



ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN / RESEARCH ARTICLE

<http://dx.doi.org/10.14482/inde.37.2.1257>

Aplicación de la distancia de visibilidad de adelantamiento en carreteras de dos carriles en Colombia

Implementation of the sight distance passing on two-lane roads in Colombia

BEATRIZ ELENA PINEDA URIBE *

*Grupo de Investigación de Ingeniería Civil –GRIDIC–, Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid PCJIC, Carrera 48 n.º 7-151, Medellín (Colombia). beatrizpineda@elpoli.edu.co

Correspondencia: (+57)3197900 ext. 442.



Resumen

La Distancia de Visibilidad de Adelantamiento (DVA) requerida para un tramo de carretera se obtiene de los manuales de diseño geométrico de vías y de señalización vial de cada país; en Colombia se tienen el Manual de Diseño Geométrico de Carreteras de 2008 [1] y el Manual de Señalización Vial del 2015 [2] para obtenerla. El objetivo de este trabajo es aplicar y cotejar las metodologías establecidas en cada uno de ellos para calcular la DVA requerida y para medir la DVA disponible en planos. Al comparar estas dos últimas se indican los tramos donde es permitido el adelantamiento para señalar el eje de la carretera con línea discontinua.

Cuando se calcula la DVA requerida en cada uno de los manuales de Colombia, se obtienen valores diferentes. Para entender el efecto de estas diferencias en la señalización se aplican los valores y la metodología de cada uno de ellos a la carretera Túnel de Occidente-San Jerónimo, que es una carretera de dos carriles representativa y ubicada en el departamento de Antioquia (Colombia). Luego de obtener la respectiva señalización se detectaron vacíos y contradicciones en la reglamentación colombiana de diseño vial y de señalización.

Palabras clave: adelantamiento, carreteras de dos carriles, demarcación de carriles, distancia de visibilidad de adelantamiento, maniobra de pasada.

Abstract

The passing sight distance (DVA) required for a stretch of road is obtained from the geometric design manuals of roads and road signs of each country; in Colombia there are the road geometric design Manual of the 2008 [1] and The 2015 [2] road signs Manual to get it. The objective of this paper is to apply and compare the methodologies established in each one of them to calculate the required DVA and to measure the DVA available in planes. When comparing these last two are indicated the sections where it is permissible to advance to signal the axis of the road with discontinuous line.

When calculating the required DVA in each one of the Colombian's manuals, different values are obtained. To understand the effect of these and the differences on road signs, the values and methodology of each of them are applied to the Tunel de Occidente Road-San Jerónimo, which is a two-lane representative road and located in Antioquia department, Colombia. After having the respective road sign, gaps and contradictions were detected In the Colombian regulation of road design and signposting.

Keywords: lane demarcation, overtaking, passing maneuver, passing sight distance, two-lane roads.

1. INTRODUCCIÓN

En una carretera de dos carriles, los adelantamientos se hacen en el carril donde circulan los vehículos de sentido contrario. Por lo tanto, es muy importante que se dispongan de tramos donde se permita adelantar de manera segura, como resultado de un análisis riguroso y que corresponda con las características geométricas de la vía y los factores propios del entorno de cada región. Esto previene accidentes de tránsito que ocurren por causa de los adelantamientos indebidos y permite que los conductores tengan respeto por las señales de tránsito que encuentran en la vía [3].

Para determinar dónde es posible adelantar se debe obtener la Distancia de Visibilidad de Adelantamiento (DVA) requerida para una carretera o para cada tramo de características homogéneas. Según el manual que se vaya a utilizar, se mide la DVA disponible en los planos y donde esta última sea mayor que la primera, se demarcará con línea central de carriles discontinua, indicando que se permite la maniobra.

Para medir la DVA disponible en los planos de una carretera de dos carriles se debe combinar el alineamiento horizontal con el diseño de la rasante y todo lo relacionado con la conformación de la sección transversal, incluyendo obstáculos laterales que puedan impedir la visibilidad.

En Colombia se tiene el Manual de Diseño Geométrico de Carreteras [1], en el cual se obtiene un valor de la DVA requerida según la velocidad específica a la que se realiza la maniobra y se explica el procedimiento para medir la DVA disponible en planos de planta y perfil. También se tiene el Manual de Señalización Vial [2], en el que se obtiene la DVA requerida según la velocidad de diseño de la carretera, si es nueva, o según la velocidad de operación, si la vía ya está en funcionamiento. Los dos valores de DVA requerida son diferentes para una misma carretera. Mediante revisión bibliográfica internacional se evidenció que esta situación se presenta en algunos países que tienen los dos manuales, como Alemania, Australia, Austria, Canadá, España, Estados Unidos, Grecia, entre otros.

Desde la década de los años setenta Weber [4] intenta explicar por qué los manuales de señalización difieren de los manuales de diseño geométrico en su indicación de cuál debe ser la DVA que se debe aplicar en los planos [4].

Aunque las DVA requeridas difieren en cada manual, es de gran importancia realizar un análisis de la señalización de piso obtenida por cada uno de estos, como se hizo en la carretera de dos carriles que va desde la salida del Túnel de Occidente hasta San Jerónimo, en la que se demostró que esas diferencias son significativas. Es así como este trabajo tiene el objetivo de conocer con cuál de los dos manuales se proyecta mejor la señalización de una carretera de dos carriles en Colombia, basados en la comparación entre los valores requeridos por cada uno para DVA y un valor obtenido

de estudios locales que han medido tiempos utilizados y rechazados para la maniobra en Colombia y con los cuales obtenemos una DVA mínima para la vía de estudio.

Al ser el esquema de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) de gran referencia para el cálculo de la DVA, se presenta en este artículo, con algunas de las modificaciones que le han realizado investigadores. También se presentan varios métodos utilizados para aplicar la DVA a los planos de una carretera de dos carriles con el fin de determinar los tramos donde es posible adelantar, y en particular los establecidos por lo manuales de diseño vial y de señalización en Colombia.

2. MARCO TEÓRICO

La distancia de visibilidad de adelantamiento (DVA) es la longitud continua de visibilidad de carretera que necesita un conductor para invadir el carril de sentido contrario, sobrepasar un vehículo lento que circula en el mismo sentido y regresar a su carril sin colisionar con un vehículo de sentido opuesto, asumiendo que este último es visto en el momento que se invade el carril de sentido contrario [3].

La distancia de visibilidad de adelantamiento necesaria para realizar la maniobra depende directamente de la velocidad a la cual circulan los vehículos implicados; para una velocidad de circulación mayor, se necesitará una DVA mayor [3].

A. Importancia de la distancia de visibilidad de adelantamiento

En Colombia y en otros países del mundo, el tema del adelantamiento en carreteras de dos carriles está directamente relacionado con las altas cifras de accidentalidad y es una de las principales causas enunciadas en los informes de siniestralidad del transporte; algunas de ellas son: adelantar invadiendo vía, adelantar en curva y adelantar en zona prohibida.

En las vías sin posibilidades de adelantar, los conductores se arriesgan a sobrepasar a un vehículo que circula a menor velocidad, en una distancia corta que no es adecuada, ocasionando accidentes o realizando maniobras inseguras. No es fácil identificar las causas de los accidentes relacionados con las maniobras de adelantamiento indebidos. Además de choques frontales, pueden producirse accidentes por otras causas, como salidas de la vía, invasión de carril, entre otros, existiendo por tanto distintas tipologías [5] que se relacionan con los adelantamientos en zonas no adecuadas. Pese a que la frecuencia de los accidentes asociados a maniobras de adelantamiento sea inferior a la de otros tipos de maniobra, la gravedad de los mismos es muy alta, siendo habitual que las consecuencias sean fatales.

La definición de tramos con adelantamientos permitidos o no influye también en otras variables del tráfico; se estima en el Manual de Capacidad y Niveles de Servicio de Colombia [6] que para el cálculo de la capacidad de una carretera de dos carriles es necesario obtener un factor de corrección por el porcentaje de zonas de no rebase, que en el caso más desfavorable, cuando no hay oportunidades de adelantar, la reduce hasta en un 50 %.

La calidad del flujo vehicular en una carretera de dos carriles se puede caracterizar mediante el concepto de niveles de servicio del *Highway Capacity Manual* [7], en el cual se establece que es necesario que cada cierta distancia se cumpla con la DVA requerida para que se provean opciones de adelantamiento y se tenga un buen nivel de servicio.

En la medida que la necesidad de adelantar sea satisfecha, el usuario calificará mejor la circulación en la vía. En consecuencia, la calidad está estrechamente relacionada con las posibilidades de realizar los adelantamientos. Facilitar el adelantamiento se puede lograr mediante distintas alternativas; entre las que se mencionan la disponibilidad de un trazado que ofrezca condiciones geométricas para realizar la maniobra de forma segura y oportunidades suficientes, o proveer a la vía de carriles auxiliares [8].

B. Esquema de la *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) [9] y modificaciones hechas por algunos investigadores

Se divide la maniobra en cuatro etapas como se indica en la figura 1. Al sumar sus respectivas distancias, da como resultado la DVA requerida:

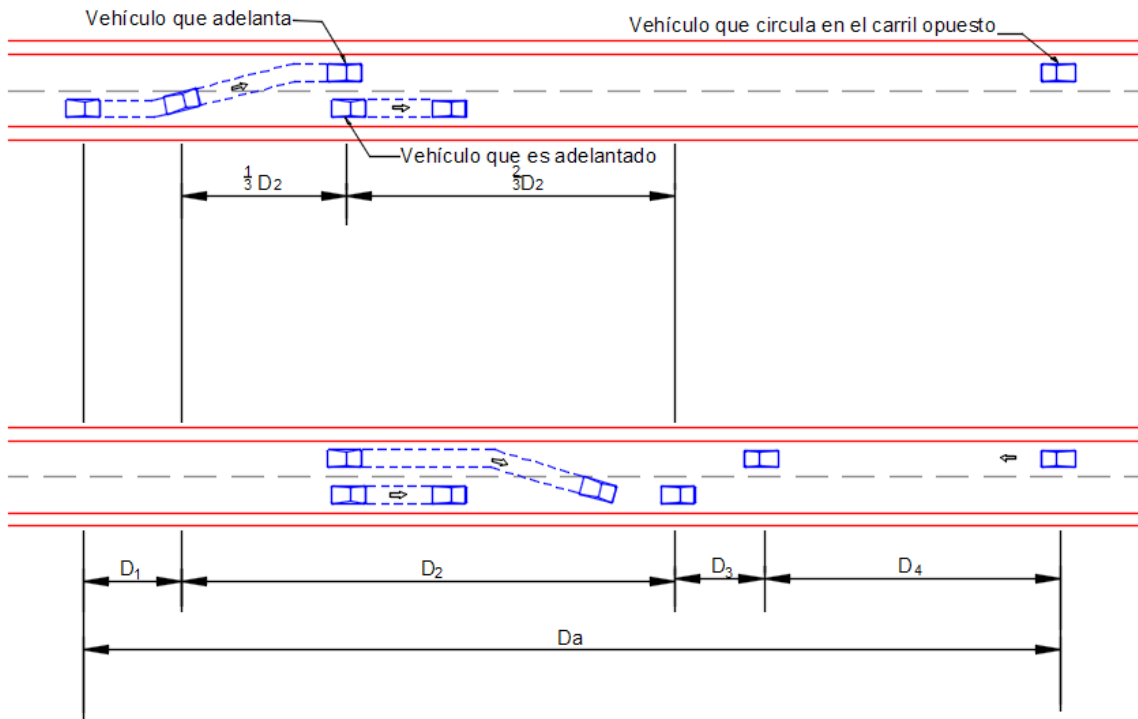


FIGURA 1. DISTANCIA DE VISIBILIDAD DE ADELANTAMIENTO SEGÚN LA AASHTO

D_a : Distancia de visibilidad de adelantamiento, en metros.

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

D_2 : Distancia recorrida por el vehículo que adelanta durante el tiempo desde que invade el carril del sentido contrario hasta que regresa a su carril, en metros. Esta distancia se divide en dos; la primera, desde que el conductor decide adelantar hasta que se encuentra en el carril de sentido contrario al lado del vehículo adelantado, su parachoques está al frente del vehículo adelantado (a) y la distancia (b) desde la posición anterior hasta que regresa totalmente de nuevo a su carril de circulación.

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

D_4 : Distancia recorrida por el vehículo que viene en sentido opuesto y que se asume que es visto por el vehículo adelantante cuando este tiene su parachoques en frente del parachoques del vehículo adelantado. (Es estimada en $\frac{2}{3}$ de D_2).

La división en etapas presentada anteriormente ha servido como base para que algunos investigadores profundicen en ciertas variables de la maniobra de adelantamiento.

Polus et al. [10] tuvieron varios hallazgos con implicaciones de seguridad únicas, refiriéndose al corto avance que se logra por el conductor al inicio de la maniobra de adelantamiento y el tiempo de reacción del conductor muy pequeño.

Glennon [11] propuso un modelo para la determinación de las DVA mínimas, utilizando el mismo esquema de la AASHTO, pero con supuestos diferentes. El diferencial de velocidad entre el vehículo adelantante y el adelantado, en su modelo presentado en 1988, se supone que disminuye con el aumento de la velocidad de diseño; para la AASHTO se asume de 15 km/h. Esto es realmente contrario a la lógica del *Manual Uniform on Traffic Control Devices* (MUTCD), que asume un aumento del diferencial de velocidad con mayor velocidad de diseño. Los supuestos y los modelos del MUTCD y de Glennon para calcular DVA mínima son diferentes, pero el valor mínimo obtenido de DVA requerida es prácticamente el mismo [12].

Cuando el conductor inicia la maniobra acelera el vehículo al máximo, con el fin de realizar el adelantamiento en el menor tiempo posible. Jenkins *et al.* [13] llegaron a la conclusión de que el aumento de velocidad del vehículo que adelanta durante la maniobra es menor cuando la diferencia de velocidad entre los vehículos adelantado y adelantante en el momento de la aceleración inicial es mayor.

Estudios de maniobras de adelantamiento en el estado de Texas en los Estados Unidos muestran que los diferenciales de velocidad no disminuyen a medida que aumenta la velocidad, y sugieren que la diferencia de velocidad en la corriente del tráfico debe ser mayor que el valor de 16 km / h (10 mph) asumido por AASHTO [14].

El esquema de la AASHTO es para adelantamientos sencillos; cuando son adelantamientos dobles, el promedio de la diferencia de velocidades es mayor, es de 20 a 24 km/h, y la distancia de paso es un 43 % mayor [15].

C. Cálculo de la distancia de visibilidad de adelantamiento

Cada maniobra de adelantamiento es única e irrepetible, debido a las condiciones particulares de cada una. Factores como la velocidad de los vehículos implicados, las condiciones físicas de cada vehículo, la ubicación exacta cuando se inicia el adelantamiento, las condiciones climáticas y del piso, el tipo de conductor, entre otros factores, hacen que cada maniobra sea diferente de todas las demás.

Es necesario determinar cuáles variables de las involucradas son necesarias para establecer un modelo que permita determinar la DVA requerida en la carretera para realizar un adelantamiento bajo condiciones seguras.

Para calcular la DVA se han realizado diferentes investigaciones; algunas de ellas incluyen grabaciones de maniobras de adelantamientos con las cuales determinan muy bien los tiempos (o velocidades) que duran las diferentes etapas de la maniobra.

En un adelantamiento influyen otras variables que están relacionadas directamente con la carretera, como la pendiente de la vía, la disposición de las bermas o sus sobrecanchos, la señalización que permita o no el adelantamiento, las obstrucciones laterales, las oportunidades de adelantar que se tengan cada 5 kilómetros y el volumen vehicular que circula por ella [16].

Se puede observar que existe un volumen direccional que maximiza el número de adelantamientos, independientemente de la distribución de zonas de adelantamiento. El volumen direccional se encuentra entre 400 y 500 veh/h, ligeramente superior al determinado por Romana [17] y Moreno et al. [18] a partir de observaciones. El número máximo de adelantamientos y la dispersión en los resultados depende de la distribución de las zonas de adelantamiento, un aumento de la longitud de la zona de adelantamiento incrementa el número de adelantamientos y la dispersión [18].

Se tienen otras variables que dependen de los vehículos implicados como el tipo de vehículos adelantado y adelantante, si es auto, bus o camión; la diferencia de velocidades entre ellos, si la maniobra es con o sin seguimiento, si es simple o doble, entre otras. En este último caso de adelantamiento a dos vehículos a la vez, Llorca et al. [19] encontraron que se requiere 2,6 segundos de más para completar la maniobra y 55 metros adicionales en comparación con el adelantamiento simple.

Existen otras variables involucradas, algunas de ellas más complejas de valorar, porque están relacionadas con el comportamiento de los conductores, tales como: la percepción, el carácter agresivo o conservador, la destreza en la conducción, la capacidad de reacción, el conocimiento de la vía, el respeto por las señales de tránsito, entre otros [3].

También hay un conjunto de factores externos a la vía, al vehículo y a los conductores, entre los que se encuentran las condiciones de luminosidad (diurna y nocturna) o las condiciones meteorológicas [5].

Cada país tiene su normativa en cuanto a los diseños geométricos de carreteras y de señalización, y en sus respectivos manuales se indica cómo calcular la DVA requerida para una determinada velocidad. Aunque algunos países han adoptado el esquema básico de la AASHTO y otros han hecho adaptaciones propias de cada territorio.

Las normativas de diseño geométrico de carreteras de Colombia han tenido como referente las especificaciones dadas por la AASHTO; razón por la cual se adopta en 2008 valores del *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets* del 2001 para la DVA requerida. Esos valores fueron obtenidos en Estados Unidos para maniobras de un camión adelantando otro camión, por lo cual arrojaban unas DVA requeridas muy largas; en la versión de 2011 se dan unos valores muy bajos porque corresponden a un automóvil adelantando otro automóvil.

Cada país ha asumido o medido valores diferentes para el tiempo percepción-reacción y para la duración de las etapas 2, 3 y 4, según la división que hace la AASHTO de la maniobra de adelantamiento. Es de anotar la importancia de algún segundo de más o de menos en la maniobra de adelantamiento, pues si hablamos de movimiento uniformemente acelerado, en 1 segundo, a una velocidad de circulación de 60 km/h, se recorren 16,67 metros.

También hay diferencias entre las DVA requeridas que se calculan en el manual de diseño geométrico y las del manual de señalización de un mismo país. Estas diferencias han existido desde la década de los años 70 cuando Weber [4] intenta dar explicación de ellas; diferencias que persisten en los manuales vigentes.

Dichas diferencias son causadas también por las velocidades para las cuales se calcula la DVA requerida. El Manual de Señalización Vial de Colombia establece que debe ser con el percentil 85 de la velocidad, determinada mediante un estudio de ingeniería de tránsito, o la velocidad de diseño del sector, para vías nuevas [2], tomando como base los valores del Manual on Uniform Traffic Control Devices (MUTCD) 2004 Edition, que son basados en maniobras de camión adelantando camión. Por su parte, el Manual de Diseño Geométrico de Carreteras define que, según la velocidad específica del elemento que se está evaluando, se calculará la distancia de visibilidad mínima de adelantamiento [1].

D. Medición de la distancia de visibilidad de adelantamiento disponible

Para ubicar las zonas de adelantamiento permitido en la carretera es necesario medir la DVA disponible, y donde sea mayor que la DVA requerida, se permitirá la maniobra.

La ubicación precisa de las zonas donde está prohibido el adelantamiento en las carreteras de dos carriles es necesaria para la circulación segura de los vehículos y para las investigaciones realizadas por las partes involucradas en los accidentes de tránsito.

También se necesita identificar las zonas de adelantamiento permitido cuando una carretera es repavimentada, o cambia su velocidad límite, o cuando la vegetación del borde de la carretera ha crecido y bloquea las líneas de visión [20].

Para medir la DVA disponible en planos se requiere definir ciertos datos y el método que se va a utilizar. A continuación se detalla al respecto:

- *Velocidad de la maniobra.*
- *Diseño de la vía:* para aplicar la DVA en los planos se requiere toda la información geométrica del proyecto: el alineamiento horizontal, vertical y de la sección transversal; además, la información del levantamiento altiplanimétrico donde

se detallan todos los elementos presentes en el terreno en la zona que afecta la visibilidad de la carretera; también las barreras de seguridad, señales de tránsito y demás infraestructura proyectada.

- *Altura de los ojos del conductor:* debe estar a 1.08 m sobre la superficie de la carretera. Este valor se basa en un estudio que encontró que el promedio de las alturas de los vehículos ha disminuido a 1.30 m, con una disminución comparable en la altura promedio de los ojos a 1.08 m [9]. En el Manual de Diseño Geométrico de carreteras de 2008 para Colombia, la altura de los ojos del conductor en el análisis de la longitud mínima de la curva vertical convexa según el criterio de seguridad, se asume de 1,08 m, y para la evaluación de la visibilidad en perfil 1,10 m.
- *La altura del vehículo en sentido opuesto:* este objeto se basa en una altura del vehículo de 1,33 m, que representa el percentil 15 de la altura de los vehículos en la población de livianos, menos una tolerancia de 0.25 m, porción de la altura del vehículo que debe ser visible para que otro conductor reconozca un vehículo como tal [9]. También se consideran las distancias de visibilidad calculadas con estos valores, adecuadas para las condiciones nocturnas, porque los rayos de los faros de un vehículo opuesto generalmente se pueden ver desde una distancia mayor que durante el día [9]. En el Manual de Diseño Geométrico de Carreteras se asume 1,35 m para la altura del vehículo en sentido opuesto. En el caso del Manual de Señalización Vial, se asume 1,20 m para altura de los ojos del conductor y altura del vehículo en sentido opuesto [1].

E. Métodos para Medir DVA en planos

La precisión al determinar las DVA disponibles, resultado de la medición en planos, depende del método empleado. Los métodos más tradicionales tienen en cuenta las obstrucciones visuales estáticas, como las crestas de las curvas verticales convexas de la misma carretera, los taludes de corte, los intercambios a desnivel, los objetos laterales, como árboles, señales de tránsito, construcciones, barreras de seguridad longitudinales, entre otros. Ninguno de esos modelos considera las combinaciones de curvas horizontales y verticales, pues trabajan el alineamiento vertical y horizontal separadamente. Consideran el problema con los obstáculos estáticos y solo realizan la medición de las DVA disponibles cada cierta distancia [21].

A continuación se hará una breve descripción de algunos métodos utilizados para medir en planos las DVA disponibles:

- *Elementos Finitos:* al reflexionar sobre el alineamiento natural de las vías en tres dimensiones, Hassan et al. [21] propusieron un modelo de elementos finitos para determinar la disponibilidad de la distancia de visibilidad en tres

dimensiones combinando alineamientos horizontales y verticales. El modelo de elementos finitos muestra flexibilidad para idealizar la superficie de la vía y las obstrucciones visuales dentro de una red de elementos finitos con el fin de calcular la DVA disponible en una condición compleja de carretera [21].

- *Manual de Diseño Geométrico de Carreteras 2008 Invías:* Se debe medir en los planos del diseño geométrico de la vía, la DVA disponible en cada punto (abscisas cada 20 o 25 metros) y comparar este valor con la DVA requerida para realizar la maniobra a una determinada velocidad; si esta última es menor, se indicará que es posible adelantar en esa abscisa. En planta, cuando la obstrucción se debe a los taludes de las secciones en corte, se debe dibujar en la planta la línea o traza del talud a un metro con veintitrés centímetros (1,23 m, promedio entre 1,10 y 1,35 m) [1].

El procedimiento manual consiste en trazar desde el eje del carril en el punto al cual se le quiere medir la DVA disponible, líneas que vayan hasta el eje del carril opuesto y que no sean interrumpidas por ningún obstáculo de los mencionados anteriormente (a lo máximo que sean tangentes a cualquiera de ellos), así la longitud de la mayor línea de ellas será la DVA disponible en el punto evaluado [1].

Para la evaluación en perfil se recomienda el empleo de una reglilla transparente de plástico, de bordes paralelos separados un metro con treinta y cinco centímetros (1.35 m) a la escala vertical del perfil, con una línea paralela situada a un metro con diez centímetros (1.10 m) del borde superior [1].

- *Manual de Señalización Vial 2015:* no presenta método para evaluar las DVA disponibles, presenta valores de la distancia de visibilidad del sector, teniendo en cuenta el percentil 85 de la velocidad, determinada mediante un estudio de ingeniería de tránsito, o la velocidad de diseño del sector, para vías nuevas.
- *Otros métodos:* Cuando la carretera ya está construida y se encuentra en la etapa de señalización, antes de ponerla en funcionamiento se pueden emplear otros métodos, como caminar sobre la vía para hacer el análisis de visibilidad directamente en ella o calculando las DVA disponibles a partir de videologs o fotologs de la carretera [22].

3. SEÑALIZACION DE LA LÍNEA CENTRAL DE LA CARRETERA

En la carretera se debe indicar que está permitido o prohibido el adelantamiento por medio de señalización horizontal o vertical. Las marcas viales del piso en el eje de la vía con línea continua indican que es prohibida la maniobra y con línea discontinua se indica que está permitida; así deberá existir demarcación para los dos sentidos viales.

El inicio de una zona de no adelantamiento debe hacerse visible durante la maniobra para proporcionar una señal similar a la luz amarilla de advertencia de las señales de tráfico y debe exigir una acción segura y razonable por parte del conductor.

La longitud mínima de una zona de adelantamiento debe ser de al menos 400 pies (121,92 m) para cualquier carretera con velocidades de diseño de 60 mph (96,56 km/h) [20].

El Manual de señalización Vial 2015 establece una longitud de adelantamiento prohibida mínima de acuerdo a la velocidad de operación.

4. METODOLOGÍA

Se hizo revisión bibliográfica internacional para conocer sobre las diferencias entre las DVA obtenidas en los manuales de señalización y en los manuales de diseño geométrico de Alemania, Australia, Austria, Canadá, España, Estados Unidos, Grecia, México, Reino Unido, entre otros.

Se revisaron los manuales que contienen procedimientos para evaluar la DVA en carreteras de dos carriles en Colombia, y se encontraron diferencias entre ellos.

Con el fin de evaluar si las diferencias entre los manuales colombianos son significativas en la demarcación final de la carretera, se seleccionó una vía del orden nacional ubicada en el departamento de Antioquia, Túnel de Occidente - San Jerónimo, la cual tiene características muy uniformes durante todo el trayecto, desde su punto inicial a la salida del Túnel Fernando Gómez Martínez hasta el punto final en el paso por la Quebrada la Muñoz en el municipio de San Jerónimo, y tiene 19,4 kilómetros, con curvas horizontales espiralizadas en un terreno montañoso.

La vía consta de dos carriles con berma de 1,30 m a cada lado y cunetas de 1,00 m. La velocidad de diseño es de 60 km/h, y la pendiente promedio de la vía es de 7,3 %. Tiene taludes con inclinación entre 45° y 60° [23].

En los planos de planta-perfil de esta carretera se aplicó el procedimiento establecido en el Manual de Diseño Geométrico de Carreteras 2008 para medir las DVA disponibles; se obtuvo la DVA requerida para entretangencias y curvas horizontales según este mismo manual, y así, al compararlas, se obtuvieron los tramos de permitido y prohibido adelantar.

Como la carretera en estudio se encuentra en funcionamiento, para aplicar el Manual de Señalización Vial, fue necesario medir la velocidad de operación; para lo cual se escogieron cuatro tramos donde se realizaron estas medidas en automóviles y se obtuvo el valor del percentil 85 en cada uno de ellos. Posteriormente se ajustaron estos valores con los datos tomados con radar en un trabajo de grado de la especialización en vías y transporte de la Universidad de Medellín [24], y así se obtuvo la DVA.

Con este valor se realizó el análisis de visibilidad, se comparó con el obtenido por el Manual de Diseño Geométrico de Carreteras, para hacer recomendaciones sobre la aplicación de estos dos manuales.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al aplicar el método del Manual de Diseño Geométrico de Carreteras se midieron las DVA disponibles, que a su vez se compararon con las DVA requeridas obtenidas para este manual y para el Manual de Señalización Vial, y así finalmente se determinaron los tramos donde es posible adelantar según cada uno de ellos. Se observan grandes diferencias. La mayoría de los tramos donde es posible adelantar según este último no es permitido según el análisis de visibilidad del primero, dado que la DVA requerida en el manual de diseño es mucho mayor que el doble de la DVA requerida por el Manual de Señalización Vial.

Cuando se va a obtener el valor de la DVA requerida en el Manual de Diseño Geométrico es necesario ingresar a la tabla 2.9 con el valor de la velocidad de la entretangencia horizontal donde se efectúa la maniobra (VETH); para realizar el análisis de visibilidad en las curvas horizontales no se encontró un procedimiento para obtener DVA requerida, tal vez asumiendo que en ellas no se permite adelantar. En este trabajo, dicho análisis se realizó midiendo la DVA disponible de la misma forma que en la recta, y para la DVA requerida se utilizaron los valores asignados para la velocidad específica de la entretangencia horizontal anterior a la curva en la que se hace la verificación. Otra forma de evaluar la visibilidad en curvas horizontales podría ser como lo hace el Manual de Diseño Geométrico para el valor de la flecha (M) con el fin de proveer la distancia de visibilidad de parada; este mismo análisis puede hacerse con la DVA.

Como en algunas de las curvas no hay obstrucción de visibilidad por talud de corte, se cumple con la DVA requerida para adelantar, y si al realizar la verificación en el perfil no hay restricciones, el resultado final es un tramo en curva horizontal con posibilidad de adelantar. Se debe tener cuidado con esa visual utilizada para medir la DVA disponible, debido a que si atraviesa terreno que no pertenece a la zona o derecho de vía (por ser este de uso privado), se pueden presentar construcciones u otras obstrucciones en el futuro. Por tanto, no será aconsejable señalar con línea continua este tramo.

Los valores de las DVA requeridas que se obtuvieron del Manual de Señalización Vial 2015, para cada uno de los valores del percentil 85 de las velocidades de los automóviles tomadas a flujo libre, se pueden ver en la tabla 1.

TABLA 1. VALORES DE DVA OBTENIDOS EN EL MANUAL DE SEÑALIZACIÓN VIAL 2015 SEGÚN VELOCIDADES MEDIDAS EN LA VÍA

Tramo	Percentil 85 de velocidad (km/h)	DVA (m) requerida
Recta en descenso km13 + 430. Restaurante El Mono II.	84	254
Recta en ascenso km13 + 430. Restaurante El Mono II.	91	282
Curva horizontal en descenso. km14 + 020. Q. San Juana II	68	200
Curva horizontal en ascenso km14 + 020. Q. San Juana II	83	252

Los valores de las velocidades en descenso presentaron una diferencia de 1 km/h con los tomados en 2010 por la ingeniera Castillo [24], por tanto fueron utilizados para obtener la DVA de este manual; para los datos de ascenso se comparaban y se escogían los datos de mayor valor, que serían los de la situación más desfavorable. En algunos tramos donde solo se disponía de los datos de velocidad tomados por la ingeniera Castillo, estos fueron los utilizados para obtener la DVA requerida según el Manual de Señalización Vial 2015.

Al realizar la verificación de la DVA disponible en los planos de la rasante, tal como lo exige el procedimiento del Manual de Diseño Geométrico de Carreteras, dio como resultado unos tramos muy largos donde es posible adelantar. Lo anterior se presentó porque las curvas verticales no presentan interferencia de visibilidad por tener una diferencia de pendientes de entrada y salida muy pequeña, tal como se aprecia en la figura 2, y en las rectas verticales la tangente es paralela al eje de la vía y la visual muy extensa, es decir, la DVA disponible es muy larga, como se aprecia en la tabla 2.

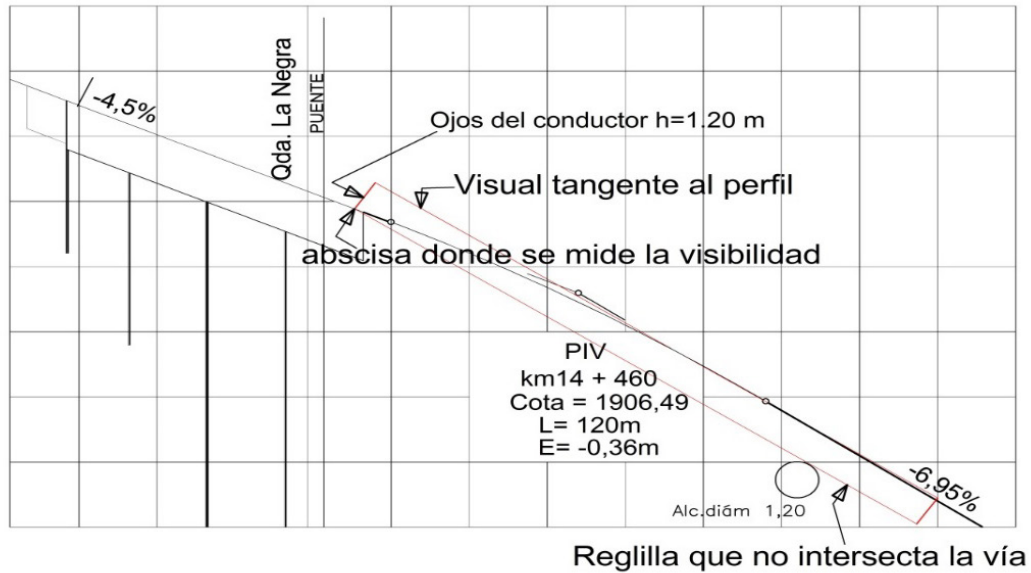


FIGURA 2. ANÁLISIS DE LA DVA EN PLANO DE PERFIL DE LA VÍA TUNEL DE OCCIDENTE - SAN JERÓNIMO

Se combinaron los análisis de visibilidad del alineamiento vertical y horizontal para determinar los tramos donde es posible adelantar según cada uno de los manuales para el tramo desde km 4 + 000 hasta km 4+500 que tiene $V_{ETH} = 70$ km/h (DVA requerida = 482 m según el Manual de Diseño Geométrico) y la velocidad de operación medida en ese tramo fue de 79,65 km /h (DVA requerida de 240 m según el Manual de Señalización Vial). Los resultados se pueden ver en la tabla 2.

TABLA 2. RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LA DVA CALCULADA
CON EL MANUAL DE DISEÑO GEOMÉTRICO DE CARRETERAS 2008 Y
CON EL MANUAL DE SEÑALIZACIÓN EN LA VÍA DE ESTUDIO

Evaluación de dva en sentido túnel de occidente-San Jerónimo según manual de señalización			Evaluación de dva en sentido túnel de occidente-San Jerónimo según manual de diseño geométrico		
ABSCISA	DVA. Disponible	Demarcación horizontal	ABSCISA	DVA. Disponible	Demarcación horizontal
km 4+0	273*	Línea Discontinua	km 4+0	276	Línea Continua
km 4+25	272*	Línea Discontinua	km 4+25	274	Línea Continua
km 4+50	268*	Línea Discontinua	km 4+50	270	Línea Continua
km 4+75	267*	Línea Discontinua	km 4+75	269	Línea Continua
km 4+100	262*	Línea Discontinua	km 4+100	265	Línea Continua
km 4+125	323	Línea Discontinua	km 4+125	364	Línea Continua
km 4+150	318	Línea Discontinua	km 4+150	327	Línea Continua
km 4+175	307	Línea Discontinua	km 4+175	316	Línea Continua
km 4+200	301	Línea Discontinua	km 4+200	306	Línea Continua
km 4+225	290	Línea Discontinua	km 4+225	297	Línea Continua
km 4+250	270	Línea Discontinua	km 4+250	277	Línea Continua
km 4+275	245	Línea Discontinua	km 4+275	250	Línea Continua
km 4+300	318	Línea Discontinua	km 4+300	324	Línea Continua
km 4+325	304	Línea Discontinua	km 4+325	309	Línea Continua
km 4+350	260	Línea Discontinua	km 4+350	267	Línea Continua
km 4+375	245	Línea Discontinua	km 4+375	251	Línea Continua
km 4+400	216	Línea Continua	km 4+400	221	Línea Continua
km 4+425	197	Línea Continua	km 4+425	203	Línea Continua
km 4+450	190	Línea Continua	km 4+450	197	Línea Continua
km 4+475	182	Línea Continua	km 4+475	189	Línea Continua
km 4+500	177	Línea Continua	km 4+500	185	Línea Continua

*La DVA disponible está restringida por el perfil.

Dado que hay un solo procedimiento para el análisis de visibilidad en planta y en perfil (el establecido por el Manual de Diseño Geométrico) y que la altura de los ojos del conductor y del vehículo y la visual de los conductores con los que se hace la medición, no cambian mucho entre cada uno de los manuales; las DVA disponibles que se miden en cada abscisa no tienen diferencias significativas. Es así como la decisión sobre cuál de los dos manuales es mejor utilizar para proyectar mejor la señalización de dos carriles en Colombia resulta de la comparación de las DVA calculadas.

En Colombia, los adelantamientos de autos adelantando autos y autos adelantando camiones son los más frecuentes. Si se tiene en cuenta el valor de la brecha crítica hallado en Colombia de 18 segundos para el primer caso y 15 segundos para el segundo [8], y con estos valores calculamos DVA mínima o crítica para la velocidad de operación medida en cada tramo, obtenemos los valores de la tabla 3.

TABLA 3. COMPARACIÓN DE DVA REQUERIDAS SEGÚN MANUALES Y ESTUDIO COLOMBIANO

Velocidad Operación Vop (km/h)	DVA según Manual de Señalización (m)	DVA Mínima (Con Brecha Crítica y Vop) (m)		VETH (k/h)	DVA según Manual de Diseño (m)
		Auto adelantando Auto	Auto adelantando Camión		
84	254	420	350	60	407
91	282	455	379	60	407
68	200	340	283	60	407
83	252	415	345	60	407

Al comparar los valores se observa que la DVA, según el Manual de Diseño Geométrico, es el valor que más se aproxima a los valores de DVA mínima hallados con la brecha crítica de 15 segundos obtenida en Colombia para auto adelantando auto y de 18 segundos para auto adelantando camión [8]. Al analizar el procedimiento para hallar la V_{ETH} con la cual se halla la DVA, se ve que la pendiente no es tenida en cuenta, ni la velocidad de operación. Además, el valor de referencia tomado para esta comparación a veces está por encima, con máximo 48 metros de diferencia, y a veces por debajo, con 124 m.

Después de realizar la medición de las DVA disponibles en planos de planta se propone en las secciones en corte, donde haya interferencia del talud con la visibilidad, trazar en lugar de la línea o traza del talud a 1,23 m sobre la calzada, como lo define el Manual de Diseño Geométrico de Carreteras; una línea conformada por los puntos que determinen en cada abscisa evaluada de la carretera a qué distancia horizontal

se encuentra la obstrucción del talud (S), según su inclinación y considerando altura de los ojos del conductor de 1,10 m. Esta distancia S es medida desde el fondo de la cuneta hasta donde se encuentra la interferencia de visibilidad por el talud, como se indica en la figura 3.

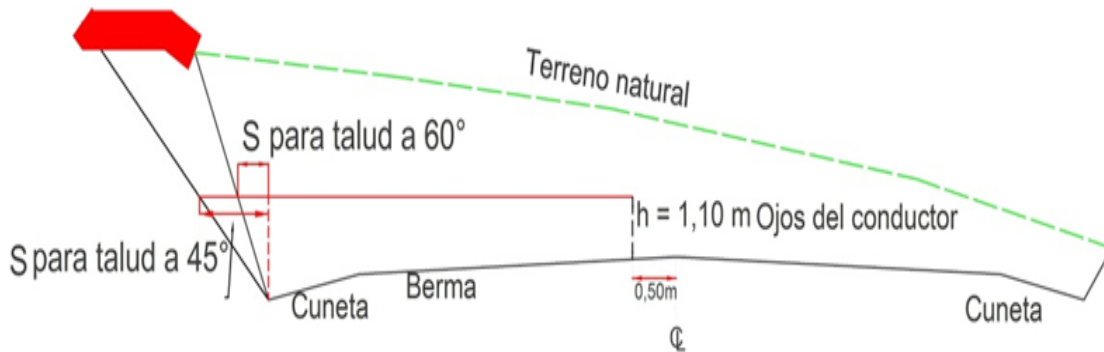


FIGURA 3. PROPUESTA DE TRAZO DE LA DISTANCIA **S** EN LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE UNA ABCISA PARA REPRESENTAR EN PLANTA LA LÍNEA DE INTERFERENCIA DEL TALUD

6. CONCLUSIONES

A partir del caso aplicado en la vía de estudio se puede concluir que ninguno de los dos manuales colombianos es recomendable utilizar para demarcar el piso en carreteras de dos carriles; esto dadas las grandes diferencias entre ellos, siendo cada uno un valor muy extremo que no corresponde con las condiciones de Colombia.

En este estudio se tomó como referencia los tiempos medidos y calculados por el doctor Víctor Gabriel Valencia Alaix para la maniobra de adelantamiento en la vía Cali - Popayán, pero es de anotar que en estudio realizado por el mismo y demás integrantes de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín se advierte la necesidad de crear para Colombia un modelo de la maniobra de adelantamiento en carreteras de dos carriles y, consecuentemente, criterios para su diseño geométrico y señalización dada su elevada importancia en la seguridad vial [25].

Es de anotar que en la mayoría de las carreteras de dos carriles de Colombia se presentan diferentes tipos de adelantamientos en los que el vehículo adelantado y adelantante puede ser auto, bus o camión, presentándose 9 posibles casos. Es por esto que las normas vigentes en los manuales de señalización y diseño vial no son las adecuadas, dado que los requerimientos planteados en ellos son los de los manuales

de Estados Unidos, que son medidos para un solo tipo de maniobra, la de auto adelantando auto en A Policy on Geometric Design of Highways and Streets del 2001 y la maniobra de camión adelantando camión en el Manual on Uniform Traffic Control Devices (MUTCD) 2004 Edition.

Como consecuencia de lo anterior, las diferencias entre los manuales de diseño geométrico de carreteras y de señalización en Colombia son las mismas que las presentadas en los respectivos compendios de los Estados Unidos que han servido de apoyo a los manuales colombianos y que se evidencian en el numeral C (Cálculo de la Distancia de Visibilidad de Adelantamiento), por tanto se recomienda incorporar en la normatividad de Colombia los estudios locales.

En Colombia se han realizado estudios sobre la distancia que requiere un auto para adelantar a otro, y en algunas carreteras de dos carriles se dispone de dicha distancia; por tanto se sugiere permitir solamente este tipo de adelantamiento y señalizarlo muy bien.

En el diseño del alineamiento vertical de la carretera es más simple garantizar la distancia de visibilidad de adelantamiento requerida que en el alineamiento horizontal. Esto se logra con unas longitudes de curva vertical que satisfagan esta condición. Es de anotar que en el Manual de Diseño Geométrico de Carreteras de 2008 no se presenta el análisis de las longitudes mínimas de curva vertical que cumplan con la DVA requerida. Se recomienda incluir en él los dos casos de análisis al respecto cuando la longitud de curva vertical es mayor que la Distancia de Visibilidad de Adelantamiento y cuando es menor.

En curvas verticales cóncavas se encuentra un vacío en cuanto al procedimiento para medir la DVA disponible en planos de perfil. En ninguno de los dos manuales colombianos hay información al respecto. Se debe tener en cuenta que la visibilidad en estas curvas está restringida en horas de la noche y está limitada por el alcance de las luces del vehículo.

No es posible estudiar el tema de la aplicación de la DVA en planos de perfil aisladamente de la determinación de las longitudes mínimas de curva vertical, que permiten el adelantamiento para el diseño geométrico de carreteras de dos carriles, porque en estos dos análisis hay aspectos involucrados de la maniobra que son comunes, como la altura de los ojos del conductor considerada en el Manual de Diseño geométrico de carreteras (para el primer caso en 1,10 m y en el mismo manual para el segundo caso utilizan 1,08 m). Es de anotar que en el Manual de Señalización Vial, la altura de los ojos del conductor es de 1.20 m.

Realizar el análisis de visibilidad de adelantamiento directamente en la carretera construida tiene muchas ventajas, especialmente la ubicación en tres dimensiones del proyecto con todos sus elementos tanto de diseño como del terreno, pero se debe

realizar una vez terminada la etapa de pavimentación de la carretera, porque después requiere de cierre total de la vía.

REFERENCIAS

- [1] Ministerio de Transporte, *Manual de Diseño Geométrico de Carreteras*, Bogotá: Invías, 2008.
- [2] Ministerio de Transporte, *Manual de Señalización vial, Dispositivos uniformes para la regulación del tránsito en calles, carreteras y ciclorutas de Colombia*. Bogotá: Invías, 2015.
- [3] B. E. Pineda Uribe, “Importancia de la Maniobra de adelantamiento en carretera de dos carriles”, *Revista Politécnica*, vol. 7, n.º 13, pp. 49-62, 2011.
- [4] W. Weber, “Passing sight distance and no-passing zones present practice in the light of needs for revision”, *ITE Journal*, vol. 48, n.º 9, pp. 14-18, 1978.
- [5] A. M. T. y A. G. Carlos Llorca, “Revisión de criterios de distancia de visibilidad de adelantamiento”, *Cuadernos Tecnológicos de la Plataforma Tecnológica Española de la Carretera (PTC)*, 2014.
- [6] Instituto Nacional de Vías, *Manual de Capacidad y Niveles de Servicio*. Popayán : Invías, 1996.
- [7] Transportation Research Board, *Highway Capacity Manual*, 2010.
- [8] V. G. Valencia Alaix, “Tesis doctoral Elaboración de procedimientos para facilitar el adelantamiento en carreteras convencionales aplicando simulación”, Universitat Politècnica de Valencia, 2016.
- [9] AASHTO, *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*, Transportation Officials, 2011.
- [10] M. L. a. B. F. Abishai Polus, “Evaluation of passing process on two lane rural highways”, *Transportation research Record*, vol. 1701, n.º 00-3256, pp. 53-57. 2000
- [11] J. C. Glennon, “New and improved model of passing sight distance on two-lane highways”, *Transportation Research Record*, n.º 1195, pp. 132-137, 1988.
- [12] G. J. Forbes, “The origin of minimum passing sight distances for NO-passing zones”, *ITE journal*, pp. 20-24, 1990.
- [13] J. M. a. L. R. R. Jenkins, “Classifying passing maneuvers: a behavioral approach”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, pp. 12-21, 2005.
- [14] D. W. ., S. C. Harwood, “Passing sight distance criteria”, *Transportation Research Board*, vol. 605, 2008.

- [15] A. M. T. A. M. P. Z. F. J. C. T. Carlos Llorca, “Múltiple Passing MAneuvres: New design and marking criteria to improve safety”, in *International Conference Road Safety and Simulation*, Rome, 2013.
- [16] B. E. P. Uribe, “La maniobra de adelantamiento en carreteras de dos carriles”, *Revista Politécnica*, n.º 13, pp. 22-30, 2011.
- [17] M. G. Romana, “Passing Activity on Two- Lane Highways in Spain”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n.º 1678, pp. 90-95, 1999.
- [18] L. E. G. & K. Moreno Ana Tsui, “Evaluación de medidas de desempeño del tráfico”, en *Proceedings of XI Congreso de Ingeniería del Transporte (CIT 2014)*, Santander, España, 2014.
- [19] C. Llorca, A. Tsui Moreno & A. García, “Multiple passing maneuvers: New Design and marking criteria to improve safety”, in *Road Safety and Simula*, Rome, 2013.
- [20] S. R. Namala & M. J. Rys, “Automated calculation of passing sight distance using global positioning, system data, Kansas”, Report n.º K-TRAN:KSU-03-2, 2006.
- [21] X. Yan et al., “Evaluation of Dynamic Passing Sight Distance Problem Using a Finite-Element Model”, *Journal of Transportation Engineering*, vol. 134, n.º 6, pp. 225-235, 2008.
- [22] R. y. H. J. Brown, “Determining the best method for measuring no-passing zones”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n.º 1701, pp. 61-67, 2000.
- [23] L. A. M. Verdeza, “Trabajo de grado “Aplicación de la DVA en planos de planta perfil en carreteras de dos carriles. Estudio de caso vía Túnel de Occidente – San Jerónimo”. Medellín, 2017.
- [24] P. A. C. R. y. J. A. M. Marín, “Velocidades de Tránsito para carreteras en Colombia aplicado a la Vía Túnel de Occidente - San Jerónimo”, Tesis de Especialización en Vías y Transporte, Universidad de Medellín, 2010.
- [25] V. A. Víctor et al., “Revisión de Documentos Técnicos de Carreteras bajo el Enfoque de la Seguridad Vial”, Fondo de Prevención Vial y Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2012.