
XVI Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica 25, 26 y 27 de Junio de 2014. Alicante.

Herramienta SIG para estimar la distancia de visibilidad disponible en carreteras. Análisis de la influencia de la separación de los puntos de cálculo

A. García-Espona^a, M. Castro^a, L. Iglesias^{b*}

^aDept. Transportes, E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos, UPM

^bDept. Explotación de Recursos Minerales y Obras Subterráneas. E.T.S.I. Minas, UPM

Resumen

Se ha desarrollado una herramienta basada en ArcGIS e implementada en .NET para el cálculo, análisis y documentación de la Distancia de Visibilidad Disponible (DVD) en carretera a partir de la trayectoria del vehículo y un Modelo Digital del Terreno (MDT). Esta herramienta se integra en ArcGIS Desktop como una add-in, pudiendo añadirse a cualquier barra de herramientas como un botón. La herramienta propuesta permite determinar si los distintos puntos situados sobre la trayectoria que tiene que recorrer un vehículo son vistos desde la localización en la que se encuentra el vehículo. Para ello, se utiliza la función "GetLineOfSight" de la extensión "3D Analyst" de ArcMap. La herramienta desarrollada se ha utilizado para evaluar la influencia de la equidistancia entre los puntos de cálculo. Se ha determinado la DVD en una carretera de 14,5 km de longitud calculando para diferentes equidistancias (1, 2, 5, 10 y 20 m) y utilizando un MDT de 1 m de resolución.

Palabras clave: Distancia de Visibilidad Disponible (DVD); análisis de seguridad vial; diseño de carreteras; análisis espacial; Modelo Digital del Terreno (MDT).

* E-mail : luis.iglesias@upm.es.

1. Introducción

Uno de los parámetros a tener en cuenta en el diseño de carreteras es la Distancia de Visibilidad Disponible (DVD), esto es, la longitud del tramo de carretera que el conductor puede ver. Esta distancia, que se mide a lo largo de la hipotética trayectoria que seguiría el vehículo, es de especial importancia en maniobras peligrosas, tales como el frenado de emergencia o los adelantamientos. Los estudios relacionados con el diseño de las carreteras y la seguridad vial demandan herramientas rápidas y eficientes para la determinación de la Distancia de Visibilidad (DV).

Aunque los programas específicos para el diseño de carreteras suelen incluir módulos para el cálculo de la DV, están pensados para calcularla en fase de proyecto y no se adaptan bien al caso de carreteras existentes. En esta comunicación se propone una herramienta basada en la utilización de procedimientos SIG, utilizando cartografía convencional digitalizada y modelos digitales del terreno (MDT) para la determinación y el análisis de la DV en carreteras, que es aplicable tanto a carreteras en proyecto como a las ya construidas.

La herramienta desarrollada se ha utilizado para evaluar la influencia de la equidistancia entre los puntos de cálculo en el caso de una carretera de la Comunidad de Madrid. Para ello, se ha determinado la DVD con la herramienta para puntos equidistantes 1, 2, 5, 10 y 20 m utilizando un MDT de 1 m de resolución (MDT01).

2. Cálculo de la DVD mediante SIG

La DVD es la distancia, medida sobre la carretera a lo largo de la trayectoria, que el conductor puede ver sin que en ningún momento esa visual se vea interrumpida (Ministerio de Fomento 2000). La figura 1a representa una curva en planta de una carretera, la DVD viene dada por la longitud del arco AB, suponiendo que hay un obstáculo situado en el margen interior de la curva. La visual del conductor sería tangente a dicho obstáculo. Para ilustrar el concepto de DVD en alzado, la figura 1b representa perfil longitudinal de una carretera en una zona de un acuerdo convexo, la máxima distancia que puede ver el conductor correspondería al caso en el que la visual fuera tangente a la superficie de la carretera. Esta DVD permite al conductor obtener información en tiempo real y adaptar la conducción a las circunstancias de la carretera y su entorno.

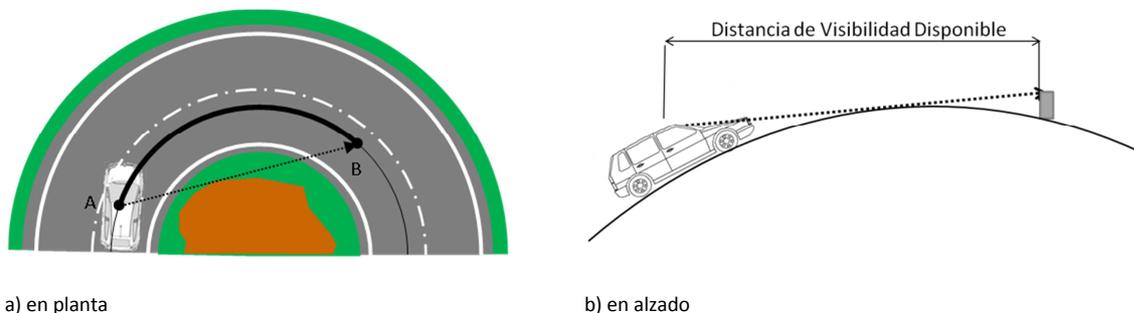


Fig. 1. Distancia de Visibilidad Disponible (DVD)

En cada punto de la carretera hay una DVD, que depende de la propia geometría de la carretera y del entorno. En los últimos años cada vez son más los investigadores que proponen la utilización de herramientas

tridimensionales para el cálculo de la visibilidad (Hassan et al. 1996; Zimmerman et al. 2005; Jha et al. 2011; Kuhn et al. 2011; Campoy-Ungría et al. 2012). La principal ventaja de la utilización de los SIG en la determinación de la DV es que permiten tener en la misma plataforma informática estos resultados y otros también relacionados con la seguridad vial, de manera que pueden realizarse fácilmente análisis más completos (Castro et al. 2008; Lamm et al. 1999; Steenberghen et al. 2004).

Para calcular la visibilidad con SIG es necesario disponer de un MDT y una polilínea vectorial que describa la trayectoria del vehículo. La trayectoria del vehículo a lo largo de la carretera se puede estimar fijando una distancia desde el borde de la calzada (Figura 2) (Ministerio de Fomento 2000). Otra posibilidad es utilizar una trayectoria real de un vehículo obtenida mediante GPS (Castro et al. 2011 y 2014a).

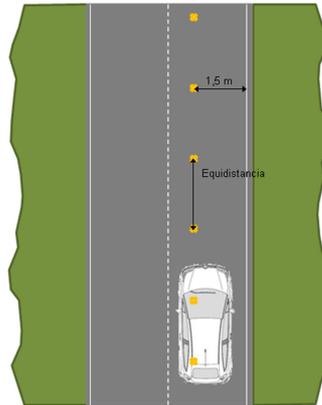


Fig. 2: Trayectoria del vehículo y equidistancia entre puntos de cálculo.

Los resultados del cálculo de la DVD pueden verse afectados por la trayectoria seguida (más o menos cercana al borde de la carretera), la altura del observador, la del obstáculo sobre la calzada, la precisión del MDT y por la equidistancia entre los puntos de la trayectoria. En los siguientes apartados se describe la investigación llevada a cabo para analizar la influencia de la distancia entre los puntos de la trayectoria.

3. Materiales y métodos

Se ha realizado un primer estudio en una carretera interurbana de 14,5 kilómetros de longitud de la Comunidad de Madrid (Figura 3). Se ha elegido esta carretera por incluir zonas de distinto tipo de relieve (llano y ondulado), con un trazado variado en el que se aprecian fenómenos de “reapariciones del trazado” (Castro et al. 2014b).

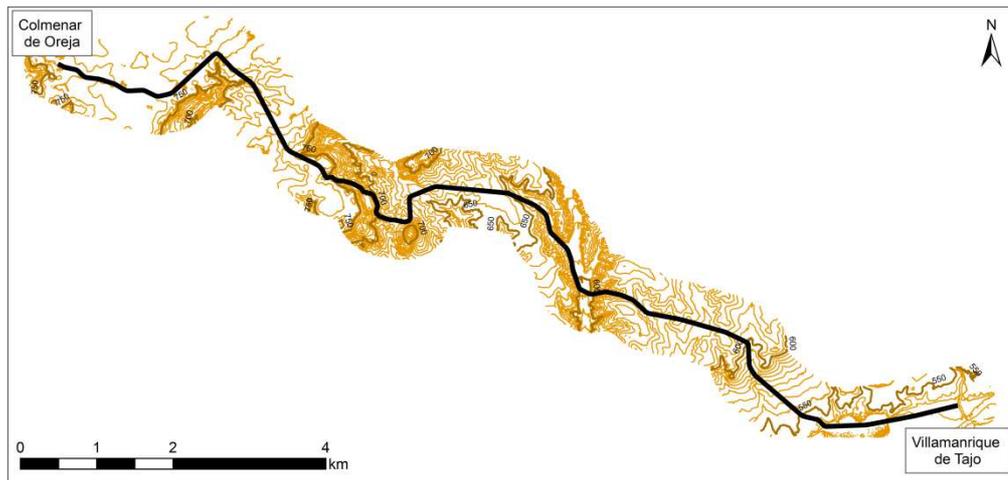


Fig. 3. Carretera de estudio

Se ha desarrollado una herramienta basada en ArcGIS e implementada en .NET para el cálculo, análisis y documentación de la DV en carretera a partir de la trayectoria del vehículo y un MDT. Esta herramienta es está integrada en ArcGIS Desktop como una add-in, pudiendo añadirse a cualquier barra de herramientas como un botón. La herramienta propuesta (que funciona dentro de Arc-GIS) evalúa para los distintos puntos situados sobre la trayectoria si son vistos desde la localización en la que se encuentra el vehículo. Para ello, se utiliza la función “GetLineOfSight” de la extensión “3D Analyst” de ArcMap. La DV se calcula determinando el primer punto situado sobre la trayectoria, que no es visible desde la localización del vehículo. Para el empleo del software, el MDT debe estar en formato TIN (Triangular Irregular Network). La trayectoria del vehículo que se emplea en el cálculo, debe estar representada por puntos (equiespaciados o no). Estos puntos pueden estar almacenados en formato Shapefile o en una tabla FeatureClass de una Geodatabase de ArcGIS. Para que se realice el cálculo correctamente, cada uno de estos puntos debe tener un atributo llamado “PK” que indique, numéricamente, su distancia al punto establecido como origen de la trayectoria (Castro et al. 2014a).

La parte inferior de la figura 4 muestra, de izquierda a derecha, la ventana de configuración visual de los resultados, la de selección de los datos que se emplean en el cálculo y el resultado del cálculo de la visibilidad disponible (en forma de diagrama de visibilidad). En la parte superior izquierda de la figura 4 se representa un temático de la visibilidad (donde aparece también, a modo de ejemplo, una visual). En la parte superior derecha se muestra el perfil longitudinal del terreno y la mencionada visual.

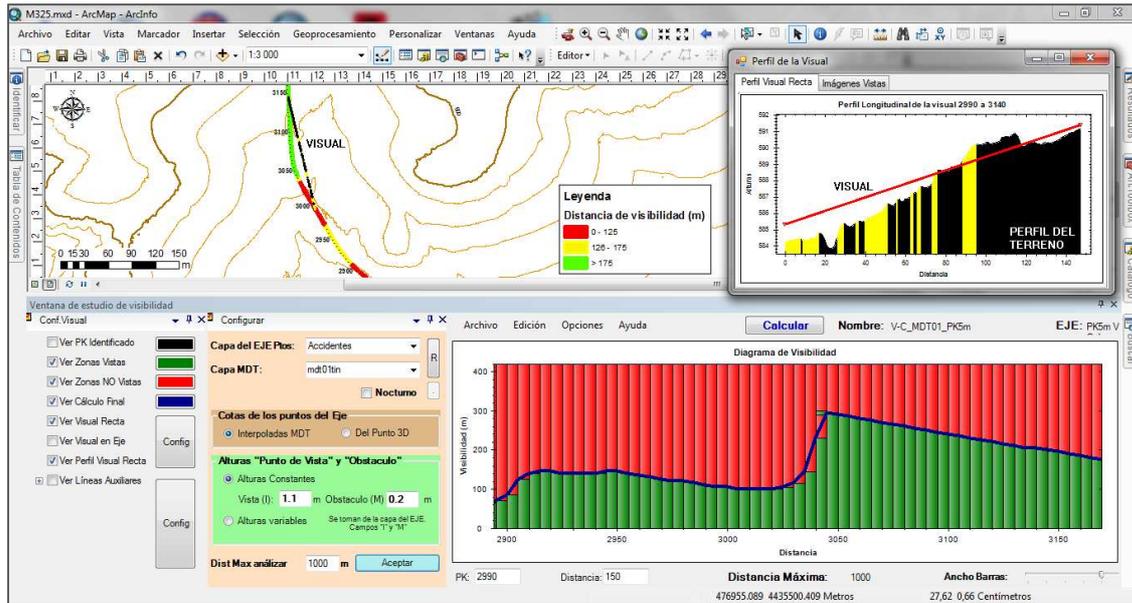


Fig. 4. Interface del software

Para evaluar la influencia de la equidistancia entre los puntos de cálculo se ha determinado la DV para puntos equidistantes a diferentes intervalos (1, 2, 5, 10 y 20 m) utilizando un MDT de 1 m de resolución (MDT01) (Instituto Geográfico Nacional). La malla de puntos original, que estaba en formato ASCII, ha sido transformada a TIN mediante las herramientas ArcTool Box. El mayor valor de equidistancia (20 m), se ha elegido por ser un valor frecuentemente empleado en estudios alemanes (Kuhn 2011). Mientras que el menor (1 m), viene dado por la resolución del MDT.

Se han empleado dos indicadores para comparar los resultados de visibilidad: el error absoluto medio (ecuación 1) y el error cuadrático medio (ecuación 2). Así mismo, se han utilizado dos test estadísticos para analizar los resultados: Mann-Whitney y Kolmogorov-Smirnov. En todos los casos se ha tomado como referencia de comparación la DV para puntos equidistantes 1 m (F12).

$$Error\ Absoluto\ Medio\ F_i = \frac{\sum |F_{12x} - F_{ix}|}{n} \tag{1}$$

$$Error\ Cuadrático\ Medio\ F_i = \sqrt{\frac{\sum (F_{12x} - F_{ix})^2}{n}} \tag{2}$$

Donde Fix es la DV para el caso i en un punto X y n es el número de puntos. F12x es la DV para el caso “base” (correspondiente a una equidistancia de 1 m).

4. Resultados y discusión

La tabla 1 muestra el Error Absoluto Medio (MAE) y el Error Cuadrático Medio (RMSE) para distintas equidistancias. En todos los casos se ha tomado como valor de referencia el correspondiente a la DVD calculada para una equidistancia de 1 m. En general, los errores en la DVD aumentan al incrementar la equidistancia entre los puntos de cálculo (Figura 5).

Tabla 1. Error Absoluto Medio (MAE) y Error Cuadrático Medio (RMSE)

Equidistancia (m)	MAE	RMSE
2	1.012	7.114
5	10.656	43.153
10	13.500	48.567
20	15.569	44.434

Además, se han realizado dos test no paramétricos: el de Mann-Whitney y el de Kolmogorov-Smirnov. El test de Mann-Whitney permite establecer si dos muestras son significativamente diferentes utilizando los rangos de orden de la variable considerada. Mientras que el de Kolmogorov-Smirnov compara las dos funciones de distribución de la variable en cada uno de los casos considerados. En la tabla 2 se recogen los estadísticos y los P-valores obtenidos para ambas pruebas. El recuento de puntos equidistantes de la referencia (1 m) es de 14501.

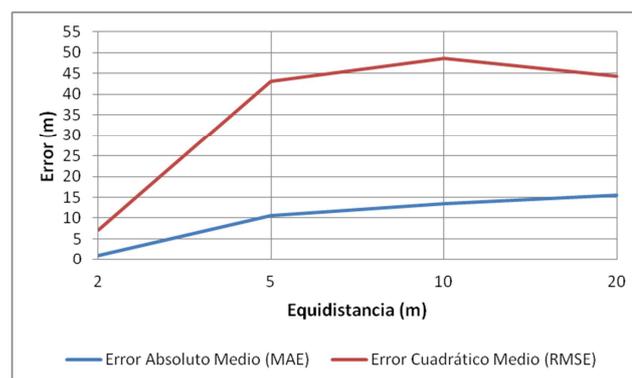


Fig. 5. Error Absoluto Medio y Error Cuadrático Medio para distintas equidistancias

Tabla 2. Resultados de los test de comparación de las funciones de distribución de la DV obtenida considerando distintas equidistancias y la de la equidistancia de referencia (1 m)

Equidistancia (m)	Recuento	Test de Mann-Withney		Test de Kolmogorov-Smirnov	
		W	P-Valor	Dn	P-Valor
2	7251	52594450	0.9615	0.0041	1.0000
5	2901	21288368	0.3025	0.0173	0.4674
10	1451	10728365	0.2139	0.0369	0.05466
20	726	5365306	0.3801	0.063	0.00826

El análisis de la tabla 2 indica que la distancia entre las funciones de distribución aumenta al incrementarse la equidistancia entre puntos, pudiéndose considerar que hay diferencia estadísticamente significativa (con un nivel de confianza del 95%) entre los valores de visibilidad a partir de 20 m de equidistancia, según el test de Kolmogorov-Smirnov.

Por otra parte, hay que tener en cuenta que, desde el punto de vista de la seguridad vial, el diseño de una carretera debería de ser tal que la DVD fuera mayor que la distancia necesaria para efectuar una parada de emergencia. Cuando la DVD es inferior a la distancia necesaria para realizar la parada, se dice que no hay visibilidad de parada. La distancia necesaria para detener el vehículo depende de la velocidad, la inclinación de la rasante y el coeficiente de rozamiento entre neumático y pavimento. En primer lugar se va a considerar que el vehículo circula a la velocidad de proyecto. Dadas las características geométricas de la carretera, se ha supuesto que la velocidad de proyecto es 40 km/h. Para esta velocidad, teniendo en cuenta las características de la carretera, y de acuerdo con la Norma de Trazado española, la distancia necesaria para detener el vehículo se estima en 40 m (Ministerio de Fomento 2000).

En la tabla 3 se muestra la longitud total de carretera sin visibilidad de parada (en la que no se cumpliría que la visibilidad disponible es superior a la necesaria para efectuar una parada de emergencia). Dependiendo de la equidistancia empleada en el cálculo, la longitud de carretera en la que la DVD es inferior a la necesaria está entre 151 y 120 m. Al aumentar la equidistancia, esta longitud disminuye. El error cometido (tomando como valor de referencia el correspondiente a una equidistancia de 1 m) podría llegar a ser del orden del 20% para equidistancias mayores o iguales a 5 m. Es importante destacar que el error cometido es siempre por defecto, es decir, que aumentar la equidistancia subestima la longitud de estos tramos que es conveniente tener bien identificados desde el punto de vista de la seguridad vial.

De acuerdo con la Norma española de Trazado, sería deseable que en la carretera hubiera una visibilidad disponible superior a la necesaria para detener el vehículo cuando circula a 20 km/h más que la velocidad de proyecto (es decir, a 60 km/h). Considerando una velocidad de 60 km/h, la distancia de parada requerida es, aproximadamente, de 80 m. La tabla 3 muestra la longitud total de carretera en la que la DVD es menor de 80 m. Dependiendo de la equidistancia empleada en el cálculo, la longitud de carretera en la que la DVD es inferior a la necesaria está entre 1564 y 1500 m. De forma análoga al caso anteriormente estudiado (velocidad 40 km/h), al aumentar la equidistancia, disminuye la longitud de carretera en la que la DVD es inferior a la deseable. El error cometido (tomando como valor de referencia el correspondiente a una equidistancia de 1 m) podría llegar a ser del orden del 3% para equidistancias mayores o iguales a 5 m. En todos los casos, aumentar la equidistancia subestima la longitud de los tramos sin suficiente visibilidad.

Tabla 3. Longitud total de carretera sin visibilidad de parada para velocidades de 40 y 60 km/h (distancias de parada iguales a 40 y 80 m, respectivamente)

Equidistancia (m)	Longitud (m) con DVD < 40 m	Longitud (m) con DVD < 80 m
1	151	1 564
2	150	1 544
5	110	1 510
10	120	1 510
20	120	1 500

En consecuencia, dada la existencia de diferencias significativas entre las funciones de distribución para equidistancias superiores a 10 m y con la finalidad de poder garantizar una determinación de la visibilidad de parada adecuada en el proceso de diseño, es recomendable utilizar equidistancias inferiores o iguales a 10 m.

5. Conclusiones

Existen diferencias en los resultados de DVD obtenidos para distintas equidistancias de cálculo. El error cometido aumenta al aumentar la separación entre los puntos de cálculo, aunque la influencia de la equidistancia en los resultados es moderada. Sin embargo, desde el punto de vista del proyecto y explotación de las carreteras, estas diferencias son significativas, máxime si se tiene en cuenta que el error cometido es siempre por defecto. Aumentar la equidistancia subestima la longitud de los tramos en los que la DVD es inferior a la necesaria para hacer una parada de emergencia.

Agradecimientos

Al Ministerio de Economía y Competitividad por su financiación en el proyecto de investigación TRA2011-25479 (Convocatoria de 2011 de Proyectos de Investigación Fundamental no Orientada del Plan Nacional de I+D+i 2008-2011).

Referencias

- Campoy-Ungría, J. M., Perez-Zuriaga, A. M., García, A., & Camacho-Torregrosa, F. J. (2012). Nueva metodología para obtención de visibilidades disponibles en Carreteras a partir de datos LiDAR Mobile. *Rutas*, 153, 16-23
- Castro, M., Anta, J. A., Iglesias, L., & Sánchez, J. A. (2014a). GIS-Based System for Sight Distance Analysis of Highways. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 28(3), 04014005. doi: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000317
- Castro, M., Iglesias, L., Rodríguez-Solano, R., & Sánchez, J. A. (2014b). A methodology to measure sight-hidden dips' parameters. *Measurement*, 52, 85-93. doi: 10.1016/j.measurement.2014.03.006
- Castro, M., Iglesias, L., Sánchez, J.A., & Ambrosio, L. (2011). Sight distance analysis of highways using GIS tools. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(6), 997-1005. doi: 10.1016/j.trc.2011.05.012
- Castro, M., Sánchez, J.A., Vaquero, C.M., Iglesias, L., & Rodríguez-Solano, R., (2008). Automated GIS-based system for speed estimation and highway safety evaluation. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 22(5), 325-331. doi: 10.1061/(ASCE)0887-3801(2008)22:5(325)
- Hassan, Y., Easa, S.M., & Abd El Halim, A.O. (1996). Analytical model for sight distance analysis on three-dimensional highway alignments. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1523(1), 1-10. doi: 10.3141/1523-01.
- Jha, M.K., Karri, G.A.K., & Kuhn, W. (2011). New Three-Dimensional Highway Design Methodology for Sight Distance Measurement. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2262(1), 74-82. doi: 10.3141/2262-08

- Lamm, R., Psarianos, B., & Mailaender, T. (1999). Highway design and traffic safety engineering handbook. McGraw-Hill Columbus, Ohio.
- Ministerio de Fomento (2000). Norma 3.1-IC Trazado. Ministerio de Fomento, Madrid.
- Steenberghen, T., Dufays, T., Thomas, I., & Flahaut, B. (2004). Intra-urban location and clustering of road accidents using GIS: a Belgian example. *International Journal of Geographical Information Science*, 18(2), 169-181. doi: 10.1080/13658810310001629619
- Zimmermann, M., & Roos, R. (2005). Increased Safety Resulting from Quantitative Evaluation of Sight Distances and Visibility Conditions of Two-Lane Rural Roads. *3rd International Symposium on Highway Geometric Design*. Chicago, Illinois.