

Análisis de consistencia de caminos bidireccionales usando mediciones continuas de velocidad de operación obtenidas con GPS

Two-lane rural highways consistency analysis using continuous operating speed measurements obtained with GPS

Tomás Echaveguren^{1*}

* Universidad de Concepción, Concepción. CHILE

Fecha de Recepción: 03/02/2012

Fecha de Aceptación: 04/07/2012

PAG 55 - 70

Resumen

El análisis de consistencia permite evaluar la seguridad en caminos en base a la velocidad. Existen diversos modelos velocidad - geometría para elementos aislados de una carretera, que se utilizan para evaluar la consistencia de elementos aislados del trazado de una carretera. Por ejemplo curvas horizontales simples o en curvas de inflexión en "S". Los modelos de análisis de consistencia agregados, permiten evaluar segmentos largos de trazado, por lo que necesitan perfiles de velocidad continuos. En este caso, los modelos y mediciones puntuales de velocidad no son adecuados. Actualmente, la tecnología de posicionamiento satelital es una manera eficiente de construir perfiles de velocidad en largas distancias del trazado, siendo particularmente útil para aplicar el método de Polus. Este trabajo estudia el modelo de análisis de consistencia de Polus usando perfiles continuos de velocidad. Primero se discute dicho modelo, para luego presentar la obtención y tratamiento de datos de velocidad usando modelos y mediciones directas. El método se aplicó a 5 casos de estudio en los cual se midió en terreno la velocidad y geometría con un GPS partir del cual se obtuvieron perfiles directos y teóricos de velocidad. Los datos fueron procesados con el filtro de Kalman y suavizados con el método LOESS, para luego evaluar la consistencia de cada ruta. Se concluyó que el método de Polus y los perfiles continuos de velocidad medidos permiten obtener una calificación de segmentos largos del trazado, pero se debe segmentar adecuadamente cada trazado para evitar sub/sobre estimaciones de consistencia.

Palabras Clave: Consistencia, velocidad, GPS, caminos rurales bidireccionales

Abstract

Consistency assessment permits to study road safety regarded to speed. There exist several speed-geometry models that assessed isolated components of roads, which are used for consistency assessment of single elements of roads. For instance, single horizontal curves or reverse curves. Aggregated consistency assessment models, permit to assess long segments of roads. Therefore, continuous speed profiles are needed. In that case, speed-geometry models for single elements are not suitable. Today satellite positioning technology is an efficient way to develop continuous speed profile for long sectors of roads, particularly useful for aggregated consistency assessment. This paper study the Polus' consistency assessment model, which need as input continuous speed profiles. First, Polus' model is discussed. After a method for speed data collection and processing using in-field measurements and models is discussed. Method was applied to 5 roads using a GPS device. Data were processed with Kalman filter and smoothed with loess smoother. With the speed profile processed, filtered and smoothed, Polus' consistency method was used to estimate consistency index in each road. It was concluded that Polus' method and continuous speed profiles are suitable to rate consistency of long road segments. However, special attention should be given to road segmentation to avoid under or over-estimation of the road consistency, particularly in straight and steeped segments.

Keywords: Consistency, speed, GPS, two-lane rural roads

1. Introducción

La consistencia del diseño geométrico se define como la condición bajo la cual las expectativas del conductor son concordantes con el diseño geométrico de una ruta. En la medida que los trazados sean más consistentes, el riesgo de accidentes disminuye, con lo cual aumenta, teóricamente, el grado de seguridad de la ruta. Los métodos de evaluación de consistencia de un diseño constan de indicadores, umbrales de aceptación y recomendaciones de mejoramiento de trazados existentes o alternativas de diseño (Echaveguren et al., 2009). El método más conocido es el de Lamm et al. (1988), quienes proponen un índice de consistencia basado en la diferencia entre las velocidades de diseño y de operación en curvas horizontales aisladas y curvas de inflexión en "S". Asimismo, proponen umbrales de aceptación para diferenciar el grado de consistencia de dichos segmentos. Este método asume como supuesto que la consistencia de un camino queda determinada esencialmente por el comportamiento del conductor en las curvas horizontales, por lo cual se aplica a elementos aislados del trazado.

1. Introduction

Geometrical design consistency is defined as the condition that allows driver expectations to be concordant with a road geometrical design. As long as there are more consistent roads, the accident risk rate will decrease, which theoretically increases safety road rates. Assessment consistency methods for a given design include indicators, acceptance thresholds and improvement recommendations for existing roads or design alternatives (Echaveguren et al., 2009). Lamm et al. (1988) is the most popular method that proposes a consistency index based on the difference between design speeds and operation on isolated horizontal curves and reverse curves. Acceptance thresholds are also proposed to differentiate consistency rate on such roads. This method assumes that consistency of a road is essentially determined by a driver's behavior on horizontal curves, therefore it is applied to isolated components of the road.

¹ Autor de correspondencia / Corresponding author:
E-mail: techaveg@udec.cl



Por tanto, desconoce el efecto combinado del trazado vertical y horizontal así como el efecto de tangentes largas entre curvas.

Perfiles de velocidad de operación

Un aspecto relevante para el análisis de consistencia es el perfil de velocidad de operación. La velocidad de operación es una medida directa de la respuesta del conductor al ambiente de conducción y especialmente a la geometría del trazado. Por ésta razón, la mayoría de los estudios de consistencia se abocan a elaborar relaciones velocidad-geometría (Vease por ejemplo a Echaveguren (2010) quien identificó al menos 130 modelos calibrados entre los años 1968 y 2012). Estas relaciones habitualmente describen comportamientos puntuales. Por ejemplo, la relación entre velocidad de operación y radio de curvatura respecto de la mitad del desarrollo de una curva horizontal. Esto se debe a que las técnicas de medición de velocidad de operación que habitualmente se utilizan son también medidas puntuales, que por el costo de medición y limitaciones técnicas, no pueden extenderse en demasía para contar con un perfil continuo de datos (o al menos con una elevada densidad de datos). En consecuencia, los perfiles de velocidad que habitualmente se encuentran en la literatura están acotados a valores representativos de pocos puntos de medición. Por ejemplo, en curvas aisladas simples es posible obtener con pistola laser una muestra semi-aleatoria de velocidad de operación en 5 puntos: 2 en las tangentes de entrada y de salida y 3 en el interior de la curva. Para sobrellevar ésta limitante, algunos investigadores han estimado valores de aceleración/deceleración longitudinal que les permite vincular los datos puntuales de velocidad mediante las ecuaciones de la cinemática (Vease por ejemplo a Fitzpatrick y Collins (2000) o Cox y Arndt (2010)). En otros modelos, como en IHSDM (Modelo Interactivo de Evaluación de Seguridad en Carreteras o Interactive Highway Safety Design Model) se han establecido perfiles de velocidad teóricos con valores de aceleración y deceleración fija que en conjunto con ecuaciones velocidad-geometría, determinan cuánto disminuye la velocidad de operación respecto de una velocidad de proyecto previamente definida. De este modo IHSDM construye artificialmente perfiles continuos de velocidad a partir de modelos que describen variaciones puntuales, conectando cada modelo a través de los valores de aceleración y deceleración antes mencionados.

Esta limitante tanto para la modelación de relaciones velocidad – geometría, como para el análisis de consistencia puede evitarse utilizando la tecnología de posicionamiento satelital (GPS, GALILEO o GLONASS). Con ésta tecnología es posible construir perfiles de velocidad de operación con con una mayor cantidad de datos de velocidad y/o posición.

La tecnología GPS y el análisis de consistencia

Las experiencias del uso de ésta tecnología son recientes. Cafiso et al. (2005), Memon et al. (2008), Pérez et al. (2010), Zhao et al. (2011) y Rim et al. (2011) han explorado la tecnología a través del sistema de posicionamiento global (GPS, Global Positioning System) para desarrollar modelos velocidad-geometría con datos obtenidos mediante GPS.

Consequently, the combined effect of vertical and horizontal roads is unknown, as well as the effect on long tangents between curves.

Operation speed profiles

A relevant aspect for the consistency assessment is the operation speed profile. Operation speed is a direct measurement of driver's response to environmental driving behavior and especially to road geometry. For this reason, most consistency assessments intend to elaborate speed-geometry relationships. Reference is made to Echaveguren (2010) who identified at least 130 calibrated models between years 1968 and 2012. Such relationships usually describe specific behaviors. For example the relationship between speed and curvature radius regarded to half development of a horizontal curve. Above because measurement techniques usually applied for operation speeds are also specific measurements, which due to high assessment cost and technical limitations can not be broadly spread to provide a continuous data profile (at least containing a high data density). Consequently, speed profiles usually described on literature are limited to representative values from few measurement points. For instance, by using a ray-gun it is possible to obtain a semi random sample of operation speed on single isolated curves, at five different points: 2 on entrance and exit tangents and 3 on the inside of the curve. In order to cope with this limitation, some researchers have estimated longitudinal acceleration/deceleration values which allow relating speed specific data by means of kinematic equations (See Fitzpatrick and Collins (2000) or Cox and Arndt (2010)). Other models such as IHSDM (Interactive Highway Safety Design Model) have established theoretical speed profiles by using fixed acceleration/deceleration values, which together with speed-geometry equations are able to determine the decrease of operation speed compared to a previously defined projected speed. In this way IHSDM artificially builds up continuous speed profiles from models describing specific variations, thus connecting each model by means of abovementioned acceleration/deceleration values.

Such limitation on speed-geometry models as well as on consistency assessment can be avoided by using global positioning technology (GPS, GALILEO or GLONASS). Such technology enables us to build operation speed profiles by using a higher amount of speed and/or positioning data.

GPS Technology and Consistency Assessment Method

Experiences from the use of such technology are quite recent. Cafiso et al. (2005); Memon et al. (2008); Pérez et al. (2010); Zhao et al. (2011) and Rim et al. (2011) have explored such technology by using global positioning system (GPS) to develop speed – geometry models from data obtained by GPS.

Cafiso et al. (2005) instrumentaron un vehículo con un logger GPS para medir velocidad en forma continua en extensiones largas de trazados. Memon et al. (2008) utilizaron el equipo VBOX 3i (GPS submétrico) para medir velocidad con un grupo de conductores y aplicando la técnica de seguimiento vehicular (car-following), con lo cual desarrollaron modelos velocidad-geometría para curvas de inflexión en "S". Pérez et al. (2010) utilizaron un GPS de navegación para registrar tiempo y posición de vehículos, datos a partir de los cuales obtuvieron indirectamente velocidad de operación. Posteriormente calibraron modelos de velocidad de operación considerando la tangente de entrada a la curva y la curva misma.

Zhao et al. (2011) evaluaron la precisión de dispositivos GPS para medir la velocidad de vehículos de carga y la compararon con lecturas de sensores de piso fijos. No detectaron diferencias significativas entre ambas mediciones. Rim et al. (2011) propusieron un método para corregir errores en las lecturas de velocidad con GPS. Para ello usaron un algoritmo de regresión ponderada y lo compararon con algoritmos de suavización de la familia exponencial. Con ello pudieron detectar datos anómalos (outliers) y datos perdidos (missing data) pudiendo corregir así éstas anomalías de las mediciones con GPS.

De este modo, es posible afirmar que la tecnología GPS permite obtener perfiles de velocidad con razonable precisión. Estos perfiles permiten construir modelos velocidad-geometría y obtener perfiles de velocidad en tramos extensos de trazado, lo cual otorga ventajas comparativas respecto de las técnicas actuales de construcción de perfiles de velocidad.

Objetivos y alcances

Este trabajo tiene por objetivo principal discutir el modelo de análisis de consistencia de Polus y su aplicación en sectores largos de trazado, sobre la base de perfiles continuos de velocidad de operación obtenidos con un GPS submétrico con tecnología RTK (Real Time Kinematic). Para ello en primer lugar se describe el método de análisis de consistencia de Polus. Posteriormente se desarrolla en detalle la forma en que se obtienen perfiles de velocidad mediante modelos predictivos y usando GPS, con énfasis en aspectos metodológicos y operativos para el registro de datos en terreno, para el filtrado de datos mediante el Filtro de Kalman y para el suavizado de datos mediante el suavizador Loess. Luego se desarrolla una aplicación del método de análisis de consistencia de Polus en 5 rutas de la zona centro-sur de Chile en las cuales se midieron velocidades de operación mediante GPS y se calculó un perfil de velocidad en base a modelos predictivos, para luego discutir los resultados obtenidos.

2. El método de análisis de consistencia de Polus

El método de análisis de consistencia es un modelo agregado. En contraste con el modelo de Lamm et al (1988), que se aboca principalmente a curvas horizontales, el método de Polus et al (2004) utiliza un perfil de velocidad completo para evaluar segmentos de trazado más extensos que curvas y contracurvas.

Cafiso et al. (2005) equipped a vehicle with a GPS logger in order to measure continuous speed on long road segments. Memon et al. (2008) employed a VBOX 3i equipment (sub metric GPS) to measure speed on a drivers group by applying car-following technique and developed speed-geometry models for reverse curves. Pérez et al. (2010) employed a navigation GPS to register vehicles timing and positioning thus obtaining data to calculate operation speed indirectly. Afterwards, operation speed models were calibrated by considering the entrance curve tangent and the curve itself.

Zhao et al. (2011) evaluated the accuracy of GPS devices used to measure the speed of load vehicles and compared the results to ground fixed-sensors. Significant differences were not detected between both measurement methods. Rim et al. (2011) proposed a method intended to correct errors on speed readings provided by GPS. In order to do so, they used a weighed regression algorithm which later compared to exponential smoothed algorithms. From such experience they detected outliers and missing data, thus being able to correct those irregularities from GPS measurements.

Consequently, it is possible to state that GPS technology allows us to achieve speed profiles with reasonable accuracy. Those profiles enable the development of speed-geometry models used to obtain speed profiles on long road segments, thus providing comparative advantages regarding current techniques of speed profile development.

Objective and scope

The main objective of this study is to discuss Polus' consistency assessment model and its application on long road segments, based on continuous operation speed profiles obtained by means of a sub metric GPS of RTK technology (Real Time Kinematic). In the first place, the Polus' consistency assessment model is described. Afterwards the methods used to obtain speed profiles by means of predictive models and using GPS are described in detail emphasizing on methodological and operative aspects of in-field data collection, on data filtering by means of Kalman Filter method and data smoothing by means of Loess smoother. Then an application is developed for the Polus' consistency assessment model in the 5th Highway, center-south area of Chile, where operation speeds were registered by means of a GPS. A speed profile was calculated based on predictive models to later discuss obtained results.

2. Polus' Consistency assessment model

Consistency assessment model is an aggregated model. Contrarily to Lamm et al (1988) model, which is mainly focused on horizontal curves, Polus et al (2004) method considers a complete speed profile to evaluate longer road segments than curves and counter curves.



El método de Polus et al. (2004) está basado en dos conceptos: a) la diferencia entre la velocidad de operación respecto de la velocidad de operación media del tramo en estudio; b) la desviación estándar de la velocidad a lo largo del tramo en estudio.

La velocidad de operación la estima del modo convencional a través del percentil 85 de una distribución de frecuencia de velocidad. Este último aspecto es el que impone mayores dificultades para aplicar el método, ya que requiere de una gran cantidad de registros de velocidad de operación para construir un perfil de velocidad. Es aquí donde el uso de la tecnología GPS posee ventajas frente a otros métodos de medición de velocidad de operación.

Para evaluar la consistencia segmento a segmento, Polus et al elaboraron el índice de consistencia C (en m/s) de la Ecuación 1. El índice es adimensional y depende de la desviación estándar de la velocidad de operación (σ , en m/s) y del área normalizada existente entre la velocidad de operación media y el perfil de velocidad de operación (R_a , en m/s).

$$C = 2,808e^{-0,278\sigma R_a} \quad (1)$$

Asimismo, Polus et al. (2004) propusieron umbrales de consistencia para el índice de la Ecuación 1, sobre la base de juicio de expertos y aplicando un método de ranking. La Tabla 1 muestra tales umbrales.

Polus et al. (2004) method is based on two concepts: a) the difference between operation speed and the average operation speed of segment under study; b) standard deviation of speed alongside the segment under study.

Operation speed is estimated by a conventional method by using the 85 percentile of a speed frequency distribution. This aspect imposes higher difficulties for the method application, provided that it requires a great amount of operation speed records in order to build a speed profile. So the use of GPS technology is ahead regarding other measurement methods for operation speed.

So as to evaluate segment by segment consistency, Polus et al., elaborated the C consistency index (in m/s) for Equation.1. It is a dimensionless Index that depends on standard deviation of operation speed (σ , in m/s) and on the regularized area existing between the average operation speed and the operation speed profile (R_a , in m/s).

Similarly, Polus et al. (2004) suggested a consistency threshold for Equation 1 index, based on expert's judgement and applying a ranking method. Table 1 shows three thresholds.

Tabla 1. Umbrales de consistencia del modelo de Polus (Polus et al., 2004)

Table 1. Consistency thresholds for Polus' Method (Polus et al., 2004)

	Nivel de consistencia/ Consistency level		
	Bueno/Good	Aceptable/Acceptable	Pobre/Poor
Umbral de consistencia Consistency threshold	$C > 2$ (m/s)	$1 < C \leq 2$ (m/s)	$C \leq 1$ (m/s)

Se puede visualizar que el nivel de consistencia está condicionado por el valor de σR_a . En el caso más favorable, si dicho producto vale 0, el índice de consistencia vale 2,8, lo cual corresponde al mejor trazado posible, en el cual la velocidad de operación se aproxima a la velocidad promedio en todo el segmento. Si el valor de dicho producto es 32, es decir, una alta variabilidad en la velocidad, el valor de C es el más bajo posible: 0.

La velocidad media de operación (V_{media}) se estima en base al promedio ponderado por distancia de las velocidades (V_i) en cada segmento homogéneo (L_i) del tramo en estudio, como lo muestra la Ecuación 2.

$$V_{media} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i L_i}{\sum_{i=1}^n L_i} \quad (2)$$

El área normalizada está descrita por el índice R_a de la Ecuación 3. Este índice expresa la suma en valor absoluto de las áreas entre las curvas de velocidad de operación media y del perfil de velocidad, normalizada por la distancia total.

It can be observed that consistency level is determined by the σR_a value. In the best case, if such product is 0, the consistency value will be 2,8, which corresponds to the best possible road, where operation speed is close to the average speed of the whole segment. If the value of such product is 32, i.e. high speed variability, the C value will be the lowest possible: 0.

The average operation speed ($V_{average}$) is estimated based on the weighted average for speed distances (V_i) on each homogeneous segment (L_i) of the road under study, as shown by Equation 2.

The regularized area is described by R_a index in Equation 3. This index expresses the addition as absolute value of areas between average operation speed curves and speed profile regularized by the total distance.

En este caso, el segmento k corresponde al segmento en que se produce un cambio de signo producto de la intersección de los dos perfiles. En la mayoría de los casos, la longitud del segmento k coincide con la longitud del segmento i.

In this case, segment k corresponds to the segment where there is a sign change as product of the intersection of two profiles. In most of the cases, segment k length matches with segment i length.

$$Ra_k = \frac{1}{\sum_{k=1}^K L_k} \sum_{k=1}^K \left\{ \int_{l=0}^{L_k} |S(l) - \bar{S}| dl \right\} \quad (3)$$

La Figura 1 ilustra gráficamente los elementos de la Ecuación 3 para 4 segmentos. De este modo, el índice Ra es simplemente la suma normalizada de las áreas a_k en valor absoluto. En la Figura 1 se asume que la velocidad media de operación es constante a lo largo del trazado, lo cual no necesariamente es así, en la práctica.

Figure 1 graphically depicts the elements of Equation 3 for 4 segments. In this way the Ra index is merely the regularized addition of a_k areas expressed as absolute value. Figure 1 assumes that the average operation speed is constant alongside the road, which is not necessarily true in practice.

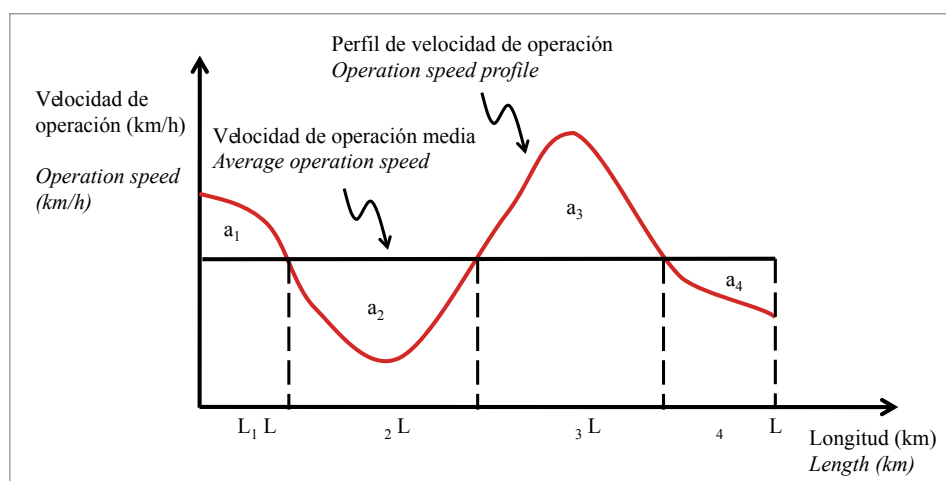


Figura 1. Parámetros considerados para estimar el índice Ra (Adaptado de Polus et al., 2005)

Figure 1. Parameters considered for estimating Ra Index (Adaptation by Polus et al., 2005)

A diferencia del método de Lamm et al (1988), el método de Polus et al. (2004) necesita contar con un perfil de velocidad de operación a lo largo de la longitud L (Ver Figura 1). Sin embargo, los modelos predictivos en la literatura sólo resuelven parcialmente esta problemática y, por otro lado, en terreno la única opción de obtener un perfil continuo de velocidad es a través de la colección de datos mediante sistemas de posicionamiento satelital.

Contrarily to Lamm et al., (1988) method, Polus et al (2004) method requires an operation speed profile alongside L length (see Figure 1). However, predictive models available on literature only solve this problem partially and, on the other hand; the only alternative for obtaining a continuous in-field speed profile is by means of data collection using global positioning systems.

3. Construcción de perfiles de velocidad con GPS

3.1 Métodos de medición de velocidad de operación

Existen pocas experiencias de medición continua de velocidad con GPS. Cafiso et al. (2005), Memon et al. (2008) y recientemente García y Camacho (2009), midieron velocidad con GPS para construir perfiles de velocidad. Sin embargo, tales autores orientan su trabajo a componentes específicas del perfil de velocidad de operación: medición de aceleraciones y deceleraciones y mediciones de velocidad en curvas horizontales y en sus tangentes de aproximación. La investigación de Cafiso et al. (2005) es una excepción, toda vez que analiza también segmentos largos de trazados.

3. Development of speed profiles using GPS

3.1 Measuring methods for speed operation

There are few experiences developed for measuring continuous speed with GPS. Cafiso et al. (2005), Memon et al. (2008) and recently García and Camacho (2009) measured speed using GPS to develop speed profiles. However, such authors focused their studies on specific components of operation speed profile: acceleration and deceleration measurements, speed measurements on horizontal curves and their approaching tangents. The research done by Cafiso et al. (2005) is an exception, as long roads segments are also analyzed.

Todos ellos coinciden en la complejidad de obtener un tamaño muestral adecuado para estimar el percentil 85 de la velocidad de operación. Si la velocidad se mide mediante la técnica de seguimiento vehicular, es necesario hacer el seguimiento al menos a 30 vehículos; y a la vez, estimar el margen de error asociado a la estimación indirecta de la velocidad a la cual circula el vehículo líder. Este error se debe esencialmente a los cambios de marcha y a la variabilidad del espaciamiento entre los vehículos líder y seguidor respectivamente. Por otro lado, si la velocidad se mide utilizando una muestra de conductores, es necesario un tamaño muestral estratificado para obtener una distribución de frecuencia de velocidad considerando conductores rápidos, lentos y normales con características homogéneas. Felipe y Navin (1998) mostraron que ésta última consideración incide directamente en la formulación de modelos velocidad-geometría.

A pesar que Memon et al. (2008) probaron que no existen diferencias significativas entre los valores de perfil de velocidad obtenidas con ambos métodos, es necesario verificar caso a caso ésta consideración debido a que el comportamiento de los conductores está condicionado por la regulación de tránsito y cultura locales.

3.2 Filtrado de registros de velocidad

El filtrado de registros de velocidad es una herramienta que permite identificar y eliminar datos anómalos, además de acoplar los datos de posición y velocidad. Existen variadas herramientas para ello. Sin embargo, la más utilizada es el filtro de Kalman (Kim y Langley, 2000). Este filtro permite resolver al mismo tiempo la detección de datos anómalos, recuperar "dropouts" por caída de satélites y acoplar los registros de posición, trayectoria y velocidad obtenidos con el GPS. Esencialmente, el filtro estima el estado x de una señal en tiempo discreto mediante una ecuación lineal como la Ecuación 4, a partir de un registro de datos crudo como el que se muestra en la Ecuación 5.

$$\begin{aligned}x_k &= Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1} \\z_k &= Hx_k + v_k\end{aligned}\tag{4}$$

En donde A , B y H son parámetros de regresión. w y v son variables aleatorias que representan el ruido del proceso y de la señal respectivamente. Por tanto, w y v son mutuamente independientes y siguen una distribución de probabilidades normal con media cero. El filtro de Kalman predice los estados de z y x minimizando el error cuadrático medio de la covarianza del proceso y eliminando el ruido w y v . En este caso, los datos de velocidad están representados por la señal z y la velocidad resultante se obtiene a partir del valor de x .

3.3 Suavización de registros de velocidad

Después de ensamblar y filtrar los datos, se requiere un proceso de suavización, con el fin de reducir la cantidad de datos de velocidad instantánea y simplificar así la interpretación de los perfiles de velocidad.

All of them agree on the complexity to obtain an adequate sample size for estimating the 85 percentile of operation speed. If speed is measured by means of the car-following technique, it will be necessary to follow up at least 3 vehicles. At the same time it is necessary to estimate an error margin associated to the indirect estimation of the speed the leading vehicle is moving along. This error is essentially caused by gear changes and by spacing variability between leading vehicles and their followers, respectively. On the other hand, if speed is measured by using a drivers' sample, it will be necessary to obtain a stratified size sample to achieve a speed frequency distribution that includes fast, slow and regular drivers with homogeneous characteristics. Felipe and Navin (1998) proved that such consideration directly influences the elaboration of geometry-speed models.

Although Memon et al. (2008) demonstrated that there are no significant differences between speed profile values, it is necessary to verify this consideration case by case, since drivers behavior is conditioned by traffic regulations and local culture.

3.2 Filtering speed records

Speed record filtering is a tool that allows the identification and removal of anomalous data, which also connects positioning and speed data. There are several tools used for this purpose. However, Kalman filter is widely used (Kim y Langley, 2000). This filter is capable of solving at the same time detection of outliers, dropouts recovery due to satellite drops and connection of positioning, path and speed records obtained by GPS. Essentially the filter estimates the x status of a signal, in discrete time, by means of a linear equation as Equation 4, from a raw data record as shown in Equation 5.

Where A , B and H are regression parameters. w and v are random variables representing the noise and signal in the process, respectively. Therefore, w and v are independent mutants following a regular probability distribution which average is zero. Kalman filter predicts the status of z and x by minimizing the mean root square of the covariance process and eliminating w and v noise. In this case, speed data are represented by z signal and the resulting speed is obtained from x value.

3.3 Smoothing speed records

After assembling and filtering data, a smoothing process is required in order to reduce the amount of instant speed records and to simplify the interpretation of speed profiles.

La literatura ofrece una amplia variedad de métodos de suavización tales como la regresión local cruzada, la suavización en base a kernels, suavizadores exponenciales dobles y simples, splines de orden "n" (TIBCO, 2008) y otras más sofisticadas basadas en inteligencia artificial y wavelets. Particularmente, Rim et al. (2011) han usado la regresión local ponderada y la regresión exponencial para tratar los perfiles de velocidad. Concluyeron que independientemente del método a emplear, el resultado es altamente dependiente de los parámetros de suavización empleados. Después de examinar estas técnicas, se optó por utilizar el suavizador Loess. Este suavizador permite obtener mediante regresión no paramétrica alrededor del punto de datos x_i , una estimación de la función de datos discretos $f(x_i)$, asumiendo que el ruido ε_i se distribuye normal con media 0 y desviación estándar σ^2 según la Ecuación 6.

$$y_i = f(x_i) + \varepsilon_i \quad (5)$$

Para suavizar, el método aplica regresión de mínimos cuadrados ponderados en una ventana de datos h que se desplaza a lo largo de la señal de velocidad para cada punto de referencia x_i . La función de ponderación es la función tricúbica descrita en la Ecuación 7, en donde x_0 es el dato alrededor del cual se define el valor de h .

$$w_i = \begin{cases} \left(1 - \left|\frac{x_i - x_0}{h}\right|^3\right)^3 & ; \left|\frac{x_i - x_0}{h}\right| < 1 \\ 0 & ; \left|\frac{x_i - x_0}{h}\right| \geq 1 \end{cases} \quad (6)$$

De este modo, el perfil de velocidad con el que se aplica el análisis de consistencia queda libre de datos anómalos, con los registros de velocidad y posición acoplados y sin el ruido producido por pequeñas aceleraciones locales.

4. Modelos de perfiles de velocidad

Los modelos predictivos de velocidad de operación disponibles en la literatura corresponden a modelos aplicables a elementos puntuales del trazado. Sólo el modelo de Fitzpatrick y Collins (2000), enlaza ecuaciones predictivas de velocidad de operación en elementos de trazado usando tasas de aceleración o deceleración para obtener un perfil continuo de velocidad. Aplicar estos modelos requiere de un conocimiento detallado del alineamiento horizontal, dato que no siempre está disponible.

El modelo de predicción de cálculo de Fitzpatrick y Collins está compuesto por 10 ecuaciones que permiten estimar velocidad de operación en curvas horizontales con diversas pendiente longitudinales, en presencia de curvas verticales y en combinaciones de curvas verticales y horizontales.

Literature provides a wide variety of smoothing methods, such as crossed local regression, smoothing based on Kernels, double and single exponential smoothers, "n" splines (TIBCO, 2008) and others quite sophisticated alternatives based on artificial intelligence and wavelets. Particularly, Rim et al. (2011) have employed the weighted local regression and exponential regression to deal with speed profiles. They concluded that independently of the method employed, the result is highly dependant on the smoothing parameters used. After revising these techniques, the Loess smoothing was selected. This smoothing method enables us to obtain, by means of a non-parametric regression around x_i data point, an estimation of discrete data function $f(x_i)$ by assuming that noise ε_i is normally distributed with average 0 and standard deviation σ^2 according to Equation 6.

For smoothing purposes, this method applies least square regressions weighted on an h data frame, which moves alongside the speed signal for each x_i reference point. The weighted function is a three cubic function described in Equation 7, where x_0 is the datum used to define h value.

In this way, speed profile used to apply consistency assessment is free of outlier data, having speeding and positioning records together, without noise caused by small local accelerations.

4. Speed profile models

Predictive models of operation speed available on literature correspond to models applicable on specific elements of the road. Only the model by Fitzpatrick and Collins (2000) connects predictive equations of operation speed by using acceleration or deceleration rates to obtain a continuous speed profile. Applying such models requires a detailed knowledge of horizontal alignment, which is a datum not always available.

Calculation predictive model by Fitzpatrick and Collins (2000) is composed of 10 equations that enable the estimation of operation speed on horizontal curves which have diverse longitudinal slopes, including vertical curves and a combination of vertical and horizontal curves.

Asimismo, propone valores de aceleraciones y deceleraciones destinadas a enlazar valores puntuales de velocidad de operación predichos por los modelos.

La Tabla 2 resume el modelo de Fitzpatrick y Collins (2000) el cual es único modelo que permite estimar de manera completa un perfil de velocidad considerando la geometría. El modelo permite calcular las velocidades de operación en curvas horizontales para diferentes pendientes longitudinales. En rectas, permite considerar el efecto del parámetro de curvatura K en la velocidad en el caso de curvas cóncavas y convexas, considerando el efecto de restricciones de visibilidad. En este sentido, el modelo de Fitzpatrick y Collins (2000) otorga suficiente opciones de cálculo considerando el diseño geométrico.

Asimismo el modelo tiene varias limitaciones. Entre ellas, que no permite considerar el efecto de la tangente de enlace entre curvas y contracurvas, lo cual lleva a una potencial sobreestimación de velocidad en la contracurva. Asimismo, en rectas requiere como dato la velocidad deseada, valor que no siempre está disponible, por lo cual es usual asociarla a la velocidad límite legal lo cual es un error teniendo en cuenta que ésta debiera corresponder al percentil 99 de la velocidad de operación.

Por otro lado, para la aplicación del modelo se requiere de un conocimiento detallado del diseño geométrico de los trazados de carreteras, los cuales no siempre están disponibles. Esto lleva a que necesariamente se deba inferir la geometría en forma directa a través de un levantamiento topográfico, o indirecta, a través de mediciones con GPS, como se hizo en este trabajo.

In the same way the model proposes acceleration and deceleration values aimed to connect specific values for operation speed predicted by the models.

Table 2 summarizes the model by Fitzpatrick and Collins (2000), which is the only model that allows the estimation of a speed profile considering geometry in a full extent. The model is capable of estimating operation speeds on horizontal curves for different longitudinal slopes. In straight roads, it permits the consideration of the K curve parameter effect on the speed for the case of concave and convex curves considering the visibility limitation effect. In this way, the model by Fitzpatrick and Collins (2000) delivers several calculation choices, which consider geometric design.

However, the model has several limitations. Among them, it does not allow the consideration of the intersection tangent effect between curves and counter curves, which lead to a potential speed overestimation on the counter curve. Similarly, on straight roads the model requires expected speed data, which is not always available. Therefore speed is usually associated with the legal speed limit, which is mistaken taking into account that speed should be the 99 percentile of operation speed.

On the other hand, for the model application a detailed knowledge of highway geometrical design is required, which are not always available. It leads to a necessary inference of geometry in a direct way by means of a topographic uplifting or, in an indirect way by means of GPS measurements, as conducted in this research job.

Tabla 2. Modelos predictivos de velocidad de operación de Fitzpatrick y Collins (2000)

Table 2. Predictive models of operation speed by Fitzpatrick and Collins (2000)

Geometría Horizontal <i>Horizontal Geometry</i>	Geometría Vertical <i>Vertical Geometry</i>	Velocidad de operación (km/h) <i>Operation speed (km/h)</i>	Deceleración (m/s ²) <i>Deceleration (m/s²)</i>	Aceleración (m/s ²) <i>Acceleration (m/s²)</i>
Curva/ <i>Curve</i>	-9 % < i < -4 %	$V_{85} = 102,1 - \frac{3077,13}{R}$	1,00 ; R ≤ 175 m $0,6794 - \frac{295,14}{R}$; 175 < R ≤ 436 m	0,54 ; 175 < R ≤ 250 m 0,43 ; 250 < R ≤ 436 m 0,21 ; 436 < R ≤ 875 m 0,00 ; R > 875 m
Curva/ <i>Curve</i>	-4 % < i < 0 %	$V_{85} = 105,98 - \frac{3709,90}{R}$	0,00 ; R > 436 m	
Curva/ <i>Curve</i>	0 % < i < 4 %	$V_{85} = 104,82 - \frac{3574,51}{R}$		
Curva/ <i>Curve</i>	4 % < i < 9 %	$V_{85} = 96,61 - \frac{2752,19}{R}$		
Curva/ <i>Curve</i>	Curva Cóncava <i>Concave curve</i>	$V_{85} = 103,24 - \frac{3576,51}{R}$	1,00	0,54
Curva/ <i>Curve</i>	Curva Convexa <i>Convex curve</i>	(1)	(2)	(2)
Recta/ <i>Straight</i>	Curva Cóncava <i>Concave curve</i>	V ₈₅ = velocidad deseada <i>expected speed</i>	No aplicable <i>Not applicable</i>	No aplicable <i>Not applicable</i>
Recta/ <i>Straight</i>	Curva Convexa <i>Convex curve</i>	V ₈₅ = velocidad deseada (3) <i>expected speed</i>	No aplicable <i>Not applicable</i>	No aplicable <i>Not applicable</i>
Recta/ <i>Straight</i>	Curva Convexa <i>Convex curve</i>	$V_{85} = 105,08 - \frac{149,69}{K}$ (3)	1,00	0,54

Notas: (1) usar ecuaciones para curvas en pendientes; (2) usar aceleraciones y deceleraciones para curvas en pendiente (3): considerar visibilidad restringida

Notes: (1) using equations for curves on slopes; (2) using accelerations and decelerations for curves on slopes; (3) considering restricted visibility



5. Caso de estudio

El caso de estudio tuvo por objetivo comparar los resultados del análisis de consistencia obtenido mediante mediciones continuas y mediante el modelo de Fitzpatrick y Collins (2000). Se seleccionó este modelo puesto que en Chile no existen modelos predictivos de perfil de velocidad calibrados. La comparación pretende dimensionar la magnitud del error que se puede cometer al analizar consistencia con modelos calibrados respecto de usar mediciones directas en terreno.

En primer lugar se seleccionaron tramos de medición en diversas rutas de Chile, en las cuales se realizaron mediciones de velocidad con GPS. Sobre esas rutas, se determinaron de manera aproximada los parámetros geométricos para aplicar el modelo de Fitzpatrick y Collins (2000). Luego se procesaron los datos de velocidad para obtener los perfiles de velocidad medidos, y se contruyó el perfil de velocidad a partir del modelo predictivo seleccionado. Con ambos perfiles se aplicó posteriormente el análisis de consistencia mediante el método de Polus.

5.1 Selección de tramos de medición

Para efectuar el análisis de consistencia se seleccionaron rutas de Chile con diversas condiciones geométricas - tales como curvatura y pendiente longitudinal - emplazados en diversos ambientes topográficos - zonas llanas, onduladas y montañosas. Todos los tramos corresponden a caminos bidireccionales de una pista por sentido, con ancho de pista constante de 3,5 m y ancho de berma constante de 0,5 m. En todos los tramos de estudio, el nivel de tráfico era inferior a los 10.000 veh/día-año. En los momentos en que se ejecutaron las mediciones, el nivel de tráfico resultó lo suficientemente bajo por lo cual no produjo interferencias. La Tabla 3 resume las características de los tramos utilizados para el análisis de consistencia en terreno. La ruta 4 fue segmentada en 2 tramos debido a la diferencia en condiciones topográficas que se presumió a priori afectaría el cálculo del índice de consistencia

5. Study case

The objective of this case of study was to compare consistency analysis results obtained by means of continuous measurements and using the model by Fitzpatrick and Collins (2000). This model was selected as there are no predictive models of calibrated speed profiles available in Chile. The comparison intends to dimension the error extent, which is likely to be made when analyzing consistency with calibrated models in regards to the use of in-field measurements.

In the first place measurement segments were selected on diverse roads of Chile, where GPS speed measurements were conducted. In an approximated way geometrical parameters were estimated on such roads, in order to apply the model by Fitzpatrick and Collins (2000). Then speed data were processed so as to obtain measured speed profiles and the speed profile was developed based on the selected predictive model. Both profiles were later used for the consistency analysis by using Polus method.

5.1 Selection of sections measurements

In order to conduct the consistency analysis Chilean roads were selected, which have diverse geometrical conditions, such as curvature and longitudinal slope, located on different topographic environments as plain, undulated and mountainous areas. All sections are two-lane roads each runway running in opposite direction, each lane of 3,5 m constant width and berm of 0,5m constant width. For all studied sections, traffic level was lower than 10.000 vehicles/day-year. At the moment measurements were conducted, the traffic level happened to be quite slow; therefore there were no interferences at all. Table 3 summarizes the characteristics of sections used for consistency analysis on site. Road 4 was segmented into 2 sections due to its diverse topographic conditions as it was assumed that these could affect consistency index calculation.

Tabla 3. Características generales de los tramos analizados

Table 3. General characteristics of analyzed sections

# Ruta/ #Road	Longitud (km) Length (km)	Topografía Topography	Pendiente (%) Slope (%)	# Curvas horizontales # Horizontal curves	# Registros de velocidad/ # Speed records
1	3	Ondulado/Undulated	4,2	10	3.000
2	13	Ondulado/Undulated	3,5	18	13.000
3	13	Ondulado/Undulated	3,9	35	13.000
4-1	2	Plano/ Plain	3,0	44	2.000
4-2	4	Montañoso/ Mountainous	8,0		4.000

5.2 Recolección de datos de velocidad de operación

Los datos de velocidad fueron recolectados en las rutas de la Tabla 3 mediante un GPS de 10 Hz instalado en un vehículo liviano. El equipo se instala en el parabrisas del vehículo y la antena en el techo, sobre el eje central longitudinal. El equipo GPS utilizado captura datos de velocidad cada 0,1 s.

5.2 Collection of operation speed data

Speed data were collected from roads in Table 3 by means of a GPS of 10 Hz installed on a lightweight vehicle. The device was installed on the vehicle windshield and its antenna on the roof, just on the central longitudinal axle. GPS device collects speed data every 0,1 sec.

con una precisión de 0,1 km/h para la velocidad, de 3 cm para la posición horizontal y de 0,1° para el azimut. El equipo puede además triangular en movimiento hasta 8 satélites, lo cual permite obtener una señal estable durante la recolección de datos (Racelogic, 2008).

Durante el proceso de toma de datos en terreno se hizo circular el vehículo liviano 5 veces, a fin de obtener un grupo de perfiles de velocidad suficiente para efectuar controles de precisión y construir un perfil de velocidad único. En todos los casos, el vehículo circuló en ausencia de tráfico a fin de evitar interferencias con otros vehículos. El proceso de medición y control de calidad en terreno de las mismas se realizó siguiendo las recomendaciones descritas en Echaveguren et al (2011). Estas recomendaciones apuntan a fijar un balizado de inicio y término para acoplar las mediciones repetidas y a evaluar la repetibilidad y reproducibilidad, de modo de identificar señales mal comportadas o con datos anómalos y verificar si es necesario repetir la medición o solo es necesario filtrar posteriormente esos datos anómalos.

De este modo se logró replicar en terreno la situación de medir con un tamaño muestral bajo pero representativo de la velocidad de operación.

5.3 Procesamiento de datos de velocidad de operación

Cada perfil de velocidad medido con el equipo GPS fue filtrado utilizando el filtro de Kalman y suavizado utilizando el método Loess de orden 2 y con una ventana de suavización entre 0,03 y 0,05. Estos parámetros de suavización se obtuvieron minimizando el error cuadrático medio (RMS en inglés). La Figura 2 muestra un ejemplo del perfil de velocidad medido y filtrado y un perfil de velocidad suavizado para la ruta 2.

with an accuracy of 0,1 km/h for speed, 3 cm for horizontal position and 0,1° for the azimuth. The device is also capable of triangulating up to 8 satellites in motion, which allows obtaining a stable signal during data collection (Racelogic, 2008).

During data collection process conducted in site, a lightweight vehicle moved along 5 times, so as to obtain a set of speed profiles for accuracy control and to develop a unique speed profile. In all cases the vehicle ran in absence of traffic in order to avoid interferences with other vehicles. In site measuring and quality control process was developed by following recommendations described by Echaveguren et al. (2011). Such recommendations suggest marking the beginning and ending to connect repeated measurements and evaluating repeatability and reproducibility. Thus detecting wrong signals or outliers and checking whether a measurement needs to be repeated or it will be only necessary to filter such outliers later.

Consequently it was possible to repeat the measuring experience with a small size sample on site, which is quite representative of operation speed.

5.3 Data Processing for operation speed

Each speed profile measured with the GPS device was filtered by using Kalman filter and it was smoothed by employing Loess method of order 2, with a smoothing frame between 0,03 and 0,05. These smoothing parameters were obtained by minimizing root mean square (RMS). Figure 2 shows an example of a measured and filtered speed profile and a smoothed speed profile for road 2.

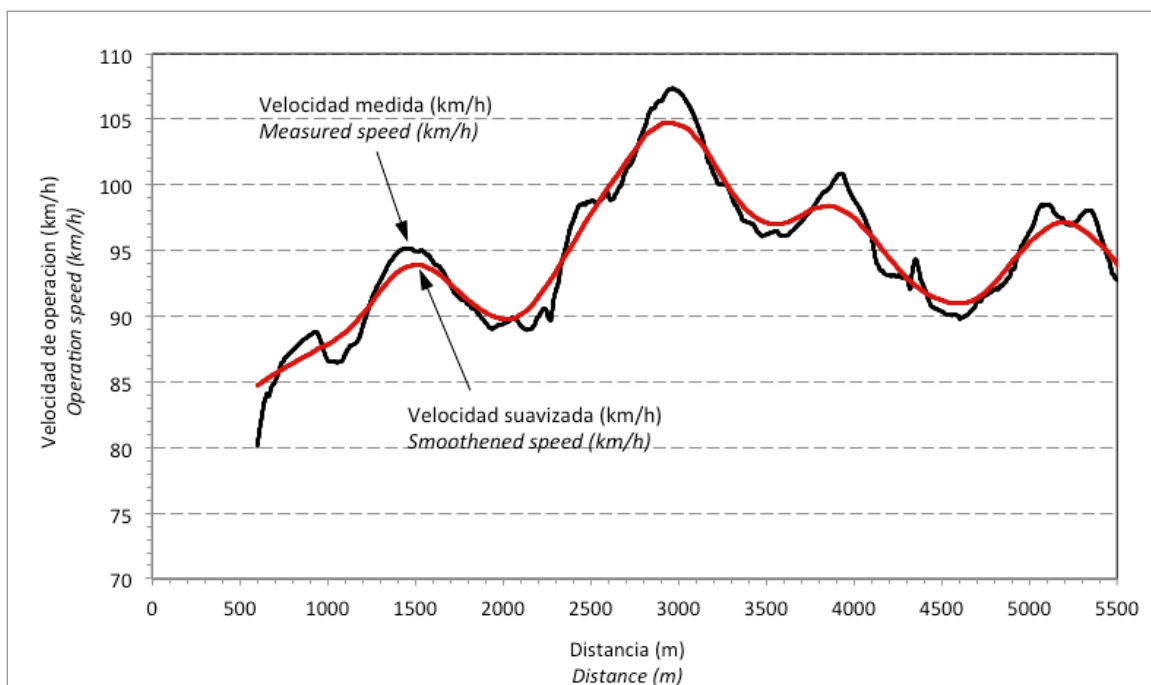


Figura 2. Ejemplo de perfil de velocidad suavizado en ruta 2 (km 0+600 al km 5+500)

Figure 2. Example of smoothed speed profile on route 2 (km 0+600 up to km 5+500)

La Tabla 4 muestra un resumen de los resultados obtenidos después del proceso de suavización, los que se utilizan posteriormente como datos de entrada para aplicar la evaluación de consistencia mediante el método de Polus. En ella se puede apreciar las diferencias en velocidad media de cada uno de los tramos.

Table 4 summarizes the results obtained after smoothing process, which are then used as inputs to apply the consistency assessment by means of Polus method. Differences of average speed can be observed on each segment.

Tabla 4. Resumen de datos de perfil de velocidad de operación procesado
Table 4. Summary of processed operation speed profile

Ruta Road	# Datos de velocidad #Speed inputs	Parámetro de suavización Smoothing parameter	RMS (km/h)	Velocidad media (km/h) Average Speed (km/h)	Desviación estándar (km/h) Standard Deviation (km/h)
1	2.700	0,05	7,8	60,5	11,1
2	12.200	0,05	1,2	92,2	6,4
3	13.580	0,03	8,6	74,3	9,5
4-1	1.900	0,05	8,4	70,4	7,3
4-2	4.000	0,03	6,4	38,9	7,7

RMS: Root mean square error (Error cuadrático medio)/ RMS: Root mean square

A partir de la Tabla 4 se puede concluir que:

- La ruta 1 concentra la variabilidad en un segmento preciso del tramo;
- La ruta 2 exhibe la menor variabilidad en la velocidad de operación;
- La ruta 3 exhibe una alta variabilidad a lo largo de todo el tramo de medición
- En los tramos 4-1 y 4-2 existe una diferencia en las velocidades medias de casi 30 km/h, lo cual es una evidencia de las amplias diferencias de trazado. Este resultado ratificó la necesidad de segmentar el camino, previo a la aplicación del método de Polus. De este modo se evita el enmascaramiento de tramos con consistencia pobre o regular en el nivel de consistencia inmediatamente anterior.

From Table 4 it can be concluded that:

- Route 1 concentrates variability on a specific road segment;
- Route 2 has the lowest operation speed variability;
- Route 3 has a high variability alongside the whole measured segment;
- On segments 4-1 and 4-2 there is a difference between average speeds of almost 30 km/h, which evidences significant road differences. This result confirmed the need of segmenting the road before applying Polus method. In this way it is possible to avoid hiding poor/regular consistency segments at the immediate previous consistency level.

5.4 Perfiles de velocidad de operación a partir de modelo de Fitzpatrick y Collins

Este perfil de velocidad corresponde a un perfil teórico, que requiere contar con un conocimiento previo de la geometría del trazado a evaluar. En este caso no se contaba con planos de construcción, por lo cual se extrajo la geometría a partir de los registros de heading, radio, altura relativa y velocidad de operación contenidos en el dispositivo GPS. Con estos datos se obtuvo el radio (R), pendiente longitudinal (i), ángulo de deflexión (w), principio y fin de curva. Con estos datos se calcularon las velocidades de operación, aceleraciones y deceleraciones usando la Tabla 2, para luego asignar a la geometría los valores de velocidad de operación y construir el perfil teórico de velocidad de operación. Cabe resaltar que el modelo utilizado no está calibrado en Chile, por lo cual se usó como una referencia para determinar la variación de la evaluación de consistencia con respecto a la medición directa.

5.4 Operation speed profiles from Fitzpatrick and Collins model

This speed profile corresponds to a theoretical profile, which requires a previous and detailed knowledge of the road geometry to be assessed. In this case construction drawings were not available; therefore geometry was reached by means of heading, radius, relative height and operation speed records obtained by the GPS device. From these data (R) radius, (i) longitudinal slope, (w) deflexion angle, curves beginnings and endings were obtained. From these data operation speeds, accelerations and decelerations were calculated using Table 2. Then operation speed values were assigned to geometry and a theoretical operation speed profile was built up. It is important to highlight that the model employed was not calibrated in Chile, therefore it was used as a reference to determine the variation of consistency regarding direct measurement.

5.5 Comparación de perfiles de velocidad medido y modelado

Se realizó una comparación de los perfiles de velocidad medido y modelado, a fin de visualizar las potenciales diferencias en los resultados de la evaluación de consistencia.

5.5 Comparing measured and modeled speed profiles

A comparison was carried out between measured and modeled speed profiles, in order to visualize potential differences on consistency assessment results.

Los perfiles considerados se muestrab gráficamente en la Figura 3. A ambos perfiles se les realizó un análisis de varianza (ANOVA) de una variable para medidas repetidas, un análisis de correlación cruzada y se estimó la diferencia de medias. Los análisis mostraron que los perfiles medidos y modelados en todas las rutas son estadísticamente diferentes, debido a que:

- Las medias de los perfiles modelados son superiores al medido en un rango que varía entre 5 y 40 km/h,
- El ANOVA mostró que las diferencias de medias son estadísticamente significativas al obtenerse en todas las comparaciones un valor $p = 0,000$ para un nivel de significancia del 95%

Studied segments are graphically depicted in Figure 3. An analysis of variance (ANOVA) - with a variable for repeated measurements - and a cross-correlation analysis were applied on both profiles in order to obtain measurement differences. Analysis showed that measured and modeled profiles are statistically different for all roads, because:

- Modeled profiles averages are higher than the ones measured in a range varying from 5 to 40 km/h
- ANOVA showed that average differences are statistically significant as all comparisons delivered a value $p = 0,000$ for a 95% significance level

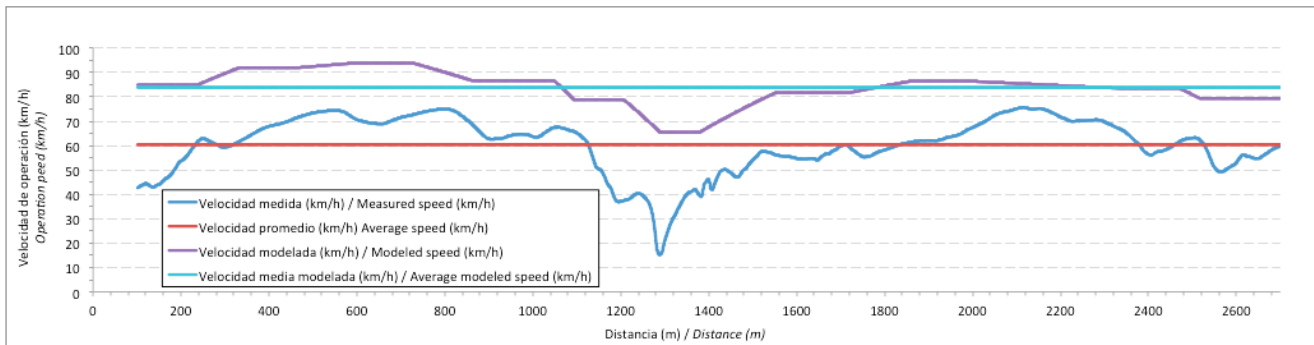


Figura 3a. Ejemplos de gráficas de perfiles de velocidad medidos y modelados para ruta 1
Figure 3a. Depicted examples of speed profiles measured and modeled for road 1

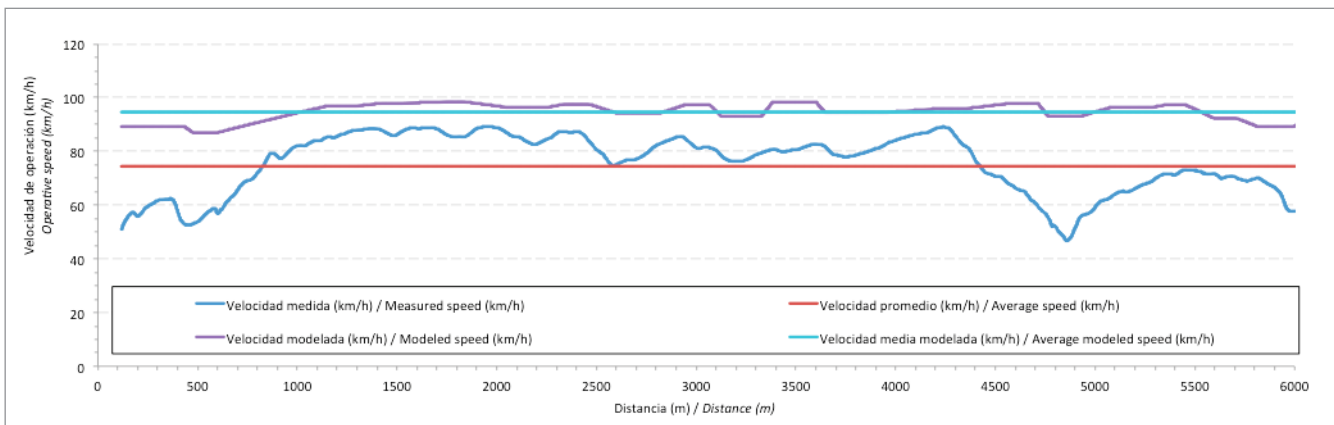


Figura 3b. Ejemplos de gráficas de perfiles de velocidad medidos y modelados para ruta 3
Figure 3b. Depicted examples of speed profiles measured and modeled for road 3

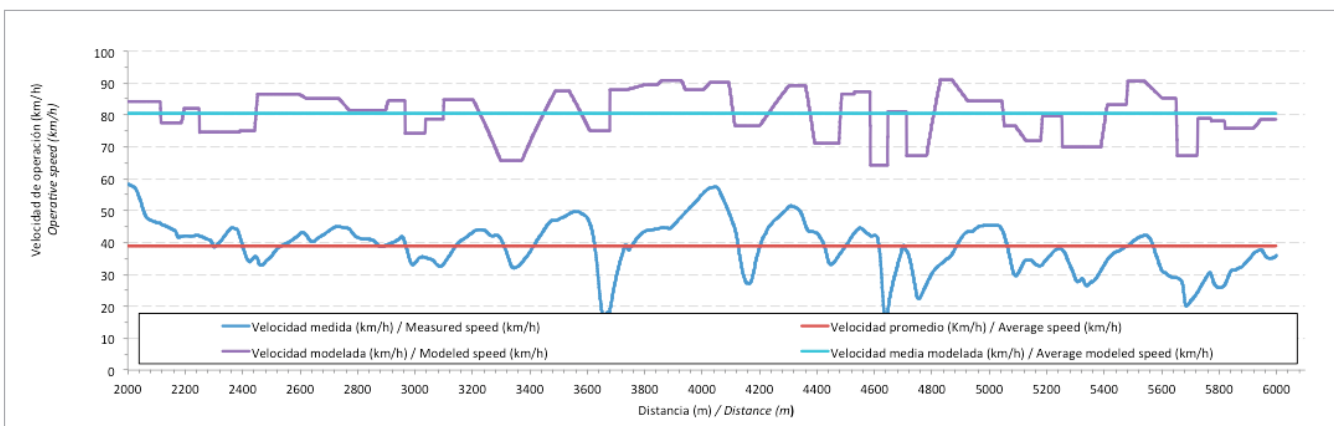


Figura 3c. Ejemplos de gráficas de perfiles de velocidad medidos y modelados para ruta 5
Figure 3c. Depicted examples of speed profiles measured and modeled for road 5

5.6 Evaluación de consistencia

La evaluación de consistencia se realizó usando las Ecuaciones 1, 2 y 3 para los registros de velocidad obtenidos mediante GPS y las ecuaciones de la Tabla 2 para el perfil de velocidad modelado.

La Tabla 5 resume los resultados del análisis de consistencia usando mediciones de perfil de velocidad. La Tabla 6 muestra los resultados del análisis de consistencia usando modelos predictivos. Los resultados de la Tabla 5 muestran que la ruta 2 se encuentra en un nivel de consistencia "aceptable", en tanto que el resto de rutas se encuentran en un nivel "pobre" (rutas 1 y 3) o muy cercanas al umbral de consistencia "pobre" – "aceptable" (rutas 4-1 y 4-2). Esto se debe esencialmente a la alta desviación estándar de la velocidad de operación respecto de la velocidad media del tramo.

5.6 Consistency assessment

Consistency assessment was carried out by employing Equations 1, 2 and 3 for speed records obtained with a GPS and, also the equations in Table 2 for the modeled speed profile.

Table 5 summarizes the consistency analysis results by using speed profile measurements. Table 6 shows the results of consistency analysis using predictive models. Results in Table 5 show that road 2 is at an "acceptable" consistency level while the other roads are at a "poor" consistency level (roads 1 and 3). Roads 4-1 and 4-2 are quite closer to "poor" – "acceptable" consistency threshold. This is mainly because of the high standard deviation of operation speed in regards to the segment average speed.

Tabla 5. Parámetros de consistencia obtenidos para cada segmento de ruta analizado usando perfiles de velocidad medidos

Table 5. Consistency parameters obtained for each road segment using measured speed profiles

Ruta/ Road	Velocidad media (km/h) Average speed (km/h)	Desviación estándar Standard deviation		Ra (m ² /s)	C (m/s)	Nivel de consistencia Consistency level
		(km/h)	(m/s)			
1	60,5	11,1	3,1	2,3	0,4	Pobre/ Poor
2	92,2	6,4	1,8	1,4	1,4	Aceptable/ Acceptable
3	74,3	9,5	2,6	2,2	0,6	Pobre/ Poor
4-1	70,4	7,0	2,0	1,6	1,1	Aceptable/ Acceptable
4-2	38,9	7,7	2,1	1,7	1,0	Aceptable/ Acceptable

La Tabla 6 por el contrario, muestra que al usar el modelo de perfil de velocidad los niveles de consistencia son sistemáticamente mejores. Esto se debe al efecto de suavización en torno a la media inducida por los modelos al usar ecuaciones independientes para cada entidad geométrica sobre la cual se estima la velocidad de operación.

Contrarily, Table 6 shows that when using the speed profile model, all consistency levels improve systematically. This is due to the smoothening effect on the average speed induced by models using independent equations for each geometry entity, which is employed to estimate operation speed.

Tabla 6. Parámetros de consistencia obtenidos para cada segmento de ruta analizado usando modelos de perfiles de velocidad

Table 6. Consistency parameters obtained for each analyzed road segment by using speed profile models

Ruta/ Road	Velocidad media (km/h) Average speed (km/h)	Desviación estándar Standard deviation		Ra (m ² /s)	C (m/s)	Nivel de consistencia Consistency level
		(km/h)	(m/s)			
1	83,7	6,6	1,8	1,4	1,4	Aceptable/Aceptable
2	97,4	0,9	0,3	0,1	2,8	Bueno/Good
3	94,7	2,7	0,8	0,6	2,5	Bueno/ Good
4-1	93,7	4,0	1,1	1,0	2,1	Bueno/ Good
4-2	80,4	7,0	2,0	1,7	1,1	Aceptable/Aceptable

Un aspecto relevante de destacar es que el método evalúa la consistencia en base a la condición de operación propia de cada tramo, por lo que no necesariamente por haber diferencias de velocidad en los grandes tramos existirá inconsistencia al interior del tramo. Esto se visualizó en las rutas 4-1 y 4-2, las cuales a pesar de mostrar velocidades medias distintas, al interior del tramo la consistencia resultó ser aproximadamente la misma.

A relevant aspect is that the method assesses consistency based on the own operation condition of each segment. Therefore, it doesn't necessarily means that the presence of speed differences on long segments will lead to inconsistency in the inside section of the segment. This was visualized on roads 4-1 and 4-2, that in spite of showing different average speeds, consistency happened to be approximately the same in the inside segment.

Asimismo, el método propuesto por Polus y utilizado en este trabajo, no resuelve por sí mismo las inconsistencias en las transiciones de cambio de velocidad. Nuevamente el tramo 4-1 y 4-2 ejemplifican esta situación, toda vez que el modelo de Polus no posee forma de analizar la transición de velocidad desde una velocidad media de 70,4 km/h a otra de 39,8 km/h. Sin embargo, esto es posible de resolver de manera iterativa identificando cambios estructurales en la velocidad media tanto en terreno calculando en tiempo real la velocidad media de viaje, como aplicando previo al análisis de consistencia un proceso de segmentación dinámica. En este caso, se debe cuidar de segmentar sólo en función de la velocidad media, dado que si se incluye la desviación estándar es posible que se obtengan tramos cortos con consistencia alta cuando en la práctica no lo son.

Al usar el perfil de velocidad modelado las desviaciones estándar disminuyen debido a la incapacidad de los modelos de predecir adecuadamente la velocidad deseada y la mínima velocidad entre curvas de distinto sentido lo cual atenúa las variaciones de velocidad entre curvas horizontales. Necesariamente, al haber una menor desviación estándar de la velocidad el valor de Ra tiende a ser menor y por tanto mayor el valor C de consistencia. Esta situación es independiente del valor de velocidad modelado, que también tiende a sobreestimar la velocidad de operación. Esto explica las importantes variaciones en la consistencia por ejemplo para la ruta 3 en donde pasa de nivel "pobre" a "bueno" al usar un modelo teórico de perfil de velocidad.

6. Conclusiones

En este trabajo se discutió el análisis de consistencia mediante el método de Polus, el cual corresponde a un método agregado de consistencia. Se dio énfasis a la obtención y procesamiento de perfiles continuos de velocidad dada su relevancia para utilizar el método. También se compararon los resultados de la evaluación de consistencia obtenidos con un modelo teórico de perfil de velocidad. A partir del trabajo desarrollado se obtuvieron las siguientes conclusiones:

El método de análisis de consistencia de Polus permite analizar segmentos largos de caminos, lo cual le otorga ventajas respecto de otros métodos de análisis de consistencia. Sin embargo, las principales limitaciones observadas en su aplicación fueron:

- El método requiere de perfiles de velocidad de operación continuos, medidos o modelados. Por un lado, los perfiles de operación continuos sólo pueden medirse mediante tecnología de posicionamiento satelital. Por otro lado, son pocos los modelos de velocidad de operación continuos disponibles en la literatura y se concentran principalmente en elementos de trazado. Estos modelos tienden a suavizar la desviación estándar de la velocidad y por tanto a sobreestimar el nivel de consistencia. El esfuerzo de modelación debe orientarse a integrar en estos modelos la tridimensionalidad del trazado geométrico del camino y su efecto sobre la velocidad de operación.

At the same time, the method proposed by Polus, which is employed in this study, does not solve by itself the inconsistencies of gear changes. Once again segments 4-1 and 4-2 confirm this situation, since Polus model is not capable of analyzing a gear change from an average speed of 70,4 km/h down to 39,8 km/h. However, this is likely to be solved in an iterative way: identifying structural changes of average speed on site by calculating real time average travelling speed, as well as applying a dynamic segmentation process previously to consistency analysis. In such a case, segmentation should only be considered in function of average speed, because if standard deviation is included, it will be possible to obtain short segments with high consistency, which is not true in practice.

By employing the modeled speed profile, standard deviations decrease due to the models' inability to properly predict expected speed and the minimum speed in curves of different directions, which reduces speed variations between horizontal curves. At lower speed standard deviation, the Ra value necessarily tends to drop and, therefore, C value of consistency tends to be higher. This is an independent situation from modeled speed value, which also tends to overestimate operation speed. Above provides an explanation for the significant consistency variations on road 3 for instance, passing from "poor" to "good" level when using a theoretical model of speed profile.

6. Conclusions

This study debated the consistency analysis by means of Polus method, which is an aggregated method of consistency. Special attention was focused on the continuous speed profile procurement and processing, provided their relevance when employing this method. The results from consistency assessment, obtained by using a theoretical model of speed profile, were also compared. The following conclusions were achieved from this study:

The Polus method for consistency analysis enables analyzing long roads segments, which provides it with advantages over other consistency analysis methods. However, the main limitations observed during its application were the following.

- *The method requires continuous operation speed profiles, either measured or modeled. On one hand, continuous operation profiles can only be measured by means of global positioning technology. On the other hand, there are few continuous operation speed models available on literature and they are mainly focused on road components. These models tend to smooth speed standard deviation and, therefore, they overestimate the consistency level. Modeling task must be focused on incorporating three-dimensional characteristics of the road segment geometry and, it must also be focused on the effects on the operational speed.*

- En los casos en que existen cambios importantes en la velocidad media y por consiguiente de diseños geométricos, el método no permite determinar el efecto de esos cambios en el valor de consistencia. Este aspecto es relevante para el rediseño de zonas de transición de velocidad. Los resultados obtenidos en las rutas 4-1 y 4-2 ilustran esta limitación. Para resolverla, es necesario recurrir a un proceso iterativo aplicando los principios de segmentación dinámica o la teoría de identificación de cambios abruptos en series de datos.
- Puesto que la consistencia se determina en función de la velocidad media del segmento, es necesario asumir como supuesto que es una buena representación de la velocidad de diseño (o de proyecto) de un camino, lo cual no es necesariamente correcto cuando los trazados son altamente inconsistentes. Esto puede llevar a una subvaloración local de la inconsistencia de un trazado.
- Los umbrales de consistencia propuestos en el modelo de Polus, son asimilables a los umbrales propuestos por Lamm, los cuales a su vez son válidos solamente en curvas horizontales con baja pendiente longitudinal. Esto lleva a la necesidad de validar los umbrales propuestos por Polus. No obstante lo cual, para análisis a nivel de perfil se consideran adecuados en tanto no se dispongan de valores validados empíricamente.
- *In cases where there are significant changes of average speed, and consequently changes of geometrical design, the method is not able to determine the effect of such changes on the consistency value. This is a relevant aspect for the design of transition speed zones. Results obtained for 4-1 and 4-2 roads depict such limitation. In order to overcome this situation, it is necessary to employ an iterative process by applying dynamic segmentation principles or by applying the theory of sudden changes in data series.*
- *Since consistency is determined in function of the segment average speed, it is necessary to assume that it is a good representation of speed design (or project design) of a road. This assumption is not necessarily true when segments are highly inconsistent. This may lead to underrate the inconsistency of a road.*
- *Consistency thresholds proposed by Polus model are similar to those thresholds proposed by Lamm, which are in turn only valid for horizontal curves with low longitudinal slopes. Nevertheless, these thresholds are considered as adequate for analyzing a profile level as long as empirically-validated values are not included.*

El uso de técnicas de medición continua de velocidad de operación (o señales discretas con alta densidad de datos), impone la necesidad de un post-procesamiento detallado de los datos para eliminar el ruido de fondo, ensamblar las señales de velocidad y posición, eliminar variaciones locales de velocidad y condensar datos a través de la suavización. Herramientas como las utilizadas en este trabajo, principalmente el filtro de Kalman y el método de suavización Loess, permiten realizar convenientemente estos post-procesamientos y son de fácil programación.

Los modelos de perfil de velocidad son útiles cuando se evalúan trazados nuevos, puesto que no se cuenta con mediciones directas de velocidad de operación. Debido a las limitaciones de los perfiles de velocidad teóricos, siempre es preferible en trazados existentes evaluar la consistencia usando mediciones directas de velocidad de operación.

En términos prácticos, se debe prestar especial atención al tratamiento de los extremos de las señales de velocidad, para evitar contabilizar como variaciones de velocidad a la necesaria aceleración en el arranque del vehículo de ensayo y su deceleración por detención. En estos casos, es recomendable comenzar y terminar las mediciones en tangentes largas a fin de no perder datos para el análisis.

El método de Polus explica la consistencia principalmente a través de la desviación estándar de la velocidad y el valor de Ra. Tanto los análisis preliminares del modelo como los resultados de su aplicación, muestran que es coherente la proporcionalidad inversa entre alta variabilidad de velocidad de operación y consistencia: a mayor variabilidad menor consistencia, independientemente del valor de velocidad media en el segmento.

The use of continuous operation speed techniques (or discrete signals with high data density) imposes the need to conduct a detailed data post-process in order to eliminate background noise, to assembly speed and position signals, to eliminate local speed variations and to condense data by means of a smoothing process. Tools employed in this research job, mainly Kalman filter and Loess smoothing method, facilitate an adequate post-processing task and they are easily programmed.

Speed profile models are useful when new road segments are evaluated, because direct measurements of operation speed are not available. Due to theoretical speed profiles limitations, it is always recommended to evaluate consistency using direct measurements of operation speeds from existing roads.

In practical terms, special attention should be given to the treatment of opposite speed signals; so as to avoid scoring the acceleration needed to start the trial vehicle and its deceleration when stopping the same vehicle. In such cases, it is suggested to start and end measurements on long tangents, so as to avoid missing data for the analysis.

Polus method explains consistency mainly by means of speed standard deviation and Ra value. The model preliminary analyses as well as the application results show that inverse proportionality is coherent between the operation speed variability and consistency: the higher variability, the lower consistency, independently from the segment average speed value.

7. Agradecimientos

El autor de este trabajo desea agradecer al Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDECYT) del Ministerio de Educación de Chile, por el financiamiento otorgado al proyecto FONDECYT 11090029, dentro del cual se enmarca este trabajo.

7. Acknowledgements

The author wishes to thank to the National Scientific and Technological Development Fund (FONDECYT) of Education Ministry of Chile, for financing the project FONDECYT 11090029, which supports this research job.

8. Referencias/ References

- Cafiso S., Digrazziano A. y La Cava G. (2005)**, Actual driving data analysis for design consistency evaluation. Transportation Research Record, 1912, 19-30.
- Cox R. y Arndt O. (2010)**, Australian experience with using speed predictions models to determinate accurate design speeds. Paper 70. 4th International Symposium on Highway Geometric Design. España.
- Echaveguren T., Altamira A., Vargas-Tejeda S., y Riveros M.D. (2009)**, Criterios para el análisis de consistencia del diseño geométrico: velocidad, fricción, visibilidad y criterios agregados. Artículo A-59. XV Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito. Argentina.
- Echaveguren T. (2010)** Modelos de velocidad de operación. Estado del arte. Documento de Investigación DT – 01/10, FONDECYT 11090029. Universidad de Concepción. Chile.
- Echaveguren T., Sepúlveda P. y Vargas-Tejeda S. (2011)**, Evaluación de precisión de mediciones de velocidad de operación en carreteras obtenidas con GPS. Artículo 91. XV Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte. Chile.
- Felipe E. y Navin, F. (1998)**, Automobiles on horizontal curves. Experiment and observations. Transportation Research Record, 1628, 50 – 56.
- Fitzpatrick K. y Collins J. (2000)**, Speed profile model for two-lane rural highways. Transportation Research Record, 1737, 42 – 49.
- García A. y Camacho A. (2009)**, Evaluación de la seguridad vial de carreteras convencionales mediante la determinación de la consistencia global de su diseño geométrico. Carreteras, 163, 21 – 32.
- Kim D. y Langley R. (2000)**, Kalman-filter-based GPS ambiguity resolution for real-time long-baseline kinematic applications. Workshop of the Central European Initiative (CEI) WG: Satellite Navigation Systems, Polonia.
- Lamm R., Chueiri E., Hayward J. y Paluri A. (1988)**, Possible design procedure to promote design consistency in highway geometric design on two-lane rural roads. Transportation Research Record, 1195, 111 – 122.
- Memon A., Khaskheli G. y Qureshi A. (2008)**, Operating speed models for two-lane rural roads in Pakistan. Canadian Journal of Civil Engineering, 35(5), 443 – 453.
- Pérez A., García A., Camacho F. y D'Attoma P. (2010)**, Modeling operating speed and deceleration on two-lane rural roads with global positioning system data. Transportation Research Record, 2171, 11 – 20.
- Polus A., Pollatscheck M. y Mattar-Habib C. (2004)**, New consistency model for rural highways and its relationship to safety. Journal of Transportation Engineering, 130(3), 286 – 293.
- Polus A., Pollatscheck M., Mattar-Habib C. y Jarroush J. (2005)**, An enhanced, integrated design-consistency model for both level and mountainous highways and its relationships to safety. Road & Transport Research, 14(4), 13 – 26.
- Racelogic (2008)**, VBox mini User Guide. Racelogic Inc. Reino Unido.
- Rim H., Oh Ch., Park J. y Lee G. (2011)**, Correction of erroneous vehicle speed data with locally weighed regression for GPS - based probe vehicle monitoring. 90th TRB Annual Meeting. Estados Unidos.
- TIBCO (2008)** TIBCO Spotfire S+(R) 8.1. Guide to statistics. TIBCO Software Inc. Estados Unidos.
- Zhao W., Goodchild A. y McCormack E. (2011)**, Evaluating the accuracy of spot speed data from global positioning systems for estimating truck travel speed. Transportation Research Record, 2246, 101 – 110.