

3 DISEÑO GEOMÉTRICO

3.1 ASPECTOS GENERALES

3.1.1 Significado del adjetivo ‘geométrico’

El proyecto de una obra vial es un proceso creativo por el cual se conciben los medios adecuados para satisfacer una necesidad, utilitaria o estética, relacionada con el transporte de bienes y/o personas. Es una etapa intermedia entre la intención y la concreción, entre el diseño y la realización, entre la planificación y la construcción; su esencia son las ideas y capacidades creativas del proyectista.

En apoyo de su cometido, el proyectista cuenta con diversos elementos, herramientas y técnicas auxiliares, entre las que se destacan las representaciones, imágenes sustitutas de la realidad futura.

El diseño “geométrico” comprende el diseño de todas las características visibles de un camino. La “geometría” es una herramienta más que permitirá la ubicación espacial de cada uno de los puntos de esas imágenes o representaciones gráficas del futuro camino.

La aplicación de la matemática en el diseño tiene el propósito de dar a conocer a otros por medio de relaciones numéricas y representaciones cuál es la idea del proyectista. No hay que pensar que el diseño geométrico vial es sólo el manejo matemático de curvas, aplicación de gráficos, fórmulas o procedimientos estereotipados.

El proyectista vial, aparte de sustentar su tarea en una sólida formación teórica y conocimiento de esos recursos tácticos, debe proponerse dar cauce a otras aptitudes personales más valiosas que lo distinguirán: creatividad, imaginación, sentido común. Hasta ahora, los programas viales en uso no proyectan, sino que ayudan al proyectista a estudiar múltiples opciones en mínimo tiempo, y a representarlas gráfica y numéricamente con superior precisión. Su uso sin capacitación previa ni juicio ingenieril apropiado pueden conducir a proyectar más rápido, pero peor.

Lamentablemente, el diseño “geométrico” tiene el lastre de este último adjetivo; a pesar del cual no consiste en resolver rutinariamente problemas de geometría elemental o analítica, o en atenerse estrictamente a un recetario de valores dados por las normas en tablas y gráficos, y aceptados sin discernir previamente su conveniencia según las condiciones específicas del lugar o tipo de camino a diseñar.

Por ejemplo, no tiene sentido diseñar una clotoide según el estricto valor de longitud mínima dado por un programa o gráfico, sino que el redondeo del valor hallado en metros (1 m p. ej.), es altamente recomendable; y si condiciones locales conducen a adoptar un valor menor que el mínimo deseable o incluso al mínimo absoluto, hacerlo sin complejo de culpa: ortodoxia no significa dogmatismo fanático.

3.1.2 Modelos matemáticos

El diseño geométrico usa formulaciones matemáticas -modelos matemáticos- aplicados a datos de fenómenos naturales y comportamientos humanos, basados en técnicas estadísticas. Su capacidad de prever resultados acordes con la realidad depende de numerosos factores; entre los principales: tamaño y calidad de la muestra de datos, y perspicacia y experiencia del analista. Así, las matemáticas ayudan a predecir cómo probablemente se comportará el objeto en diferentes condiciones; p. ej., la distancia necesaria para detener un vehículo con determinada velocidad inicial y condiciones del conductor y de fricción neumático-calzada se 'calcula' con un modelo de apariencia científica aplicando la respuesta humana ante la aparición de un obstáculo en la calzada, y el principio de conservación de la energía.

Por la sustitución del objeto real por el modelo correspondiente, aparece la posibilidad de formular su estudio como un problema matemático universal, que no depende de la naturaleza concreta del objeto.

Para resolver un problema matemático es importante indicar un sistema de reglas, algoritmo que dé una sucesión estricta de operaciones matemáticas que lleven al resultado buscado; p. ej. el cálculo de la distancia visual de detención. De la observación del modelo respecto de la realidad, se realizan los correspondientes ajustes del modelo, generalmente mediante coeficientes, hasta llegar a resultados coherentes con la realidad.

3.2 DISTANCIAS VISUALES

3.2.1 Consideraciones generales

Una de las características que más contribuye a la circulación segura, libre de sorpresas y tensiones es contar continuamente con la debida visibilidad para poder anticipar cómo de manera distinta las maniobras a realizar. La trayectoria y velocidad de los vehículos sobre los caminos están sujetas al control de los conductores cuya pericia, entrenamiento, y experiencia son muy variadas.



Distancia visual es la longitud continua, medida sobre la trayectoria normal de marcha de una calzada, hasta donde el conductor de un vehículo ve la superficie de la calzada o un objeto de una altura especificada por encima de la calzada, cuando la visibilidad no esté obstruida por el tránsito. (HCM)

Por seguridad, el proyectista debe proveer distancia visual de suficiente longitud para que los conductores controlen la operación de sus vehículos y así disminuir la tasa de accidentes al menor valor posible. Por ejemplo, frenar y no chocar contra un objeto que se encuentre en la calzada húmeda o en sus costados, o adelantarse a otro vehículo, o tomar una decisión adecuada ante varias opciones complejas.

Los criterios para proveer estas distancias visuales mínimas y proyectar alineamientos para caminos rurales con la mínima visibilidad se describen en este capítulo. Las condiciones especiales relativas a las distancias visuales en las intersecciones se tratan en el Capítulo Intersecciones.

Las distancias visuales mínimas que define esta norma son:

- Distancia visual de detención (DVD)
- Distancia visual de adelantamiento (DVA)
- Distancia visual de decisión (DVDE)

3.2.2 Distancia visual de detención (DVD)

Es la distancia que requiere un conductor de habilidad media manejando a la velocidad directriz un vehículo en condiciones mecánicas aceptables sobre calzada húmeda, desde el instante en que observa un obstáculo imprevisto en el camino hasta el momento en que se detiene completamente delante del obstáculo por aplicación de los frenos. (HCM)

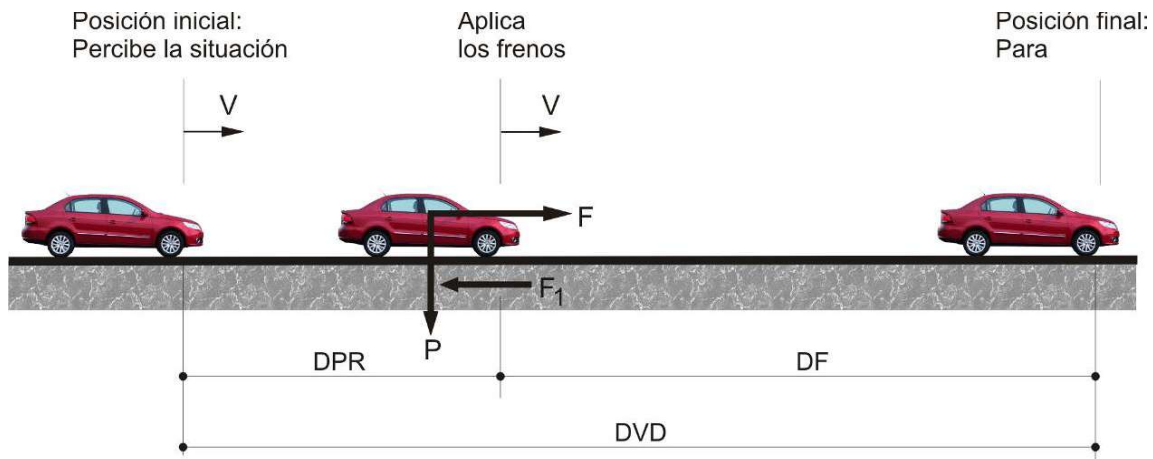


Figura 3.1 Distancia visual de detención (DVD)

Modelo de AASHTO

La DVD comprende dos componentes relacionados con operaciones del conductor:

- *La distancia de percepción y reacción (DPR)*: distancia recorrida a velocidad uniforme, velocidad directriz V , durante el lapso en que el conductor advierte el peligro y reacciona para aplicar los frenos (concepto cinemático).
- *La distancia de frenado (DF)*: distancia recorrida en movimiento uniformemente desacelerado, durante el frenado en calzada húmeda hasta la detención frente al obstáculo (concepto dinámico)

La expresión general es:

$$DVD = DPR + DF$$

Distancia de percepción y reacción (DPR)

Se adopta un lapso de 2,5 segundos como TPR, según modelo de AASHTO. La distancia recorrida durante el TPR es la $DPR = V \times TPR$

Distancia de frenado (DF)

- **Coefficiente de fricción longitudinal húmeda (fl)**

El coeficiente fl es una resultante del modelo adoptado, y se lo supone constante durante el frenado, pero variable con la velocidad inicial del frenado. Es un valor representativo de la fricción entre neumáticos y calzada, y engloba las resistencias del aire, rodamiento, e interna del motor y engranajes.

La Tabla 3.1 muestra los valores de fl adoptados; según se observa a mayor velocidad, la fricción longitudinal disminuye.

Al solo efecto de incluirla en un programa, por regresión se obtiene una función entre fl y V:

$$fl = \frac{1,021}{V^{0,274}}$$

Tabla 3.1
fl función de V

V km/h	fl -
25	0,42
30	0,40
40	0,37
50	0,35
60	0,33
70	0,32
80	0,31
90	0,30
100	0,29
110	0,28
120	0,27
130	0,27
140	0,26

- **Cálculo de la DF**

Igualando la energía cinética del vehículo que circula a la velocidad directriz, con el trabajo de fricción longitudinal entre neumático y calzada, suponiendo fl constante durante el frenado, se obtiene:

$$\frac{v^2}{2g} = \frac{V^2}{2g \times 3,6^2} = DF \times fl$$

Donde:

v: velocidad directriz en m/s

V: velocidad directriz en km/h

g: aceleración de la gravedad 9,8 m/s²

TPR: tiempo de percepción y reacción, 2,5 s

$$\Rightarrow DF = \frac{V^2}{254 \times fl}$$

DVD en horizontal

La DVD es la suma de la distancia de percepción y reacción (DPR) y la distancia de frenado (DF):

$$DVD = \frac{V \times 2,5}{3,6} + \frac{V^2}{254 \times fl}$$

DVD en pendiente longitudinal

La expresión de la distancia visual mínima de detención es:

$$DVD = \frac{V}{1,44} + \frac{V^2}{254 \times (f \pm i)}$$

Donde:

i: pendiente longitudinal, formato decimal

En calzadas de un solo sentido se considera subidas con valor positivo y bajadas con valor negativo. En calzadas de dos sentidos, se considera la situación más desfavorable, siempre negativa, para subida y para bajada.

En la Tabla 3.2 se indican las DVD para distintas velocidades directrices considerando pendiente nula; para pendientes positivas, subidas, y negativas, bajadas, se indican los coeficientes que deben aplicarse a la DVD de pendiente nula:

Tabla 3.2 Distancias visuales mínima de detención (DVD), en función de V y de la pendiente

V km/h	Calzada de dos o un sentido										Calzada de un sentido										
	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
25	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	24	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
30	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	30	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9
40	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	45	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9
50	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0	63	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
60	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0	85	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
70	1,3	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0	110	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
80	1,3	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0	138	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
90	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0	170	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8
100	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	206	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8
110	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,0	246	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8
120	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,0	290	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8
130	1,4	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,0	339	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8
140	1,5	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,0	391	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8

DVD para conductores ancianos

Estadísticamente, la expectativa de vida aumenta y consecuentemente la población de conductores envejece, lo cual justifica nuevas pautas de diseño. Es normal que los conductores ancianos tengan problemas de conducción, dadas las conocidas alteraciones en las áreas relacionadas con lo perceptivo, cognitivo, y psicomotor, lo cual presenta muchos desafíos a los proyectistas, quienes deben garantizar la seguridad del sistema mientras aumentan la eficiencia operativa. Por ejemplo, el valor de Tiempo de Percepción y Reacción de 2,5 segundos, propuesto por AASHTO y adoptado por esta norma colabora en ese sentido. AASHTO pronostica que en el futuro este tiempo aumentará por el envejecimiento natural de la población.

DVD en bajadas

Algunas situaciones deben ser analizadas con precaución. En bajadas, las velocidades de camiones pueden tener valores superiores respecto a la de los vehículos de pasajeros por lo cual debería intentarse dar una DVD superior al mínimo valor. En especial cuando las restricciones se producen especialmente en los extremos de las bajadas.

3.2.3 Distancia visual de adelantamiento (DVA)

Distancia visual de adelantamiento. En caminos indivisos de dos carriles y dos sentidos, es la mínima distancia visual suficiente y necesaria que, invadiendo el carril de sentido contrario, permita al conductor de un vehículo adelantarse a otro que circula más lentamente por su mismo carril, sin interferir la velocidad y trayectoria de un tercer vehículo que avance en sentido contrario, si apareciera a la vista una vez iniciada la maniobra.

La DVA para usar en el diseño de caminos indivisos de dos-carriles debería determinarse sobre la base de la longitud necesaria para completar seguramente las maniobras normales de adelantamiento. Las maniobras extraordinarias se ignoran y las distancias de adelantamiento se desarrollan usando velocidades y tiempos observados que se ajustan a las prácticas de un alto porcentaje de conductores.

Hay ocasiones para considerar múltiples adelantamientos, donde dos o más vehículos se adelantan o son adelantados, pero no es práctico suponer tales condiciones en el desarrollo de los criterios mínimos de diseño. La distancia visual se determina para un solo vehículo que se adelanta a un solo vehículo. En el diseño se producen distancias visuales más largas, y ellas pueden acomodar un ocasional adelantamiento múltiple.

Para la determinación de las DVA mínimas el modelo (Figura 3.2) supone que:

- El vehículo adelantado viaja a la VMM
- El tiempo de percepción, evaluación de las posibilidades de adelantamiento, reacción y comienzo de la aceleración del vehículo que se adelanta (A) se estima en 4 s
- Durante el período anterior se acepta que el vehículo que se adelanta (A) circula a la misma velocidad que el vehículo que tiene adelante circulando en sentido contrario (B)
- Durante el período anterior se acepta que, además de circular ambos vehículos (A y B) a la velocidad del que va a ser adelantado (VMM), lo hacen separados por una distancia d_0 , en m
- El promedio de velocidad del vehículo que se adelanta (A), desde que inicia su desplazamiento hacia el carril izquierdo hasta que retoma el derecho, supera en 15 km/h al del vehículo adelantado (B)

- El carril izquierdo debe quedar libre en una longitud adicional d_3 tal, que permita que un tercer vehículo (C) que se aproxima en sentido contrario a igual velocidad V_2 que el vehículo que se adelanta (A), la recorra en el mismo tiempo que tarda este último en desplazarse al carril izquierdo, adelantar al vehículo más lento y retomar el carril derecho.

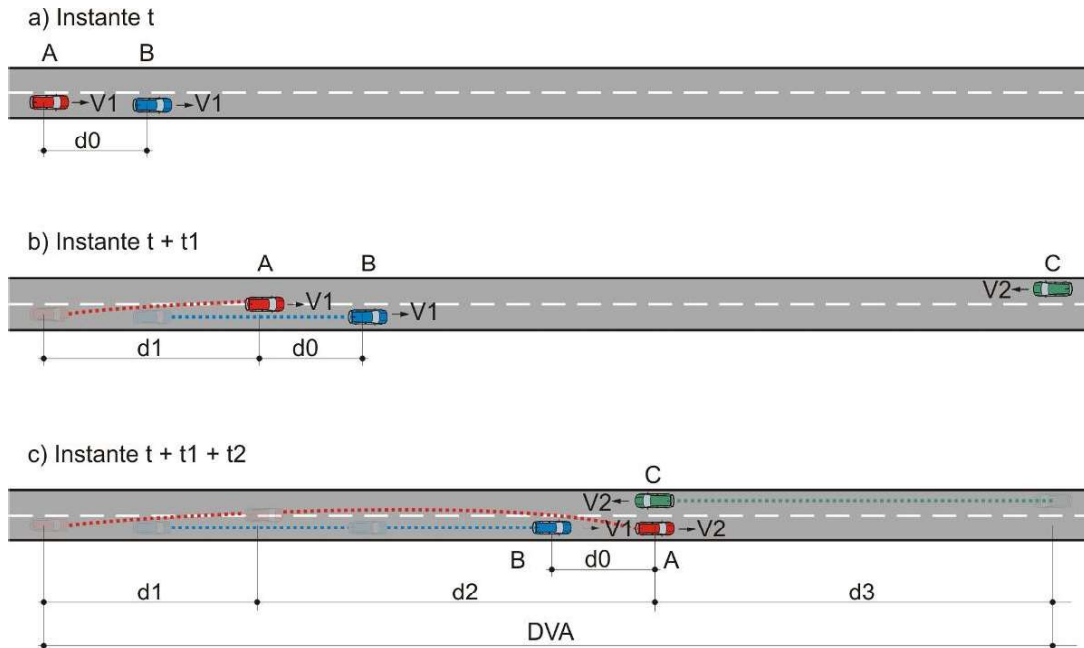


Figura 3.2 Esquema del modelo para el cálculo de la DVA

Los rangos de velocidades de los vehículos adelantados y los que se adelantan están afectados por el volumen de tránsito. Cuando el volumen de tránsito es bajo (NS A), hay pocos vehículos que necesiten ser adelantados; a medida que el volumen crece (NS D o más bajo) las oportunidades de adelantamiento disminuyen. Se supuso que la velocidad del vehículo adelantado es la VMM a un volumen cercano a la capacidad.

Estas hipótesis implican admitir que para bajas velocidades directrices el vehículo que se adelanta (A) podrá circular a velocidades algo superiores a las directrices; lo que es aceptable ya que, en general, las secciones con adelantamiento poseen características geométricas planialtimétricas que permiten la circulación a mayor velocidad.

La DVA mínima para caminos indivisos de dos carriles se determina como la suma de tres distancias, Figura 3.2. Las magnitudes que intervienen son:

V_1 : velocidad del vehículo que es adelantado (B) en km/h (VMM)

d_0 : distancia mínima entre vehículos que circulan en la misma dirección, en m

V_2 : velocidad del vehículo que se adelanta (A) en km/h (VMM + 15 km/h)

d_1 : distancia recorrida por el vehículo que se adelanta (A) durante el tiempo de percepción, decisión, reacción y comienzo de la maniobra de adelantamiento, en m

t_1 : tiempo que tarda el vehículo que se adelanta (A) en recorrer la distancia d_1 , en s

- d2: distancia recorrida por el vehículo que se adelanta (A) desde que se desplaza al carril izquierdo hasta que retoma el derecho, en m
 t2: tiempo que tarda el vehículo que se adelanta (A) en recorrer la distancia d2, en s
 d3: distancia recorrida por un vehículo que circula en sentido contrario (C) al que se adelanta, en m, durante el lapso t2

Las expresiones para el cálculo de la DVA son:

$V1 = VMM$ (km/h)	$t2 = \frac{2d0 \times 3,6}{V2 - V1}$ (s)
$V2 = VMM + 15$ (km/h)	$d1 = \frac{V1 \times t1}{3,6}$ (m)
$d0 = 0,2 V1 + 8$ (m)	$d2 = \frac{V2 \times t2}{3,6}$ (m)
$t1 = 4$ segundos (s)	$d3 = d2$ (m)

$$DVA = d1 + d2 + d3$$

Si bien los conductores, individualmente, actúan con ligeras variantes respecto al esquema de la Figura 3.2, las distancias obtenidas permiten el adelantamiento en la gran mayoría de los casos, según las experiencias de AASHTO.
 En la Tabla 3.3 se resumen los valores de DVA en función de la V

Tabla 3.3 DVA en función de la V

V km/h	Velocidad del vehículo adelantado (B) VMM km/h	Velocidad del vehículo que se adelanta (A) VMM + 15 km/h	DVA m
25	24	39	160
30	29	44	190
40	37	52	260
50	46	61	330
60	53	68	400
70	60	75	470
80	67	82	540
90	73	88	610
100	79	94	680
110	84	99	740
120	88	103	800



Usualmente, las distancias de la Tabla 3.3 permiten que un conductor se adelante con seguridad; sin embargo se recomienda proyectar longitudes mayores:

- Donde haya significativo porcentaje de vehículos pesados que requieren DVA mayores
- Para permitir el adelantamiento simultáneo de dos o más vehículos
- En subidas fuertes para realizar una maniobra de adelantamiento segura

La maniobra de adelantamiento es una de las tareas de conducción más compleja y peligrosa en un camino rural de dos carriles y dos sentidos, por lo cual es aconsejable dar tantos tramos de adelantamiento como sea factible. No es posible establecer criterios rígidos para determinar la frecuencia y longitud de los tramos de adelantamiento que debe tener un camino de dos carriles, pues depende de variables diversas:



- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Volumen de tránsito • Nivel de servicio deseado • Trazado • Configuración topográfica • Velocidad directriz | <ul style="list-style-type: none"> • Factores humanos • Longitud necesaria • Potencia vehicular • Clima |
|---|---|

Es recomendable que, en secciones de caminos indivisos de dos carriles de 3 km de largo, se proyecte el siguiente porcentaje mínimo de longitud con DVA:

- Zona llana..... 80 %
- Zona ondulada:..... 50 %
- Zona montañosa:..... 30 %
- Zona muy montañosa..... 20 %



Cuando no sea factible proveer suficientes tramos con DVA, es recomendable proyectar carriles auxiliares de adelantamiento [SS3.8.2].

3.2.4 Distancia visual de decisión (DVDE)

Usualmente, las DVD son suficientes para permitirles a los conductores razonablemente competentes y alertas llegar a una rápida detención bajo circunstancias ordinarias. Sin embargo, a menudo estas distancias son inadecuadas cuando los conductores deben tomar complejas o instantáneas decisiones, cuando la información es difícil de percibir, o cuando se requieren inesperadas o inusuales maniobras.

La limitación de las distancias visuales a las provistas para detención pueden también impedirle a los conductores ejecutar maniobras evasivas, que a menudo son menos peligrosas y preferibles a la detención.

Es decir, hay situaciones o lugares donde conviene dar distancias visuales más largas que la DVD. La DVDE provee una mayor longitud que los conductores necesitan. A veces llamada distancia visual anticipatoria, la DVDE es la distancia requerida para que:

- El conductor detecte una fuente de información difícil de percibir o condición peligrosa en la cercanía de la calzada y estime su potencial.
- Seleccione una nueva velocidad y trayectoria adecuadas e inicie y termine segura y eficientemente la maniobra requerida.

Los conductores necesitan una DVDE donde haya posibilidades de error para recibir información, para decidir o para maniobrar. Los lugares críticos son:

- Aproximaciones a intersecciones y distribuidores.
- Cambios en la sección transversal, tales como playas de peajes, principio y fin de carriles básicos y auxiliares,
- Variaciones en la velocidad directriz.
- Zonas de demanda concentrada de fuentes de información, que compiten por atención, elevando la “carga mental” del conductor como ser: elementos de calzada, tránsito opuesto, dispositivos de control de tránsito, señales de advertencia, zonas de desvío de tránsito por obras de construcción.

Los valores recomendados para la DVDE, Tabla 3.4, se obtuvieron del modelo de AASHTO 1994 maniobra de decisión C, cambio de velocidad/trayectoria/dirección en camino rural.

Tabla 3.4 Distancia visual de decisión (DVDE) en función de V

V km/h	DVDE m
25	60
30	80
40	110
50	150
60	180
70	200
80	230
90	280
100	320
110	340
120	380
130	410
140	450

