



Evaluación a priori de la precisión de mapas electrónicos

Felipe Jiménez-Alonso*
Doctor Ingeniero Industrial
Lcdo. en Ciencias Físicas

* Director de la Unidad de Sistemas Inteligentes en Vehículos del INSIA (Instituto Universitario de Investigación del Automóvil).
felipe.jimenez@upm.es. Tlfno: 913 365317.

Recibido: 03/11/09 • Aceptado: 03/01/10

A priori evaluation of digital maps accuracy

ABSTRACT

• The use of data log vehicles is one of the more widespread methods to obtain road digital maps that provide support to new driver assistance systems. These vehicles are mainly equipped with inertial measurement systems and GPS receivers. The accuracy level of the map determines the applications for which it could be used. Although talking about GPS positioning, this quantification of the uncertainty has already been studied, the same does not happen when dealing with inertial systems. Furthermore, a method to obtain an upper bound of the error prior to the measurement has not been applied in the past. This paper shows a method based on the application of the EA-4/02 guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. It also raises the application to the case study of establishing the maximum allowable distance covered using an inertial measurement system alone, guaranteeing that in-vehicle assistance systems specifications are fulfilled.

• **Key words:** uncertainty, inertial system, GPS, data log vehicle, digital map, driver assistance, accuracy.

RESUMEN

Una de las técnicas más extendidas para la obtención de mapas electrónicos de carreteras destinados a dar soporte a las nuevas aplicaciones de asistencia a la conducción es el empleo de vehículos instrumentados, principalmente con sistemas inerciales de medida y receptores GPS. El grado de precisión del mapa condiciona las aplicaciones para las que puede estar destinado. Si bien para el caso del uso de posicionamiento GPS, esta cuantificación de la incertidumbre ya ha sido abordada, no ocurre igual para la evaluación de la incertidumbre resultante de emplear sistemas inerciales, ni se dispone de un método que permita evaluar una cota superior del error esperable antes de realizar la medida. Se presenta aquí una metodología basada en la aplicación de la guía EA-4/02 para la expresión de la incertidumbre de medida. Además, se plantea la aplicación al caso práctico de establecer la distancia recorrida máxima admisible de uso de un sistema de medida inercial sin apoyo de otros, garantizando

que se cumplan las especificaciones de las aplicaciones de asistencia embarcadas en los vehículos.

Palabras clave: incertidumbre, sistema inercial, GPS, vehículo instrumentado, mapa electrónico, asistencia al conductor, precisión.

1.- INTRODUCCIÓN

Los sistemas inteligentes de transporte son una de las soluciones más prometedoras para reducir los efectos negativos que implica el transporte por carretera y están basados en la captación, procesamiento y uso de información diversa de los vehículos, la infraestructura, el entorno, etc. (Jiménez y Aparicio, 2008). Muchos de los nuevos sistemas de asistencia a la conducción (ADAS), que se están introduciendo en los vehículos de carretera o están en fase de investigación, desarrollo y pruebas, están basados en el uso de mapas electrónicos de la carretera que proporcionan información adicional a la que se puede obtener por medio de sensores embarcados (Wevers

y Biervaque, 2004; McDonald et al, 2006, Loewenau et al, 2007; Jiménez y Naranjo, 2009). En este sentido, la precisión y el detalle requeridos para estos mapas han crecido, lo que ha implicado que medios clásicos para su obtención como digitalización de mapas o fotografías aéreas (Bendafi et al, 2000; Miles y Chen, 2004) no sean suficientes y deba recurrirse a otros. Entre ellos destaca el uso de vehículos instrumentados que suelen incluir sensores inerciales de medida y receptores GPS, los cuales se complementan (EDMap Consortium, 2004). Debe tenerse en cuenta que el uso de receptores GPS es el medio empleado comúnmente para el posicionamiento de los vehículos en la carretera en la actualidad. Además, para la construcción de los mapas electrónicos, ofrecen una referencia absoluta. Sin embargo, sus limitaciones en zonas de “sombra” provocan pérdidas de señal o deterioro de la calidad de ésta. En este sentido, los

sistemas inerciales ofrecen una solución y son comunes los trabajos que plantean el uso combinado de ambos métodos, aplicando *filtros de Kalman* (Zhang et al, 2005; Rezaei y Sengupta, 2007; Toledo-Moreo et al, 2007; Xu et al, 2008).

Por otra parte, en ocasiones, cuando la pérdida de la señal de GPS es total durante un cierto tramo, tanto en la elaboración de mapas como en el posicionamiento de vehículos, los sistemas inerciales son la única solución posible que no requiere apoyo de la infraestructura, y el error al recuperar la señal de satélites debería ser inferior a un cierto umbral. Además, la cuantificación del error de medida en la construcción de los mapas digitales es esencial para determinar hasta qué punto cumplen con las especificaciones de las nuevas aplicaciones de asistencia a la conducción antes reseñadas, sobre todo cuando éstas pasan a ser más restrictivas que en las aplicaciones de navegación actuales.

Cuando se trata de medidas obtenidas a partir del posicionamiento por satélite GPS, un indicador de calidad se obtiene por el procedimiento descrito en *Transportation Research Board* (2002), donde el posicionamiento de un conjunto aleatorio de puntos del mapa es comparado con las localizaciones exactas obtenidas por medios más precisos. En **Loewenau** et al (2002) se presentan las fuentes de error que existen en la medida de la geometría de la carretera y se distinguen error relativo y absoluto. A diferencia de los métodos

anteriores basados en la comparación de coordenadas cartesianas, en **Castro** et al (2006) se propone el uso de la media y la desviación típica de la medida del ancho del carril al medir la misma ruta por diferentes carriles como indicador de la precisión obtenida, con la principal desventaja de que este procedimiento esté altamente condicionado por la trayectoria seguida por el vehículo instrumentado.

Sin embargo, la naturaleza del error, que se presenta cuando se trabaja con sistemas inerciales de medida, resulta diferente del error presente en sistemas de posicionamiento por satélite. Por ello, se plantea la necesidad de establecer una metodología que estime dicha incertidumbre previa a la realización de las medidas. La metodología propuesta se basa en la ley de propagación de incertidumbre (*European co-operation for Accreditation*, 1999) y es aplicable a todas las variables que se obtienen de forma indirecta. Además, la metodología permitirá la obtención de conclusiones relativas a distancias máximas que pueden ser recorridas por

Distancia recorrida:

$$d_n = d_{n-1} + \Delta d_n = d_{n-1} + v_n \cdot \Delta t_n = \sum_{i=1}^n v_i \cdot \Delta t_i \quad (1)$$

Coordenada X:

$$x_n = x_{n-1} + \Delta x_n = x_{n-1} + v_n \cdot \Delta t_n \cdot \cos(\theta_{zn}) = \sum_{i=1}^n v_i \cdot \Delta t_i \cdot \cos(\theta_{zi}) \quad (2)$$

Coordenada Y:

$$y_n = y_{n-1} + \Delta y_n = y_{n-1} + v_n \cdot \Delta t_n \cdot \sin(\theta_{zn}) = \sum_{i=1}^n v_i \cdot \Delta t_i \cdot \sin(\theta_{zi}) \quad (3)$$

Coordenada Z:

$$z_n = z_{n-1} + \Delta z_n = z_{n-1} + v_n \cdot \Delta t_n \cdot \sin(\theta_{yn}) = \sum_{i=1}^n v_i \cdot \Delta t_i \cdot \sin(\theta_{yi}) \quad (4)$$

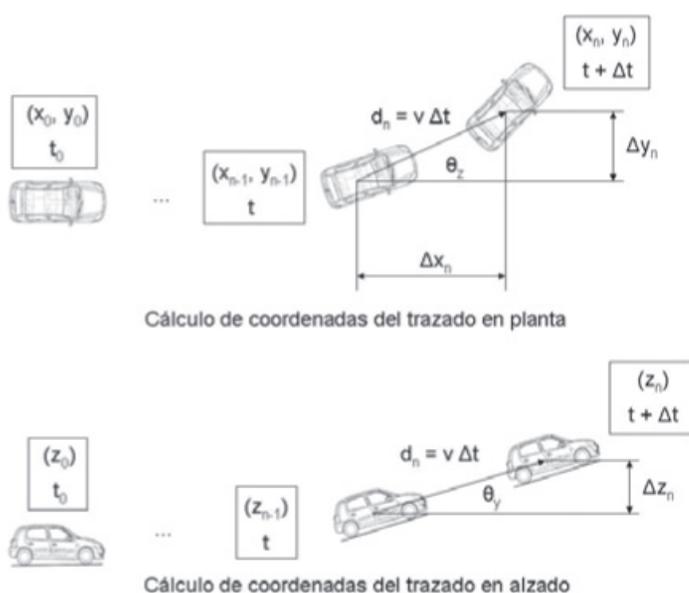


Fig. 1: Cálculo de coordenadas del mapa electrónico empleando un sistema inercial de medida

el vehículo empleando únicamente los sensores inerciales para su posicionamiento sin que se sobrepasen los límites establecidos para el correcto funcionamiento de ciertos sistemas ADAS.

2.- OBTENCIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LA CARRETERA A PARTIR DE SISTEMAS INERCIALES DE MEDIDA

Un sistema inercial de medida formado por un velocímetro y una plataforma giroscópica proporciona la

$$u^2(x) = \sum_{i=1}^n \left[\Delta t_i^2 \cdot \cos^2 \theta_z \cdot u^2(v_i) + v_i^2 \cdot \cos^2 \theta_z \cdot u^2(\Delta t_i) + v_i^2 \cdot \Delta t_i^2 \cdot \sin^2 \theta_z \cdot u^2(\theta_z) \right] \quad (6)$$

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^n \left[\Delta t_i^2 \cdot \sin^2 \theta_z \cdot u^2(v_i) + v_i^2 \cdot \sin^2 \theta_z \cdot u^2(\Delta t_i) + v_i^2 \cdot \Delta t_i^2 \cdot \cos^2 \theta_z \cdot u^2(\theta_z) \right] \quad (7)$$

velocidad del vehículo v , aceleraciones lineales, velocidades angulares y , de éstas, se deducen los ángulos de la carrocería ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$) donde X es el eje longitudinal, Z es el vertical y el Y forma un triedro a derechas con los otros dos. De esta forma, se pueden plantear las variables que intervienen en la definición de la geometría de la carretera, las cuales están dadas por medio de las siguientes expresiones en las que, para cada intervalo de tiempo de adquisición, se proyecta la distancia recorrida sobre los ejes coordenados tomados como referencia (figura 1).

Por otra parte, debe tenerse en cuenta que la medida de la geometría de la carretera por medio de sensores inerciales no contiene una referencia absoluta, de forma que, tras calcular el trazado en planta por medio de las Eqs (2)-(3), dicha trayectoria debe ser trasladada y girada empleando medidas absolutas como las ofrecidas por el posicionamiento GPS u otra fuente de información.

3.- EVALUACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE EN LA MEDIDA DE LA GEOMETRÍA DE LA CARRETERA

Según *European co-operation for Accreditation* (1999), la incertidumbre global de una variable de salida obtenida de forma indirecta α definida como $\alpha = f(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N)$ está dada por la siguiente expresión:

$$u^2(\alpha) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \right) \cdot u(\beta_i, \beta_j) = \sum_{i=1}^N c_i^2 \cdot u^2(\beta_i) + 2 \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N c_i \cdot c_j \cdot u(\beta_i, \beta_j) \quad (5)$$

donde $u(\beta_i)$ son las componentes de incertidumbre de las variables de entrada, $u(\beta_i, \beta_j)$ es la covarianza cuando las variables de entrada están correlacionadas y c_i son los coeficientes de sensibilidad de cada componente de incertidumbre.

Para el caso del cálculo de la geometría de la carretera, las componentes de incertidumbre corresponden a la resolución y al error de calibración del equipamiento de medida

(velocidad, ángulos e incremento temporal entre muestras). Para todas las variables de entrada se puede asumir que no están correlacionadas porque provienen de equipos de medida diferentes, de forma que los términos que involucran covarianzas son nulos y se puede aplicar Eq. (5) teniendo en cuenta únicamente las incertidumbres de los instrumentos de medida, quedando:

Además, como se ha indicado anteriormente, es necesario realizar la traslación y giro de las coordenadas X-Y. Por ello, y dado que los valores de incertidumbre dependen del ángulo

θ_z medido respecto a una referencia arbitraria, se analiza la influencia de dicha referencia. Para ello, se toma un punto cualquiera A de la trayectoria y se emplean las ecuaciones (6)-(7) para evaluar las incertidumbres de las coordenadas cartesianas. De ellas, se comprueba que su suma es independiente del ángulo θ_{zi} .

Es decir, la incertidumbre de medida entre la posición real y la calculada no depende de la rotación de la trayectoria respecto a una referencia absoluta, como se ilustra en la figura 2.

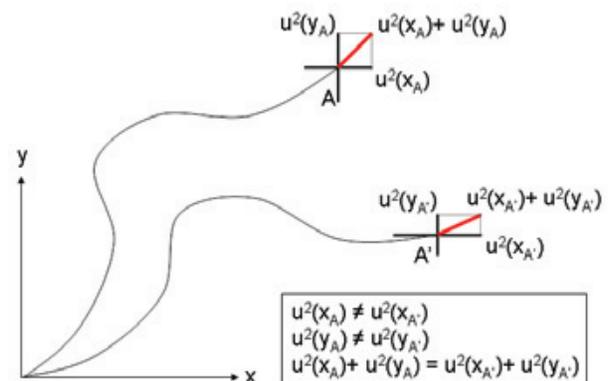


Fig.2: Independencia de la incertidumbre de la posición del punto con la referencia de ángulos tomada para el giróscopo

Además de las coordenadas cartesianas de la trayectoria, para algunos sistemas de asistencia a la conducción como los de aviso en curva (CWS) o el control inteligente de velocidad (ISA) (Varhelyi, 2002; Aparicio et al, 2005; Jamson, et al, 2006; Jiménez et al, 2008), resulta de utilidad conocer el radio. Esta variable se calcula utilizando el método de la cuerda y la flecha. En este caso, se plantea la situación en la que los términos debidos a la correlación de Eq. (5) no

son despreciables y deben ser considerados. Debe tenerse en cuenta, además, que el cálculo del radio sólo involucra 3

2009), pero, en cualquier caso, es necesario su conocimiento antes de realizar las mediciones o el posicionamiento, por lo que deben plantearse métodos para su evaluación a priori.

Método de la cuerda y la flecha para el cálculo del radio de la trayectoria (Fricke, 1990):

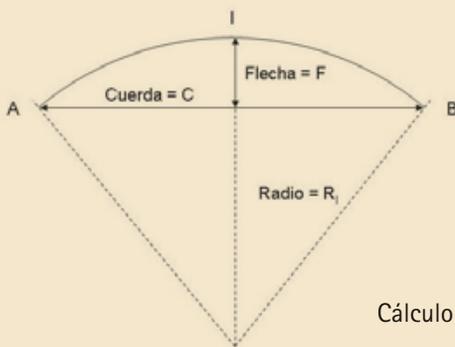
El radio en un punto de la trayectoria se estima a partir de las posiciones de 3 puntos. Si los puntos inicial, intermedio y final se denotan por A (x_A, y_A), I (x_I, y_I) y B (x_B, y_B), respectivamente, la expresión del radio está dada por:

$$R_I = \frac{C^2}{8F} + \frac{F}{2}$$

donde

Cuerda:
$$C = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2}$$

Flecha:
$$F = \frac{(y_A - y_B) \cdot x_I + (x_B - x_A) \cdot y_I + x_A \cdot y_B - x_B \cdot y_A}{\sqrt{(y_A - y_B)^2 + (x_B - x_A)^2}}$$



Cálculo del radio de la trayectoria en el punto I

Empleando la metodología anterior, se plantea el cálculo de la distancia límite admisible. Para ello, se asume que las incertidumbres en la medida del ángulo de guiñada y el incremento de tiempo en el muestreo son constantes (K_1 y K_2) y que la de la velocidad es lineal con el valor de ésta ($K_3 v$). Con el fin de buscar una cota superior a la incertidumbre, se considera velocidad constante igual a la máxima esperable y se asume que la frecuencia de adquisición y, por lo tanto, el incremento de tiempo, son constantes. Si se impone la condición de que la incertidumbre no supere un valor límite admisible L, la distancia máxima que se podría recorrer estaría dada por la expresión siguiente:

$$d \leq \frac{L^2 \cdot \Delta t}{(K_1^2 + (K_2^2 + K_3^2) \Delta t^2) \cdot v} \quad (8)$$

Como se puede observar, la distancia admisible decrece según aumenta la velocidad de circulación. Sin embargo, la relación con el otro parámetro que influye (incremento de tiempo entre dos mediciones consecutivas, es decir, el inverso de la frecuencia de muestreo) no es tan evidente y la distancia presenta un máximo dependiente de la incertidumbre de los equipos de instrumentación (figura 3).

puntos, lo que quiere decir que es independiente de puntos anteriores de la trayectoria. Por esta razón, el punto inicial puede ser tomado como un origen local y las incertidumbres de los otros calculadas a partir de él.

4.- CÁLCULO DE LA DISTANCIA MÁXIMA ADMISIBLE PARA MANTENER LOS CRITERIOS DE PRECISIÓN REQUERIDOS

Como se ha indicado, los sistemas inerciales de medida pueden ser empleados tanto para la construcción de los mapas electrónicos como para complementar la señal de GPS durante el posicionamiento de los vehículos. Sin embargo, la naturaleza acumulativa de su error provoca que la distancia máxima en la que puede ser utilizada su medida sin ser actualizada por otros medios esté limitada superiormente. Este límite superior es función de los requerimientos de la aplicación final y son muy variables, desde las utilidades básicas de navegación hasta los sistemas de seguridad que se basan en localización en el carril (Jiménez y Naranjo,

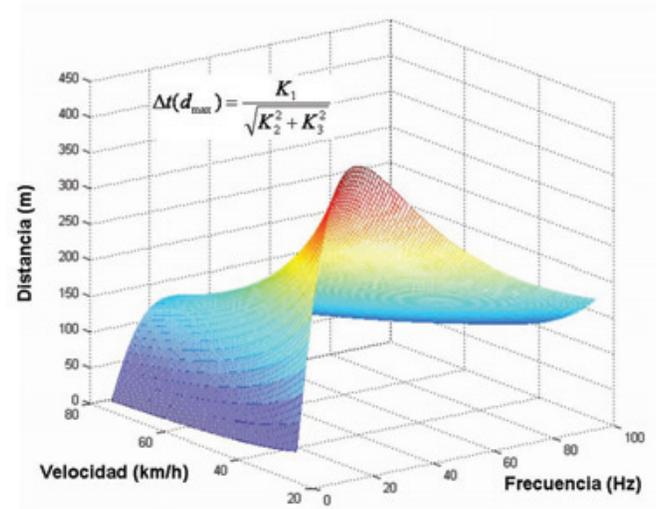


Fig. 3: Evolución de las distancias máximas, que garantizan que no se supere un valor límite admisible de la incertidumbre en función de la velocidad y la frecuencia de adquisición

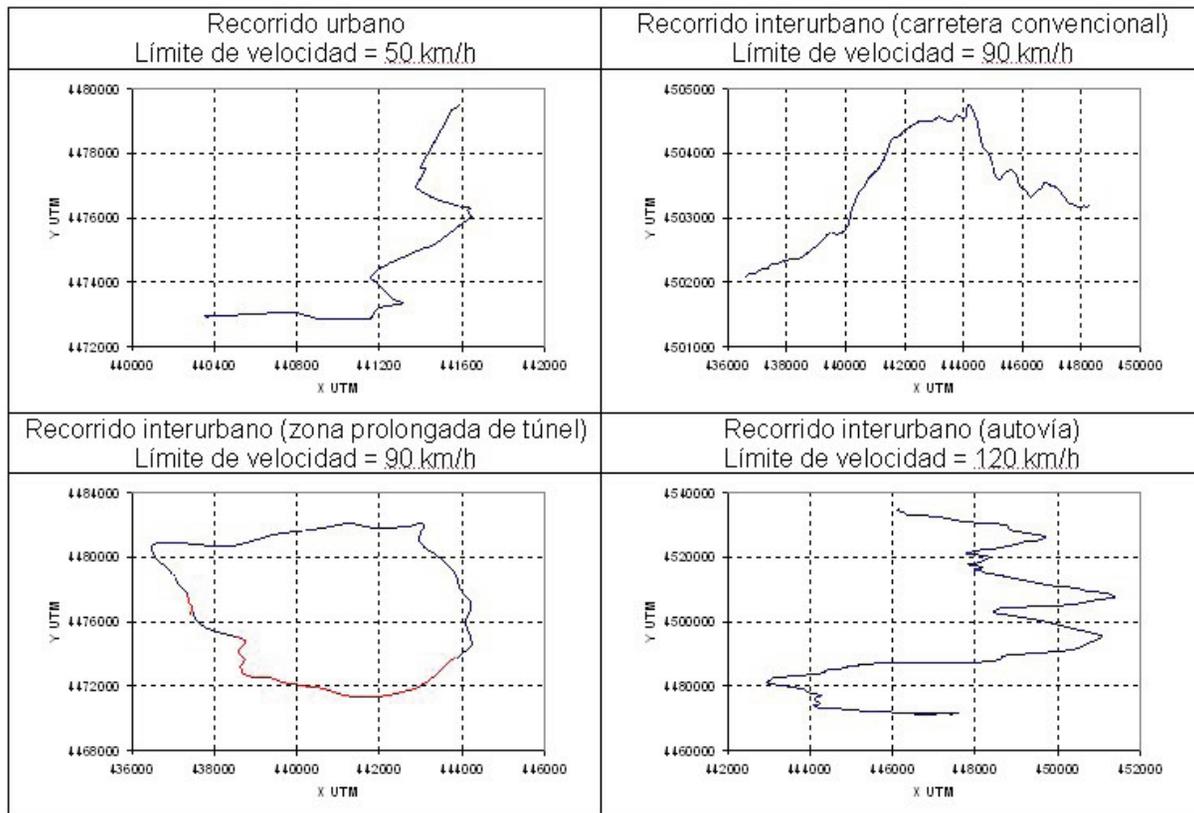


Fig. 5: Ejemplos de trayectorias medidas con el vehículo instrumentado

5.- APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA A MEDIDAS REALES EN CARRETERA

Se ha aplicado la metodología de medida de geometría de carreteras por medio de vehículo instrumentado y la deducción de la incertidumbre de medida en el caso del empleo de sistemas inerciales. Para ello, se ha empleado un vehículo turismo con la siguiente instrumentación embarcada (figura 4), la cual está colocada de tal forma que no es apreciable externamente por otros usuarios de la vía:

- E1: Equipo de medida de velocidad sin contacto Correvit L-CE, que permite la determinación de la velocidad de circulación y la distancia recorrida con un alto nivel de precisión.
- E2: Plataforma giroscópica RMS FES 33, que proporciona las medidas de aceleraciones lineales y velocidades angulares y, a partir de ellos, estima los ángulos girados en torno a tres ejes, definidos como en el desarrollo teórico anterior. De esta forma, el ángulo alrededor de Z junto a la señal de la velocidad permiten obtener la trayectoria, mientras que los giros alrededor de X e Y proporcionan el peralte y la rampa, respectivamente, información no accesible por otros métodos de medida.
- E3: Receptor GPS Topcon GB-300 permite el posicionamiento tridimensional del vehículo con una frecuencia de actualización de 10 Hz. Gracias a la corrección diferencial, si se alcanza posicionamiento

tipo 4 o fijo, la precisión es centimétrica con lo que se tomará esta medida como referencia.

- E4: Equipo de registro (ordenador portátil y tarjeta de adquisición DAQCard-6062E que admite hasta 500 kS/s) en el que se almacenan simultáneamente todas las señales con una frecuencia de muestreo de 10 Hz, con el fin de sincronizarlas a los ciclos de actualización del receptor GPS.

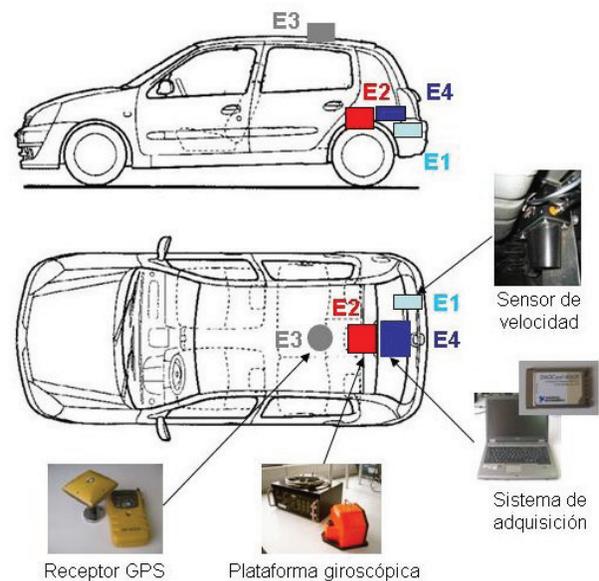


Fig. 4: Esquema de la disposición de los sensores para la construcción del mapa electrónico

Los ensayos se han realizado sobre diferentes rutas urbanas e interurbanas, a diferentes velocidades de circulación. Así, se han recorrido más de 800 km. La figura 5 muestra algunos ejemplos de trayectorias medidas. Su elección ha sido tal que se contemplasen el mayor número de situaciones posibles en cuanto a velocidades de circulación, zonas favorables / desfavorables para el GPS, recorridos con curvas de diversa severidad, etc.

La figura 6 recoge, para un tramo ilustrativo de una de las trayectorias medidas, las discrepancias entre el sistema de medida inercial y el posicionamiento GPS tipo 4 que se consigue en toda la trayectoria, y que se toma como referencia al garantizar una precisión centimétrica, en 3 ensayos que se realizaron. Adicionalmente, se incluye la evaluación de la incertidumbre considerando la velocidad máxima alcanzada en los ensayos, lo que proporciona una cota superior de la incertidumbre si se deseara realizar la estimación de dicha incertidumbre antes de realizar la medida. Como se puede observar, los resultados teóricos y experimentales y la estimación de la distancia máxima que se puede circular únicamente con el sistema inercial para no sobrepasar ciertas tolerancias asumibles por las aplicaciones ADAS son coherentes. También resulta interesante hacer notar, a partir de los resultados de la cota superior de la incertidumbre, que la especificación de que se requiera posicionamiento en el carril para ciertas aplicaciones ADAS o detalle suficiente en el mapa electrónico para distinguir los carriles (errores inferiores a 3.5 metros) es muy restrictivo y limita notablemente la distancia que puede recorrerse sin

actualizar la medición del sistema inercial. En cuanto la tolerancia, en el posicionamiento se amplía al ancho de dos carriles (de forma estándar, se puede considerar un ancho total de 7 metros), la distancia aceptable que se puede recorrer crece de forma significativa (tabla 1). Por último, nótese que la no actualización de la señal del sistema inercial mediante una referencia absoluta fiable en un tiempo largo, como es el caso de la trayectoria mostrada en la figura 5 con un tramo prolongado de túnel (9.4 Km.), conlleva errores importantes que, en los ensayos realizados superan los 20 metros en el punto de recobrar el posicionamiento GPS.

Tipo de carretera	Límite de velocidad (Km./h)	Distancia d (m)	Tiempo (s)
Zona urbana	30	1447.53	173.70
	50	868.52	62.53
Carretera convencional	90	482.51	19.30
	100	434.26	15.63
Autopista - autovía	120	361.88	10.86

Tabla 1: Distancia y tiempo que se puede recorrer garantizando incertidumbres inferiores a dos veces el ancho del carril

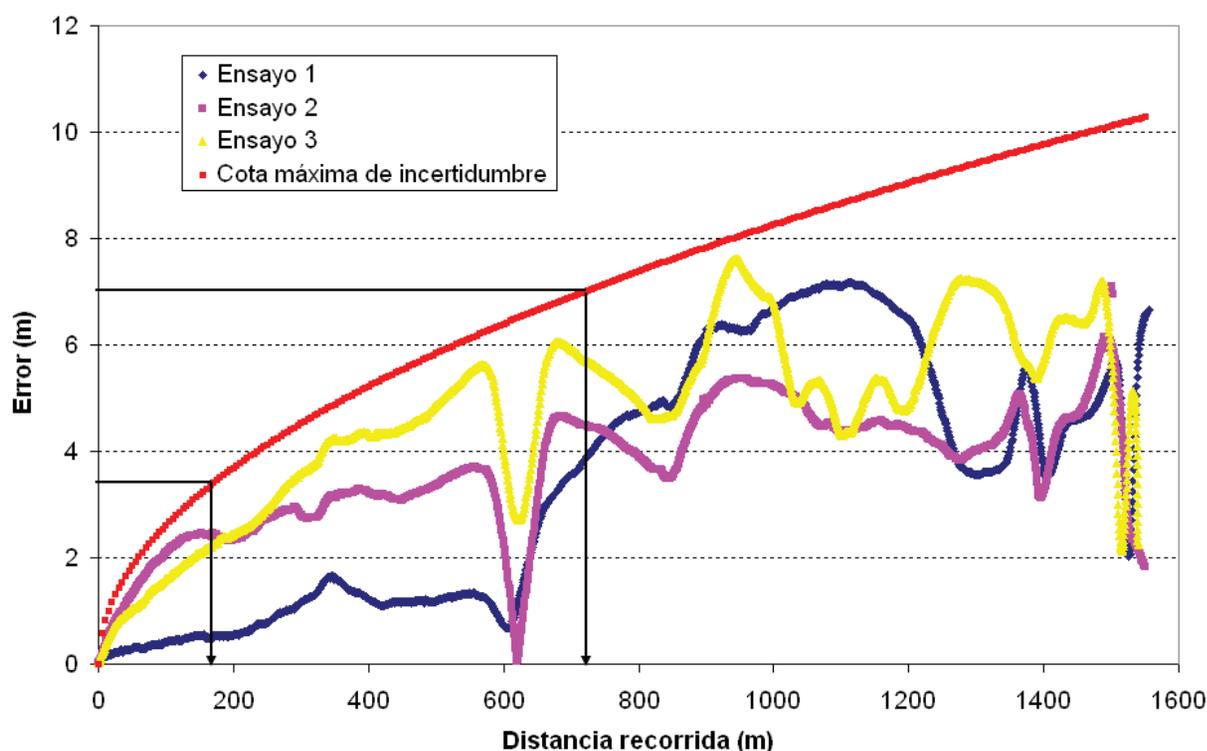


Fig. 6: Errores experimentales y evaluación de la incertidumbre sobre una trayectoria

Por otra parte, la figura 7 recoge la incertidumbre en el cálculo del radio de la trayectoria en una ruta interurbana. Como se puede apreciar, la incertidumbre relativa es creciente con el radio y puede acotarse superiormente por un valor del $(\text{Radio en metros} / 100) \%$ e inferiormente por $(0.15 \times \text{Radio en metros} / 100) \%$. Esta circunstancia es relevante, dada la influencia de este parámetro sobre el establecimiento, por ejemplo, de la velocidad máxima segura de paso por curva. En este sentido, Pomerleau et al (1999) presentaron la contribución de errores en la estimación del radio, el peralte y el coeficiente de adherencia lateral sobre dicha velocidad límite de paso calculada según se indica en AASHTO (2001). Así, errores en la estimación del radio de la curva del 10 % conllevan errores en la estimación de la velocidad máxima en curva del 5 %. Además, se puede comprobar que, para valores usuales del peralte y el coeficiente de adherencia, la influencia de los errores en la estimación del radio es del mismo orden de magnitud que la de los errores en el segundo, mientras que errores en el primero tienen una influencia mucho menor.

6.- DISCUSIÓN

Los requerimientos sobre los mapas digitales que imponen las nuevas aplicaciones ADAS de los vehículos de carretera no sólo obligan a altos niveles de detalle y precisión, sino que resulta necesario cuantificar cuál es la incertidumbre en la medida del mapa y en el posicionamiento en él. En este sentido, la tecnología más usualmente implantada es el posicionamiento por satélite. Sin embargo, sus limitaciones en cuanto a integridad y fiabilidad de datos en condiciones adversas de medida (zonas de “sombra”) hacen de los sistemas inerciales de medida un medio complementario muy utilizado. Su principal desventaja radica en el error acumulativo que acarrea en las medidas y que limita su uso en cuanto a la distancia máxima antes de que dicho error supere la tolerancia admisible en una aplicación concreta.

Aunque existen trabajos previos que evalúan la mayor o menor calidad de los mapas o el posicionamiento, no existen referencias que estimen esa incertidumbre a priori antes de realizar las mediciones. La metodología propuesta, basada en la guía EA-4/02, permite la estimación de esa incertidumbre en el desarrollo de mapas electrónicos y establece la distancia máxima que se podría recorrer sin actualizar las mediciones del sistema inercial, respetando la desviación

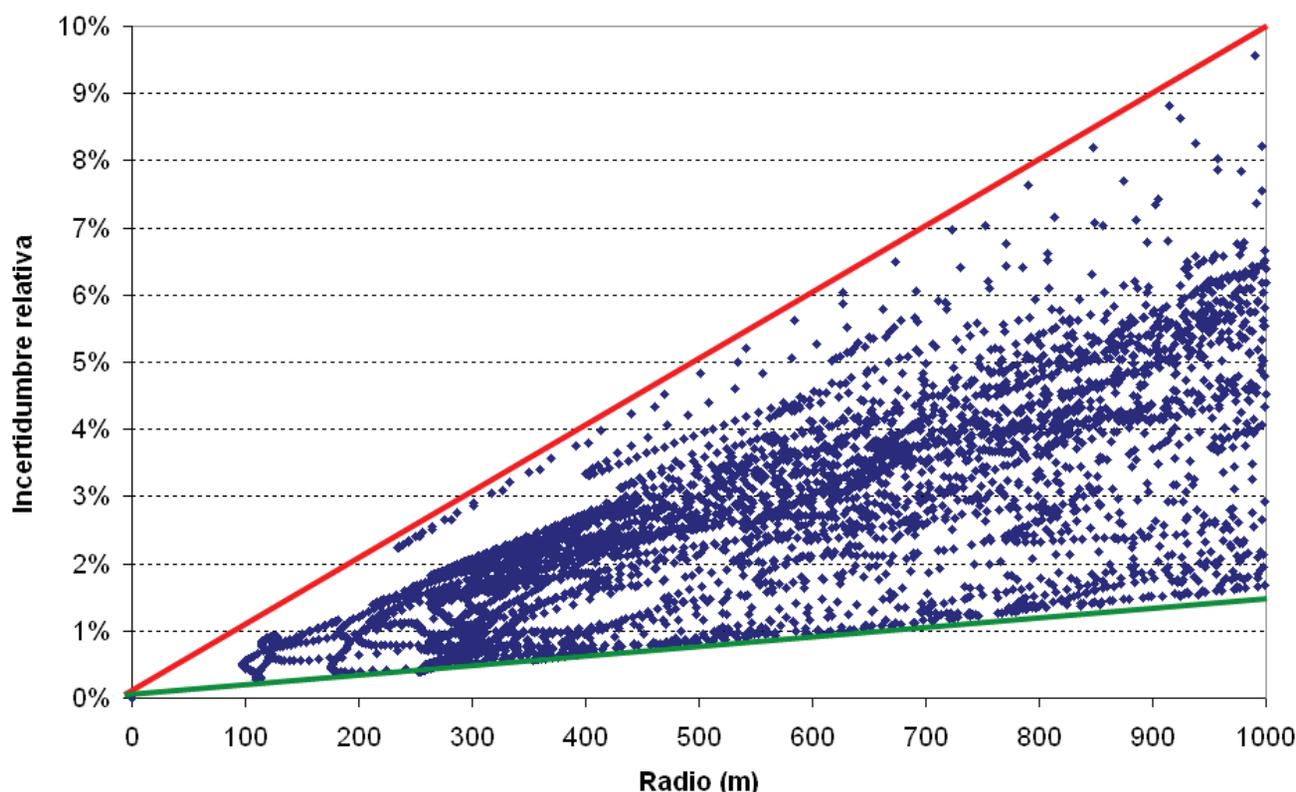


Fig. 7: Incertidumbre del valor del radio (respecto al valor absoluto del radio)

máxima admisible por un sistema de asistencia concreto, lo que representa una aplicación práctica de la metodología de notable relevancia. La metodología ha sido empleada sobre medidas reales obtenidas con un vehículo instrumentado y los resultados experimentales han sido coherentes con los predichos por las expresiones analíticas propuestas.

Por último, cabe indicar que la metodología propuesta para la obtención de mapas electrónicos detallados, así como la evaluación del error cometido en ellos, o susceptible de ser cometido en el posicionamiento de un vehículo mientras la señal GPS no es correcta o viable (túneles o zonas urbanas de edificios altos y calles estrechas) ha sido empleada satisfactoriamente en diversos sistemas de asistencia a la conducción, sobre la misma arquitectura de instrumentación aquí propuesta, lo que ha permitido realizar pruebas con conductores, analizando la efectividad de dichos sistemas y su efecto sobre los usuarios.

7. BIBLIOGRAFÍA

- AASHTO. A policy on geometric design of highways and streets. Washington D.C.: AASHTO, 2001
- Aparicio F, Páez J, Moreno F, et al. El sistema de control inteligente de velocidad (ISA). Madrid: Fundación Instituto Tecnológico para la Seguridad del Automóvil (FITSA), 2005
- Bendafi H, Hummelsheim K, Sabel H, et al. Classification of data capturing / production techniques. NextMap Project Deliverable D 3.1, 2000.
- Castro M, Iglesias L, Rodríguez-Solano R, et al. "Geometric modelling of highways using global positioning system (GPS) data and spline approximation". Transportation Research. Part C. Vol 14-4, 2006, p 233-243
- EDMap Consortium. Enhanced digital mapping project. Final report. Washington D. C.: EDMap, 2004.
- European co-operation for Accreditation. Expression of uncertainty of measurement in calibration. Publication reference EA-4/02. Paris: EA, 1999
- Fricke L B. Traffic Accident Reconstruction. Northwestern Traffic Institute, 1990
- Jamson S, Carsten O, Chorlton K, et al. Intelligent Speed Adaptation. Literature Review and scoping study. Editor: Carsten O. Leeds: Universidad de Leeds, 2006.
- Jiménez-Alonso F, Aparicio-Izquierdo F. "Aportación de los ITS a la sostenibilidad y mejora del transporte". DYNA Ingeniería e Industria, Vol. 83-7, 2008, p 434-439
- Jiménez-Alonso F, Aparicio-Izquierdo F, Páez-Ayuso J. "Evaluation of in-vehicle dynamic speed assistance in Spain: algorithm and driver behaviour". IET Intelligent Transport Systems. Vol 2-2, 2008, p 132-142
- Jiménez-Alonso F, Naranjo-Hernández J E. "Nuevos requerimientos de precisión en el posicionamiento de vehículos para aplicaciones ADAS". DYNA Ingeniería e Industria. Vol 84-3, 2009, p 245-250
- Loewenau J, Hummelsheim K, Bendafi H, et al. Final enhanced map database requirements, NextMAP project, Deliverable 2.2. NextMAP, 2002.
- Loewenau J, Angenvoort J, Mezger K. "ADASIS: Real time map information with a standardized interface for advanced in-vehicle applications". Actas del 6th European Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services. Aalborg: 18 – 20 Junio 2007
- McDonald M, Keller H, Klijnhout J, et al. Intelligent transport systems in Europe. Opportunities for Future Research. Singapur: World Scientific, 2006.
- Miles J C, Chen K. ITS Handbook. 2ª ed, Gran Bretaña: PIARC, 2004.
- Pomerleau D, Jochem T, Thorpe C, et al. Run-off-road collision avoidance using IVHS countermeasures. Final report. Washington: National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), 1999.
- Rezaei S, Sengupta R. "Kalman filter based integration of DGPS and vehicle sensors for localization". IEEE Transactions on Control Systems Technology. Vol 15-6, 2007, p 1080-1088.
- Toledo-Moreo R, Zamora-Izquierdo M A, Úbeda-Miñarro B, et al. "High-integrity IMM-EKF-based road Vehicle navigation with low-cost GPS/SBAS/INS". IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 8-3, 2007, p 491-511
- Transportation Research Board. Collecting, Processing and integrating GPS data into GIS. Washington D. C.: Transportation Research Board, 2002.
- Varhelyi A. "Speed Management via in-car devices: effects, implications, perspectives". Transportation, Vol 29-3, 2002, p 237-252.
- Wevers K, Biervaque V. "Safety enhanced digital maps and standard interface to ADAS". Actas del 11th World Congress on ITS. Nagoya (Japón). 18-22 Octubre 2004
- Xu H, Wang C, Yang M, et al. "Position estimation for intelligent vehicles using an unscented Kalman filter", International Journal of Vehicle Autonomous Systems, Vol 6-1/2, 2008, p186-194.
- Zhang P, Gu J, Milius E, Huynh P. "Navigation with IMU/GPS/digital compass with unscented kalman filter". Actas del IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Niagara Falls, Canadá, Julio 2005, p 1497-1502.