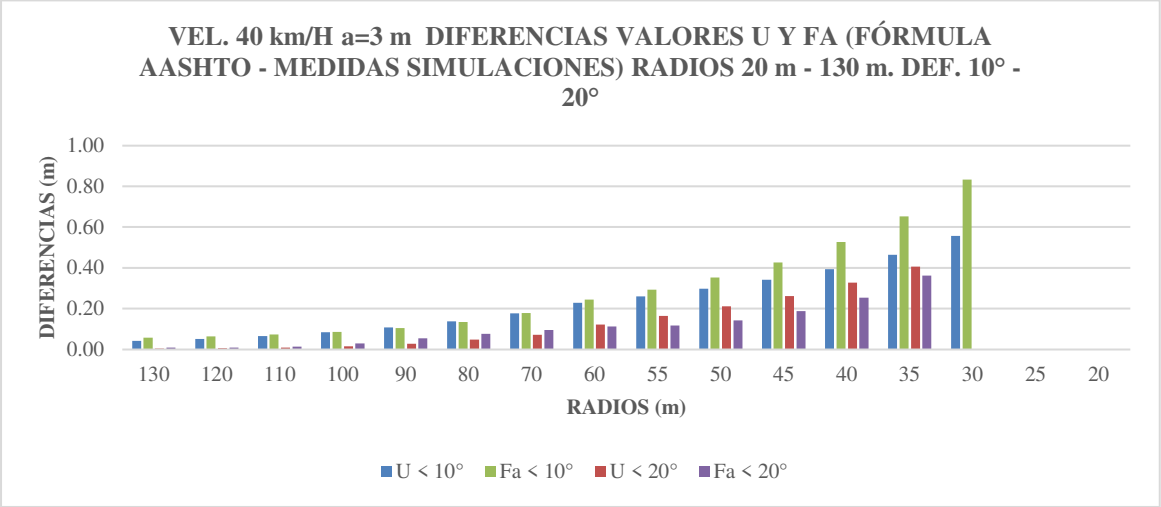


Ilustración 48. *Vel. 40 km/h, a=3 m Diferencias valores U y Fa (AASHTO-Medidas Simulaciones) ∡ 10°, 20°*

Fuente: *Elaboración Propia*

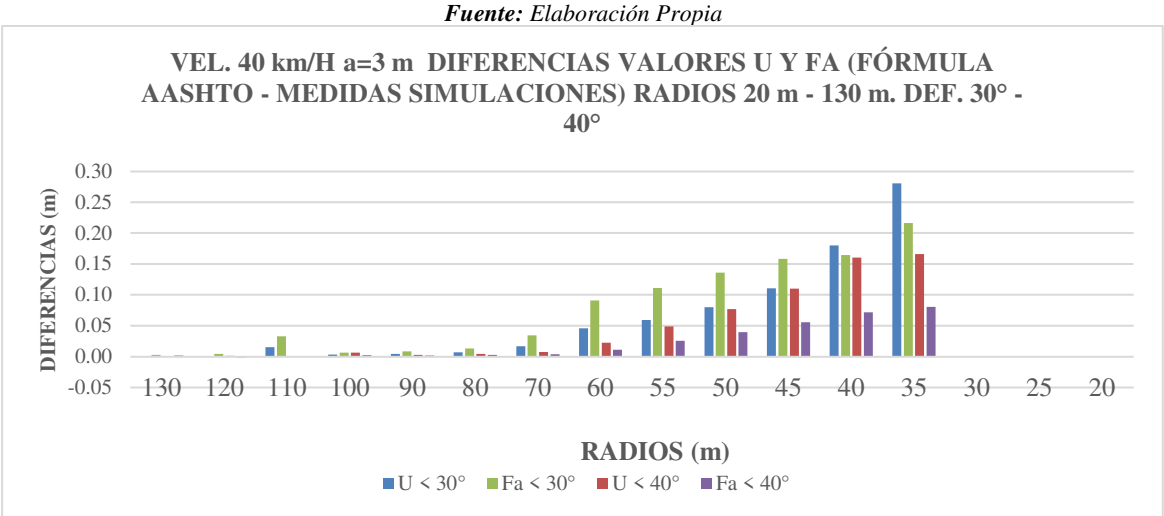


Ilustración 49. *Vel. 40 km/h, a=3 m Diferencias valores U y Fa (AASHTO-Medidas Simulaciones) ∡ 30°, 40°*

Fuente: *Elaboración Propia*

- **Velocidad 40 km/h, a=3.3 m**

Al igual que en el ancho de carril de 3 m en esta velocidad fue posible tomar medidas en radios que, aunque no se diseñan por norma, la simulación tuvo un comportamiento uniforme en la trayectoria del vehículo, aun así, los valores más significativos se presentan en radios mayores al mínimo. Para el único radio que se pudo medir, el cual, no cumplen según norma, los valores no representan gran diferencia. De igual manera, a medida que el ángulo de deflexión va aumentando, disminuyen estas diferencias.

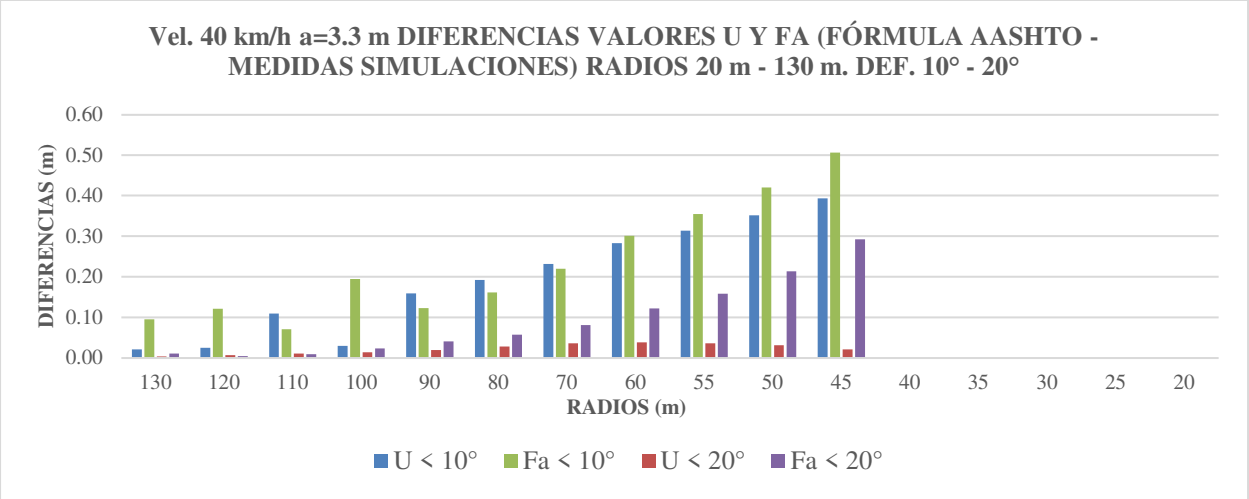


Ilustración 50. *Vel. 40 km/h, a=3.3 m Diferencias valores U y Fa (AASHTO-Medidas Simulaciones) ∡ 10°, 20°*

Fuente: *Elaboración Propia*

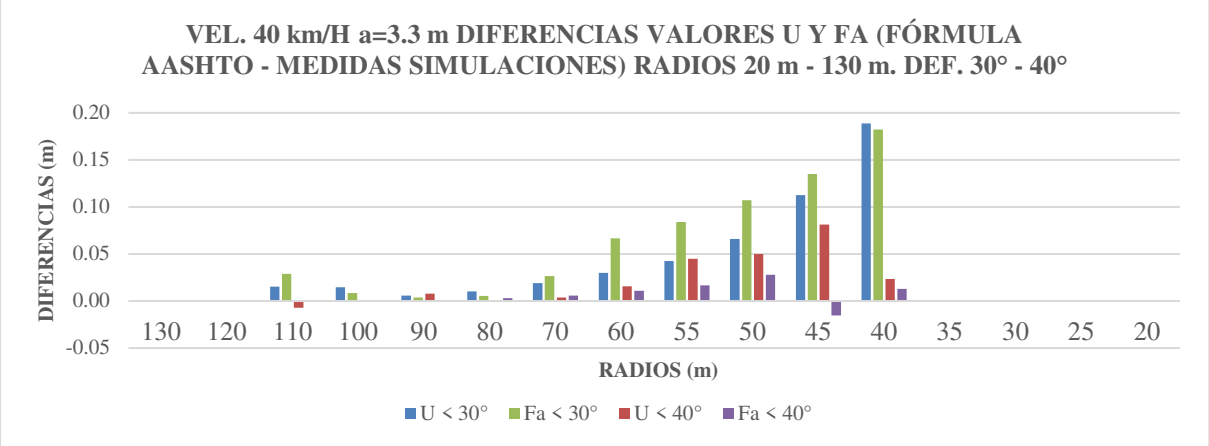


Ilustración 51. *Vel. 40 km/h, a=3.3 m Diferencias valores U y Fa (AASHTO-Medidas Simulaciones) ∡ 30°, 40°*

Fuente: *Elaboración Propia*

9.4 Análisis simulación

En el desarrollo del presente proyecto, se generaron variedad de comportamientos respecto a las trayectorias obtenidas en las simulaciones para velocidades de 20 km/h, 30 km/h y 40 km/h con sus anchos de carril. A continuación, se ilustrarán dichos comportamientos.

Los siguientes ejemplos de recorrido se experimentan en cada matriz, sin embargo, se tomará ejemplo exclusivamente de un caso para cada tipo de trayectoria, por consiguiente, las ilustraciones tendrán la velocidad, radio de curvatura y ángulo de deflexión que le corresponden.

9.4.1 Trayectoria controlada

En la ilustración 52 se evidencia una trayectoria con un comportamiento continuo y correcto, ingresando y saliendo de la curva con un recorrido controlado, además de cumplir los puntos obligados de la parte circular. Se presenta en la totalidad de las curvas con radios grandes para todas sus deflexiones.

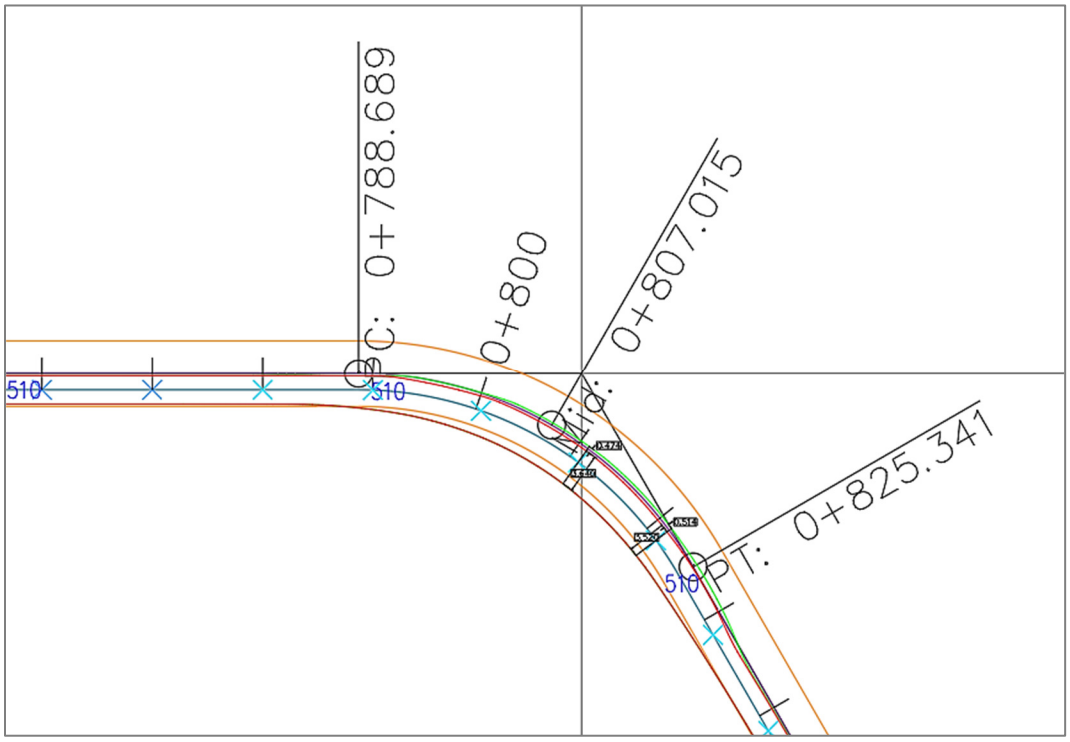


Ilustración 52. *Trayectoria controlada - Vel 20 km/h R: 35 m Defl:60°*
Fuente: *Elaboración Propia*

9.4.2 Trayectoria ampliación después del PT

Este caso en específico, se presenta en curvas cuyos radios son menores y ángulos de deflexión entre 10° y 20°, donde la ampliación se encuentra luego de la parte circular de la curva, se deduce que se debe a las dimensiones y comportamiento del vehículo.

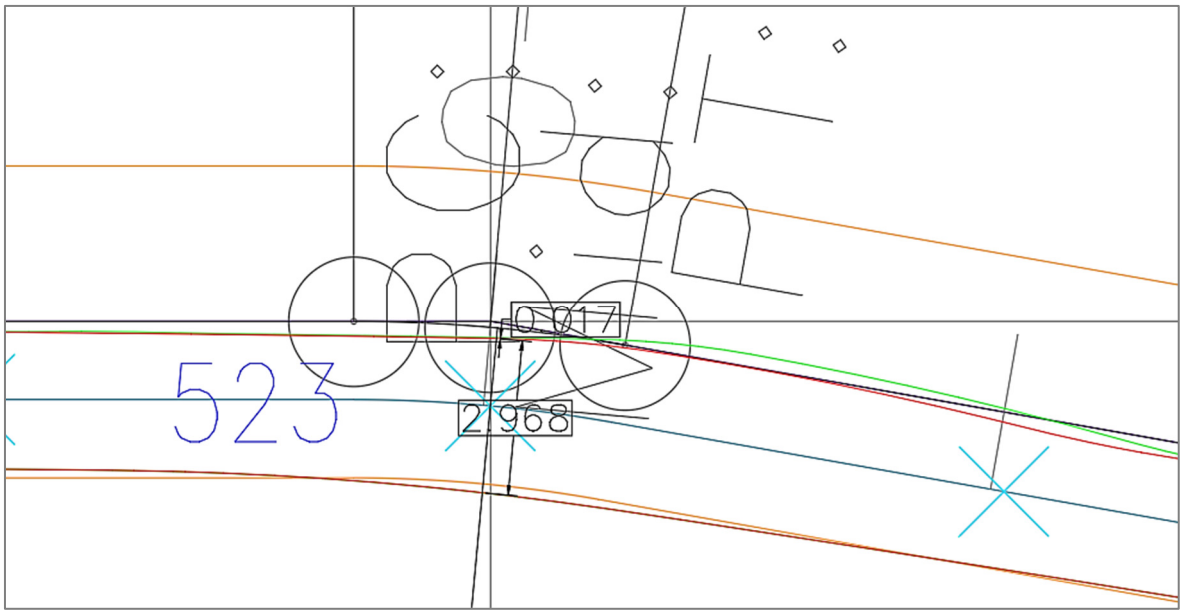


Ilustración 53. *Trayectoria ampliación después del PT - Vel 30 km/h R: 30 m Defl:10°*
Fuente: *Elaboración Propia*

Las siguientes trayectorias se presentan en deflexiones grandes para los radios que están por debajo de los radios mínimos para cada velocidad.

9.4.3 Trayectoria sin punto obligado en PC

En la ilustración 54 el comportamiento del recorrido a lo largo del eje de trayectoria se desarrolla de manera incorrecta, ya que al salir de la curva presenta una gran desviación, sin embargo se tuvo en cuenta que la manera de ingreso del vehículo a la parte circular era inexacta, demostrando que al ubicar puntos obligados adicionales en el eje de la trayectoria para las zonas del PC y PT, algunas simulaciones reforman notablemente su recorrido, con ello los valores de U y F_A varían para realizar la comparación.

En la ilustración 55 se muestra el cambio de la trayectoria y las medidas, para la curva expuesta en la ilustración 54.

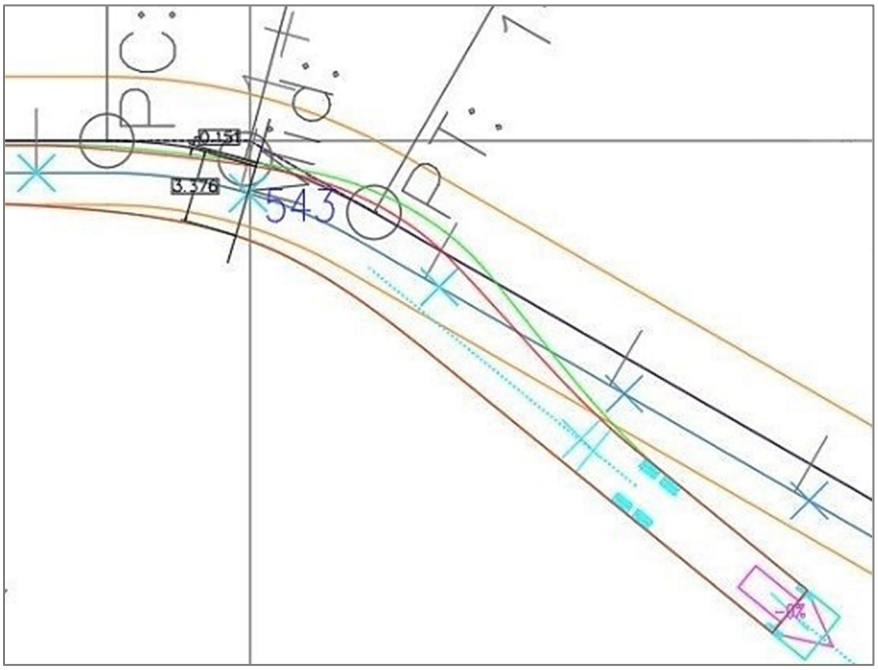


Ilustración 54. *Trayectoria sin punto obligado en PC- Vel 30 km/h R: 25 m Defl:30°*
Fuente: *Elaboración Propia*

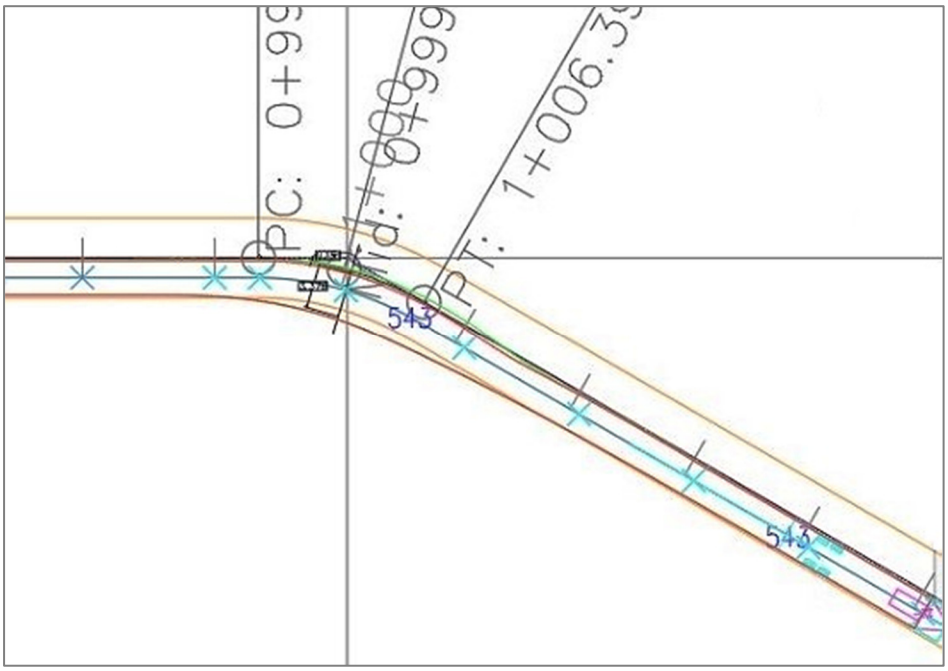


Ilustración 55. *Trayectoria con punto obligado en PC - Vel 30 km/h R: 25 m Defl:30°*
Fuente: *Elaboración Propia*

9.4.4 Trayectoria desviada saliendo de la curva

Contrario al caso anterior, en la ilustración 56 aunque se evidencia el paso por el PC, la trayectoria se desvía saliendo de la curva, lo que indica que el conductor no podrá maniobrar el vehículo para transitar por el carril de manera acertada.

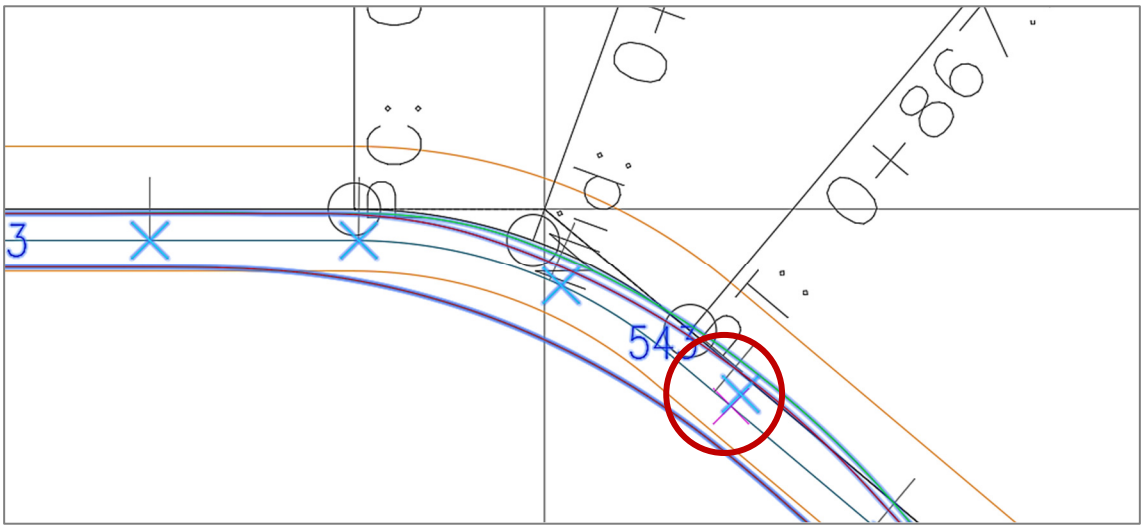


Ilustración 56. *Trayectoria desviada saliendo de la curva - Vel 40 km/h a:3 m R: 25 m Defl:40°*
Fuente: *Elaboración Propia*

9.4.5 Trayectoria desviada durante el desarrollo de la curva

La ilustración 57 e ilustración 58, demuestran que el desvió se comienza a presentar durante el paso obligado en la curva, las condiciones que se están evaluando para ese tipo de trayectorias no permiten que se supere el giro crítico, marcando estrictamente por donde puede generar el paso.

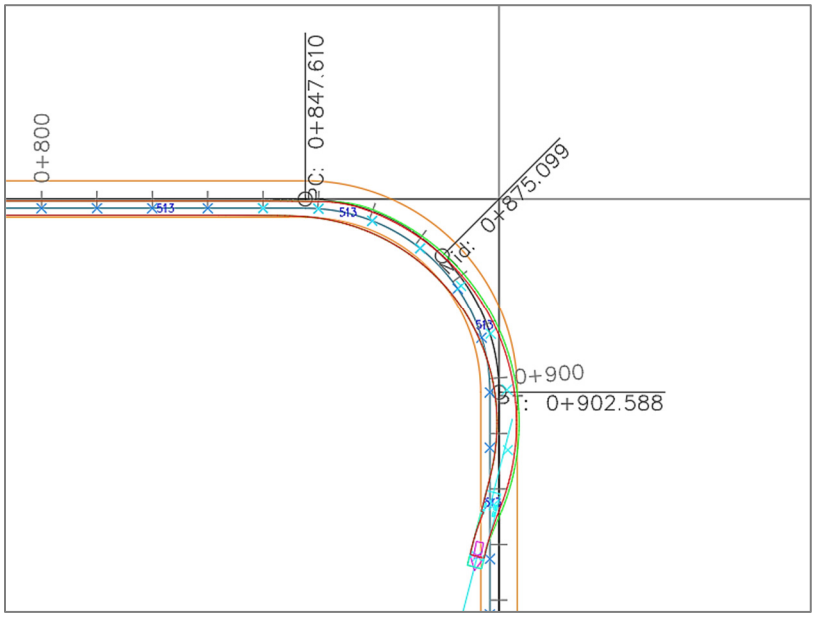


Ilustración 57. *Trayectoria desviada en curva - Vel 40 km/h a:3.3 m R: 35 m Defl:90°*
Fuente: *Elaboración Propia*

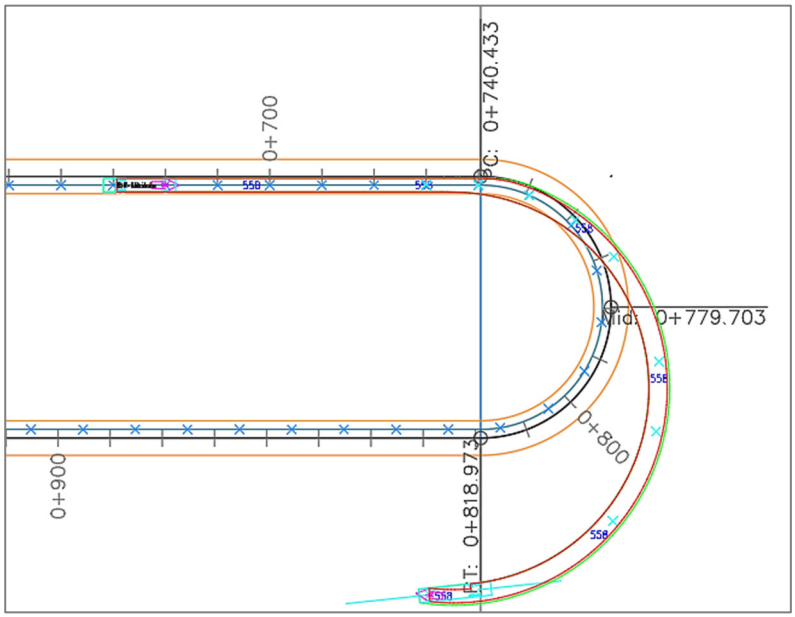


Ilustración 58. *Trayectoria desviada en curva - Vel 40 km/h a:3.3 m R: 25 m Defl:180°*
Fuente: *Elaboración Propia*

10. Conclusiones y Recomendaciones

En el desarrollo del estudio se evidenció que las simulaciones presentan ventajas frente a los métodos de cálculo tradicionales para el valor del sobreancho, en este caso, las trayectorias que realiza el vehículo sobre la parte circular del corredor vial, permite obtener los valores U y F_A, además del poder recrear condiciones cercanas a la realidad, como lo es el diseño vial, y cambiarlas de ser necesario sin generar un sobrecosto, para el presente estudio, con la metodología propuesta, el software permitió incluir variables como lo fue el radio de curvatura en función de un rango de ángulos de deflexión, la velocidad de diseño, ancho de carril y las dimensiones del vehículo, con lo cual se dio respuesta a la hipótesis planteada, para los rangos de los parámetros establecidos.

Teniendo en cuenta los resultados de la investigación, inicialmente se encontró que, para radios grandes en las velocidades de 20 km/h, 30 km/h, y 40 km/h con sus correspondientes anchos de carril, las fórmulas de las normativas satisfacen las necesidades de ampliación en el corredor vial en curva sin presentar variaciones entre ángulos de deflexión para el mismo radio, sin embargo, para radios pequeños en un rango de deflexiones pequeñas se presentan variaciones considerablemente significativas.

Durante el desarrollo del estudio, aunque las normas establecen radios de giro mínimos según la velocidad, por consideración propia las simulaciones se realizaron en la totalidad de la matriz aun para radios cuyas velocidades asignadas no presenten un acertado recorrido de su trayectoria, demostrando que, para estos radios en sus deflexiones pequeñas dicha trayectoria se desarrolla satisfactoriamente, evidenciando una ampliación menor en los recorridos de barrido del vehículo, considerando que sería posible realizar su diseño, siempre y cuando se tenga en función del ángulo de deflexión.

Como se ha mencionado anteriormente, se presentaron cambios en las variables cuando se tiene en cuenta el ángulo de deflexión en su determinación, influyendo directamente en los valores, lo cual, demuestra un sobredimensionamiento en el resultado final, implementando el desarrollo del cálculo del sobreancho con métodos como la simulación o la obtención de un método que permita tener resultados certeros y óptimos, habrían cambios positivos en cuanto al desarrollo del proyecto, tanto en reducción de los costos que abarcan actividades como materiales para la construcción o el movimiento de tierra, igualmente en consecuencia de lo anterior se podría reducir la intervención en ecosistemas naturales durante la construcción del corredor vial, siendo un plus al medio ambiente.

Para el desarrollo del estudio se evidenciaron limitaciones en cuanto a escasa información con respecto al área del proyecto, en el ámbito nacional no se encuentran investigaciones de las entidades encargadas en pro del correcto diseño vial específicamente para Colombia y el desarrollo de su malla vial, estudios que deberían realizarse ya que, el manual de diseño geométrico de carreteras del INVIAS basa su diseño en la normativa norteamericana AASHTO, de tal manera, se sugiere para proyectos viales con las características y parámetros establecidos en el presente proyecto, evaluar el valor de las variables del sobreancho con simulaciones para un diseño óptimo.

Según lo anteriormente mencionado, se recomienda en primer lugar evaluar la opción de agregar más parámetros a la metodología empleada en el presente proyecto para el cálculo de las variables del sobreancho, como lo es el peralte, determinando si aumenta o disminuye el valor de las ampliaciones cuando la vía se encuentra peraltada, además de tener consideraciones iniciales que no se tuvieron en cuenta en este estudio, como el ubicar pasos obligados en el eje de la trayectoria de cada curva en los puntos de geometría “PC” y “PT” con el fin de mantener un

recorrido de simulación mejor controlado al entrar y salir de la curva, evitando que se presenten alteraciones en la trayectoria de estas que son aptas para los ensanchamientos. Además, que se encontró la posibilidad de generar trayectorias uniformes en radios menores a los mínimos, establecidos por la norma para cada velocidad, se aconseja evaluar el comportamiento del vehículo con las condiciones y parámetros establecidos en este proyecto para dichos radios de giro.

Finalmente, para corroborar la información obtenida, se propone realizar comparación con modelaciones en otros software que permitan realizar simulaciones, con el fin de determinar si hay diferencias y que factores pueden tener en cuenta dichos software que otros no, del mismo modo, realizar simulaciones en ambos carriles considerando sentidos de la vía con el propósito de evaluar su comportamiento, además de la implementación de estudios en campo, generando levantamientos sobre las curvas que cumplan con los parámetros establecidos en lo que se refiere a las características geométricas del corredor vial y el tipo de vehículo, para bien sea con el método de preferencia, demarcar las trayectorias del vehículo y posteriormente obtener las medidas en condiciones reales.

Bibliografía

AASHO. (1973). AASHTO: Standard Specification for Highway Bridges. *11th Edition*, *552*, 1–506.

AASTHO. (2011). *A Police on Geometric Desing of Highways and Streets* (Vol. 6).

Agudelo, J. (2012). Diseño Geométrico de Vías. *Textos Universitarios*, 459–451.

AUTODESK LATAM, 2016. *¿Ya Conoces Vehicle Tracking De Civil 3d?* https://blogs.autodesk.com/latam/2016/12/13/ya-conoces-vehicle-tracking-de-civil-3d/

Barnett, J. (1938). *Transition Curves For Higways*.

CAF, Universidad Nacional de Colombia, & IDU. (2019). Guía para el diseño de vías urbanas para Bogotá D.C. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 1–427.

Calixto Hernández, J. S. (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*. UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA.

Cañon Buitrago, E. D. (2018). *Radios de Giro en Camiones Articulados para Diseño Vial Urbano en Colombia*. UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS.

Cárdenas Grisales, J. (2013). *Diseño Geométrico de Carreteras* (2ª. ed. –).

Chocontá Rojas, P. A. (1998). *Diseño Geométrico de Vías* (Escuela Colombiana de Ingeniería (ed.); Agosto 200).

Donnell, E. T., Adolini, M. L., Torbic, D. J., Mason, J. M., Ph, D., & Elefteriadou, L. (n.d.). *Truck Safety Considerations for Geometric Design and Traffic Operations*. *1*, 1–16.

Gonzáles Vergara, C. J., Rincón Villalba, M. A., & Vargas Vargas, W. E. (2019). *Ingeniería De Vías* (ALFAOMEGA).

HARWOOD, D. W., POTTS, I. B., TORBIC, D. J., & GLAUZ, W. D. *Commercial Truck and Bus Safety*. Washington, D.C.: Transportation Research Board.2003. p. 2-8

INVIAS. (2008). *Manual de Diseño Geométrico de Carreteras* (Vol. 84). https://doi.org/10.1038/jid.2012.437.Activation

Ministerio de Obras Publicas y Comunicaciones. (2011). *Manual de Carreteras del Paraguay - Normas para la Evaluacion de Proyectos y Geometria Vial*. 388.

Ministerio de Transporte. (1995). *Resolución 7126 de 1995 por la cual se establecen características y especificaciones técnicas y de seguridad para los vehículos de transporte público colectivo de pasajeros*.

Ministerio de Transporte de Colombia. (2004). *Resolucion_4100_2004.pdf* (pp. 1–9). https://www.mintransporte.gov.co/descargar.php?idFile=241

Montoya Suarez, G. I., & Cárdenas Rodriguez, Y. C. (2020). *Propuesta de Modificación del Sobreancho Mínimo Requerido para el Vehículo C3S2 en el Diseño de Vías en Colombia* [UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS]. www.journal.uta45jakarta.ac.id

Puerto Higuera, G. J. (2017). *Determinación del Sobreancho Requerido para Vías con Bajas Velocidades de Diseño en Colombia*. UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS.

Saavedra Ramirez, L. J. (2021). *Propuesta de Diseño de Ancho y Sobre Ancho de Curva De Volteo para un Semi Tráiler en la Carretera de Canta*. UNIVERSIDAD NACIONAL JOSÉ FAUSTINO SÁNCHEZ CARRIÓN.

Secretaría de Integración Económica Centroamericana. (2011). *Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de Carreteras*. 1–426.

SERVICE D'ÉTUDES TECHNIQUES DES ROUTES ET AUTOROUTES. *Comprendre les principaux paramètres de conception géométrique des routes*. Francia: Ministère des Transports de l'Équipement du Tourisme et de la Mer,2006. p.17

Stojnic, D., Janic, M., Zlatanovic, M., & Stefanovic, B. (2015). Impact of vehicle movement simulation on the size of forest road traveled way widening in small radius curves. *Glasnik Sumarskog FakultetaBulletin of the Faculty of Forestry*, *suppl.*, 131–140. https://doi.org/10.2298/gsf15s1131s

Anexos

1. Velocidad 20km/h - 3m
   - ✓ **Anexo 1.** Modelaciones Vel 20-3.dwg
   - ✓ **Anexo 2.** Matriz valores Vel 20-3.xlsx
   - ✓ **Anexo 3.** Medidas U y F_A Simuladas - Vel 20-3.png
   - ✓ **Anexo 4.** Diferencia AASHTO – Simulaciones Vel 20-3.png
2. Velocidad 30km/h - 3m
   - ✓ **Anexo 5.** Modelaciones Vel 30-3.dwg
   - ✓ **Anexo 6.** Matriz valores Vel 30-3.xlsx
   - ✓ **Anexo 7.** Medidas U y F_A Simuladas - Vel 30-3.png
   - ✓ **Anexo 8.** Diferencia AASHTO – Simulaciones Vel 30-3.png
3. Velocidad 40km/h - 3m
   - ✓ **Anexo 9.** Modelaciones Vel 40-3.dwg
   - ✓ **Anexo 10.** Matriz valores Vel 40-3.xlsx
   - ✓ **Anexo 11.** Medidas U y F_A Simuladas - Vel 40-3.png
   - ✓ **Anexo 12.** Diferencia AASHTO – Simulaciones Vel 40-3.png
4. Velocidad 40km/h – 3.3m
   - ✓ **Anexo 13.** Modelaciones Vel 40-3.3.dwg
   - ✓ **Anexo 14.** Matriz valores Vel 40-3.3.xlsx
   - ✓ **Anexo 15.** Medidas U y F_A Simuladas - Vel 40-3.3.png
   - ✓ **Anexo 16.** Diferencia AASHTO – Simulaciones Vel 40-3.3.png
   - ✓ **Anexo 17.** Diferencia INVIAS – Simulaciones Vel 40 – 3.3.png