

EVALUACION DE PRECISION DE MEDICIONES DE VELOCIDAD DE OPERACIÓN EN CARRETERAS OBTENIDAS CON GPS.

Tomás Echaveguren (Autor para correspondencia)

Dr. Cs., Profesor Asociado - Universidad de Concepción, Chile.

techaveg@udec.cl

Patricia Sepúlveda

Ingeniero Civil - Universidad de Concepción, Chile.

pasepulveda@udec.cl

Sergio Vargas-Tejeda

Dr. Cs., Profesor Asistente - Universidad del Bio Bio, Chile.

svargas@ubiobio.cl

RESUMEN

La tecnología GPS representa una oportunidad para ampliar las capacidades de toma de datos para desarrollar modelos de perfiles de velocidad de operación más completos. Sin embargo se requiere al mismo tiempo evaluar los niveles de precisión del sistema de medición y su influencia en la modelación de velocidad de operación. Las técnicas de estudio de precisión de sistemas de medición provenientes de la disciplina de control de calidad, constituye una valiosa herramienta para estos propósitos.

El objetivo de este artículo es discutir los resultados de un experimento de campo destinado a determinar la precisión de mediciones de velocidad de operación realizadas con un GPS RTK sub-métrico. Para ello se realizó un experimento de medición que aportó 180 registros de velocidad con 495 puntos de datos cada uno. Se aplicó el método de correlación cruzada y de análisis de variabilidad conjunta para estudiar la precisión.

Se concluyó que el sistema de medición es repetible y reproducible, siendo el margen de error absoluto inferior a los 4 km/h y la desviación estándar inferior a 0,9 km/h. Atendiendo a los supuestos asumidos en el experimento, se recomienda incluir datos de trayectoria para explicar con mayor certeza la variabilidad parte a parte del sistema de medición.

Palabras Clave: Consistencia – Carreteras – Velocidad – GPS – Repetibilidad – Reproducibilidad

1.- INTRODUCCION

La consistencia del diseño geométrico de carreteras es un enfoque de análisis que permite contrastar lo que proporciona el diseño con lo que requiere el usuario, tanto para diseños nuevos, como para rediseños y vías existentes lo cual favorece la seguridad vial (Polus y Mattar-Habib, 2004; Lamm et al, 1999). Las técnicas de análisis de consistencia realizan este contraste comparando la velocidad de operación y la de diseño para los elementos geométricos del trazado (curvas, rectas, intersecciones, pendientes longitudinales, etc.). Conocer la velocidad a la cual circulan los conductores permite identificar sectores del trazado en el cual exceden la velocidad de diseño, aumentando las inconsistencias y por consiguiente el riesgo de accidentes (Echaveguren et al, 2010).

Mientras que la velocidad de diseño se especifica en los proyectos de diseño o se infiere a través de la geometría existente, la velocidad de operación debe medirse en terreno o bien estimarse a través de modelos, los cuales a su vez requieren también de registros de velocidad de operación. Por tanto un aspecto esencial para el análisis de consistencia es la medición adecuada de la velocidad de operación. Dependiendo del método de análisis de consistencia, pueden requerirse mediciones continuas, como en el caso del modelo de Polus y Mattar-Habib (2004) o puntuales, como el caso del enfoque de Lamm et al (1999).

Una de las limitantes para obtener perfiles de velocidad de operación es el costo del equipamiento requerido para medirla. Si bien es posible medir puntualmente velocidad en diversas secciones de trazado, su precisión y representatividad está limitada por el número de sectores considerados para medir, por los medios tecnológicos empleados para ello y por los requerimientos de modelación de la velocidad de operación respecto de la geometría del trazado.

Por ejemplo, la mayor parte de los modelos que describen la relación entre geometría y velocidad, solo describen puntos del perfil de velocidad como por ejemplo el radio de curvatura en la mitad de una curva horizontal (Echaveguren et al, 2010). En el caso de la modelación de velocidad en curvas y contra-curvas (curvas en "S"), se requiere al menos mediciones en las tangentes de entrada, intermedia, de salida y en las curvas, considerando registros de velocidad, posición y aceleración (Echaveguren et al, 2010).

En este sentido, los métodos manuales o con equipamiento fijo requeridos han sido desplazados por métodos basados en la tecnología de sistemas de posicionamiento global (GPS) y sus pares GLONASS y Galileo (Xu, 2010), puesto que permiten recopilar a bajo costo diversas variables de tráfico tales como velocidad, aceleración, trayectorias, demoras, tiempos de viaje, entre otras (Li, 2009).

Los métodos de medición de variables de tráfico basados en GPS se clasifican según Li (2009), en sistemas pasivos y activos. Los sistemas pasivos son aquellos que utilizan GPS de navegación usualmente para el control y seguimiento de flota, como por ejemplo los usados en el transporte de carga y en el transporte público. Ejemplo de estos sistemas es el utilizado en transporte público, estudiado por Cortés et al (2011) para el caso de Santiago de Chile.

Si bien estos sistemas poseen la ventaja de producir información sistemáticamente, requieren desarrollos informáticos adicionales para procesar datos y obtener a partir de la localización otras variables de tráfico. En el caso de los sistemas activos, se equipa un vehículo de prueba con un sistema GPS de alta precisión, el cual permite obtener casi en tiempo real datos de posición y dependiendo del soporte informático que utilice, directamente variables de tráfico.

En la literatura relacionada con modelación de consistencia, existen dos ejemplos que grafican sistemas de medición activos. Por un lado, Memon et al (2007) realizaron mediciones con un GPS con la tecnología RTK para obtener perfiles de velocidad de operación, y Pérez et al (2010) utilizaron un GPS de navegación manual para el mismo propósito. Por su parte Zhao et al (2011), compararon mediciones realizadas con un vehículo pesado instrumentado con GPS RTK para contrastarlo con sensores de piso fijos en Estados Unidos, con cual estimaron la exactitud de las mediciones del GPS asumiendo como medida verdadera la medición obtenida con los sensores de piso.

Son dos los métodos posibles para estimar velocidad de operación mediante sistemas activos basados en GPS: uno de ellos es el seguimiento vehicular, caso en el cual la variable crítica es el control de error mediante la medición en terreno del espaciamiento vehicular (Li, 2009; Echaveguren et al, 2010). Otro es realizar mediciones con un grupo de conductores y establecer patrones de comportamiento para diversos percentiles de velocidad con el fin de asegurar un tamaño muestral mínimo que garantice representatividad de los valores medidos (Li, 2009; Schuessler y Axhausen, 2009).

En ambos casos es necesario contar con un sistema de medición que permita dimensionar su precisión y exactitud, que particularmente en los GPS tienen diversas causas: la tecnología, la variabilidad de los conductores, su respuesta a la geometría, las oscilaciones de la medición por interferencia satelital, las condiciones ambientales de medición.

La precisión corresponde a la variabilidad de una medición con respecto a un valor determinado, que no necesariamente es el valor verdadero, en tanto que la exactitud corresponde a la distancia entre el valor medido y el valor verdadero. En este sentido, existe evidencia en la literatura acerca de la exactitud de los sistemas GPS, como por ejemplo en los trabajos de D'Este et al (1999) y Witte y Wilson (2004).

D'Este et al (1999) analizaron la exactitud de las mediciones de velocidad usando sistema GPS montado en un vehículo acondicionado, a partir del cual estimaron el error de la medición en el dominio del tiempo a partir de valores verdaderos de velocidad, llegando a errores del orden de 1 a 3 km/h a velocidades de referencia de hasta 90 km/h. Similarmente, Witte y Wilson (2004) evaluaron la exactitud de GPS no diferencial para mediciones de velocidad de ciclistas pero en base a los errores de especificación de posición capturada por el sistema GPS.

En contraste existen escasos estudios de evaluación de precisión de las mediciones de velocidad con GPS, lo cual está vinculado esencialmente al trabajo de medición, más que al uso del aparato de medición mismo. Memon et al (2007) por ejemplo, comparó mediciones realizadas con grupos de conductores y mediante seguimiento vehicular en carretera usando

el error cuadrático medio como criterio. Sin embargo, esta comparación es más bien una comparación de 2 sistemas de medición distintos. Por su parte, Pérez et al (2010) compararon la variabilidad en la velocidad medida con video cámaras y GPS de navegación montado en vehículos particulares, obteniendo diferencias visibles en la variabilidad entre uno y otro sistema, pero al igual que en el caso de Memon et al (2007), Pérez et al compararon sistemas de medición distintos, por lo cual tampoco estas comparaciones pueden considerarse como análisis de calidad de las mediciones.

Considerando lo anterior, este trabajo propone un método de evaluación de la calidad de mediciones de velocidad de operación obtenidas mediante GPS RTK, basado principalmente en el estudio de la precisión. El método se abocó a mediciones restringidas a bajos tamaños muestrales, dado que es de interés evaluar el comportamiento emulando la captura de datos en terreno en sectores largos de trazado, datos que son de interés para evaluar la consistencia agregada basada en el modelo de Polus y Mattar-Habib (2004).

Para ello, en primer lugar se discuten los conceptos básicos asociados a sistemas de calidad de mediciones: repetibilidad y reproducibilidad (R&R) como indicadores de precisión de un sistema de medición. En segundo término, se presenta el experimento aplicado, que incluye el diseño experimental, la toma de datos y su procesamiento. La tercera parte discute el análisis de R&R en base a los métodos de evaluación de precisión mediante correlación cruzada espacial (IRE) y Repetibilidad y Reproducibilidad conjunta (GRR). Finalmente se presentan las conclusiones del estudio.

2. CONTROL DE CALIDAD DE SISTEMAS DE MEDICION

Un sistema de medición se define como la colección de operaciones, procedimientos, instrumentos de medición, equipo, software y personal para asignar un número a una característica dada (Escalante, 2004). Cualquier tipo de proceso requiere dentro de su organización un sistema de medición adecuado, que permita medir la calidad de las características de los productos y minimizar los errores. Los errores en los sistemas de medición se clasifican en dos categorías: errores de exactitud y errores de precisión.

Particularmente, la precisión puede medirse mediante estudios de repetibilidad y reproducibilidad. La repetibilidad corresponde a la variación en las medidas hechas por un sólo operador en la misma superficie y con el mismo instrumento de medición. Un sistema de medición es repetible si múltiples mediciones realizadas exactamente en el mismo lugar, con el mismo procedimiento y bajo las mismas condiciones resultan estadísticamente equivalentes (Escalante, 2004).

La reproducibilidad en tanto, corresponde a la variación entre las medias de las mediciones hechas por varios operadores con las mismas superficies y con el mismo instrumento de medición. Un sistema de medición es reproducible si múltiples mediciones realizadas en el mismo lugar y bajo las mismas condiciones, pero con diferentes equipos o métodos de medición, son estadísticamente equivalentes (Escalante, 2004).

Los métodos de análisis de repetibilidad y/o reproducibilidad se pueden clasificar en convencionales o alternativos (Solís, 2011). Los métodos convencionales son métodos estadísticos tales como el análisis de varianza (ANOVA) o el de la norma ISO 5725 (ISO, 1997) o métodos de correlación como el de repetibilidad espacial. Entre los métodos alternativos destacan los métodos de análisis fractal y de redes neuronales (Solís, 2011).

3. METODOS DE EVALUACION DE PRECISION

La precisión se expresa a través de la repetibilidad y reproducibilidad. Los métodos habitualmente usados intentan medir la variabilidad de dos o más series de datos ya sea comparándolas de a pares o en conjunto. Los métodos más conocidos son el análisis de varianza (ANOVA) y el análisis de precisión conjunta (GRR), que permiten comparar grupos de señales (Montgomery, 1990).

Estos métodos se utilizan habitualmente en ingeniería de pavimentos pero no tan frecuentemente para el estudio de otros tipos de equipos de medición de variables de transporte. También los métodos de correlación aportan información para pares de señales. Entre estos destaca por ejemplo el de correlación cruzada espacial, utilizado por Cebon (2000) para comparar señales de dispositivos de registro de pesaje en movimiento. A continuación se describen cada uno de ellos.

3.1.- Análisis de Varianza

El método de ANOVA muestra que las observaciones y_{ij} de una característica de calidad dada (variable respuesta), se pueden estimar mediante la superposición de su media global μ , del efecto del tratamiento i -ésimo τ_i y del error aleatorio ε_{ij} (Ec. 1).

$$\hat{y}_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

El método prueba la hipótesis nula $H_0: \mu_1 = \mu_2 \dots = \mu_a$, contra la hipótesis alternativa dada por $H_a: \mu_1 \neq \mu_2$ y/o $\dots \mu_{k-1} \neq \mu_k$, para determinar si existen diferencias entre las medias de los “j” repeticiones de la medición. Equivalentemente, las hipótesis se pueden escribir como $H_0: \tau_1 = \tau_2 \dots = \tau_k = 0$ y $H_a: \tau_i \neq 0$ para algún i , para determinar si existe efecto del i -ésimo tratamiento sobre la media global de la variable respuesta.

En el caso de la velocidad, las medias μ_i corresponden a “i” repeticiones obtenidas en “j” segmentos con condiciones de medición distintas (velocidad de referencia, rectas, curvas, terreno plano, etc.). Una restricción importante de este método es el estricto cumplimiento de las hipótesis que lo sustentan, la cual se determina estudiando los residuales. Si estos son independientes se distribuyen normal y existe igualdad de varianza entre repeticiones, entonces, el método es válido. Esto lo hace restringido en su aplicación cuando los datos son altamente heterogéneos.

3.2.- Correlación Cruzada Espacial

Este método compara dos procesos conjuntamente estacionarios $x(t)$ e $y(t)$ cuya covarianza cruzada de orden k se define como (Hair et al, 2006):

$$\sigma_{xy}(k) = E[(x(t) - \mu_x)(y(t+k) - \mu_y)] \quad (2)$$

Si los procesos estacionarios $x(t)$ e $y(t)$ corresponden a mediciones de datos de una variable determinada, entonces la función de correlación cruzada muestral entre ambas mediciones $x(t)$ e $y(t)$ viene dada por el índice de repetibilidad/reproducibilidad espacial (Cebon, 2000):

$$IRE(k) = \frac{E[(x(z) - \bar{x})(y(z+k) - \bar{y})]}{\sqrt{E[(x(z) - \bar{x})^2]E[(y(z) - \bar{y})^2]}} = \frac{\hat{\sigma}_{xy}(k)}{S_x S_y} \quad (3)$$

En donde z es la variable de indización de las señales $x(t)$ e $y(t)$, $E[]$ es el operador esperanza, \bar{x} e \bar{y} son los valores medios de las señales $x(t)$ e $y(t)$; k es el desfase (*lag*) entre señales, el cual permite sincronizarlas espacialmente; S_x y S_y son las desviaciones estándares. La variable $\hat{\sigma}_{xy}$ representa la covarianza entre las señales x e y . El valor del índice IRE varía entre -1 y 1 , siendo el valor 0 el caso en que no existe repetibilidad o reproducibilidad entre pares de señales.

3.3.- Análisis de Precisión Conjunta

Este tipo de análisis se realiza mediante el método GRR (*gauge repeatability and reproducibility*). Es una forma de evaluar en forma conjunta la repetibilidad y reproducibilidad, desglosando las fuentes de variabilidad en variabilidad parte a parte, variabilidad debido al operador y variabilidad inherente a la medición.

El método se sustenta en la formulación de ANOVA para determinar la contribución a la varianza de las partes (geometría), del operador (conductor) y del equipo (GPS). Estas dos últimas representan la repetibilidad y reproducibilidad.

Por lo tanto la variabilidad total del sistema de medición estará determinada por la raíz de la suma de los cuadrados de ambos indicadores (Ec. 4). A su vez la variabilidad total estará dada por la raíz de este último término al cuadrado más la variabilidad parte a parte al cuadrado (Ec. 5).

$$\text{Variabilidad Sistema Medicion} = \sqrt{\text{Repetibilidad}^2 + \text{Reproducibilidad}^2} \quad (4)$$

$$\text{Variabilidad Total} = \sqrt{(\text{Variabilidad Sistema Medicion})^2 + (\text{Variabilidad Parte a Parte})^2} \quad (5)$$

4. EL EXPERIMENTO DE TERRENO

El experimento consideró tres etapas. En la etapa 1 se realizó un diseño experimental en donde se establecieron las condiciones de medición en terreno. En la etapa 2 se realizaron las mediciones propiamente tal. En la etapa 3 se realizó el procesamiento de datos y la preparación de la base de datos para aplicar el método de análisis de calidad.

4.1.- Diseño Experimental

Para realizar las mediciones en terreno se identificó una ruta que cumplió con las siguientes condiciones:

- Bajo volumen de tráfico (TMDA < 200 veh/día-año)
- Que contuviera tramos curvos y rectos con una longitud suficiente para alcanzar y mantener una cierta velocidad de referencia.
- Longitud estandarizada de los tramos: 500 m.
- Terreno aproximadamente plano (pendiente longitudinal entre $\pm 4\%$).
- Pavimento en buen estado
- Ausencia de accesos, viviendas u otro elemento que pudiera interferir en la medición de velocidad.

Se identificaron en esa ruta 2 curvas horizontales de radio y desarrollo similar y dos rectas de igual longitud. Se seleccionaron 3 conductores con distintos niveles de experiencia en la conducción, y se les pidió que circularan 5 veces por los tramos de prueba a velocidades de referencia de 50, 70 y 90 km/h. Para evitar el efecto del acostumbramiento se aleatorizó la velocidad, tramo y orden de salida de los conductores. Con esto, la cantidad de registros obtenidos resultó de:

$(3 \text{ conductores}) \times (5 \text{ pasadas}) \times (3 \text{ velocidades}) \times (4 \text{ tramos}) = 180 \text{ registros de velocidad, con } 495 \text{ valores de velocidad medidos por cada registro totalizando } 89.100 \text{ datos de velocidad (ver Figura 1).}$

4.2.- Toma de datos en terreno

La toma de datos se realizó con un GPS portátil basado en la tecnología RTK, el cual es capaz de registrar datos de posición, velocidad y trayectoria cada 0,1 s con una resolución de 0,05 %, 0,2 km/h y 1 cm respectivamente. También es capaz de registrar el *heading* (azimut en el plano de Lagrange) con una resolución de 0,1°.

Las mediciones fueron tomadas con luz día, buenas condiciones climáticas y con un vehículo liviano. En término de distancia, para los 500 m se generaron datos cada 1 m, por lo cual cada uno de los 180 registros incluyó 500 datos de velocidad, posición y trayectoria.

4.3.- Procesamiento de Datos

El procesamiento de datos consideró el filtrado de datos, eliminación de datos anómalos (outliers) y sincronización de medidas repetidas respecto del kilometraje. Particularmente, el equipo utilizado (GPS-RTK 1 Hz), calcula de formas diferentes velocidad y posición. Para calcular la velocidad el equipo se basa en el efecto *Doppler*. Para calcular la posición utiliza triangulación con 4 a 8 satélites; esto permite calcular la posición utilizando la velocidad o viceversa lo que mejora la calidad de los datos, pero a la vez demanda el filtrado de la señal para efectuar el acoplamiento de velocidad y posición.

Para el filtrado de señales se utilizó el Filtro de Kalman (FK). El FK es un procedimiento matemático recursivo que permite filtrar señales de datos discretos con el propósito de predecir estados o bien suavizar información con alta variabilidad a partir de una señal medida. Posee una amplia aplicación en la resolución de ambigüedades en las mediciones realizadas con GPS, particularmente en la predicción cinemática sub-centimétrica.

el FK permite estimar el estado x de un proceso en tiempo discreto (como las velocidades medidas con el equipo GPS), descrito por las Ec. 6 y 7 (Janson et al, 2006):

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1} \quad (6)$$

a partir de una medición z que es:

$$z_k = Hx_k + v_k \quad (7)$$

Las variables aleatorias w y v representen el ruido del proceso y de la medición respectivamente. Se asume que son independientes, que se distribuyen normal, que ambas medias son 0 y que la covarianza del ruido del proceso es Q y de la medición es R . El proceso lo que busca es mediante un ciclo recursivo predecir el estado k de la variable x y a la vez corregirla eliminando los ruidos w y v , minimizando el error cuadrático medio respecto de la matriz de covarianza (Q).

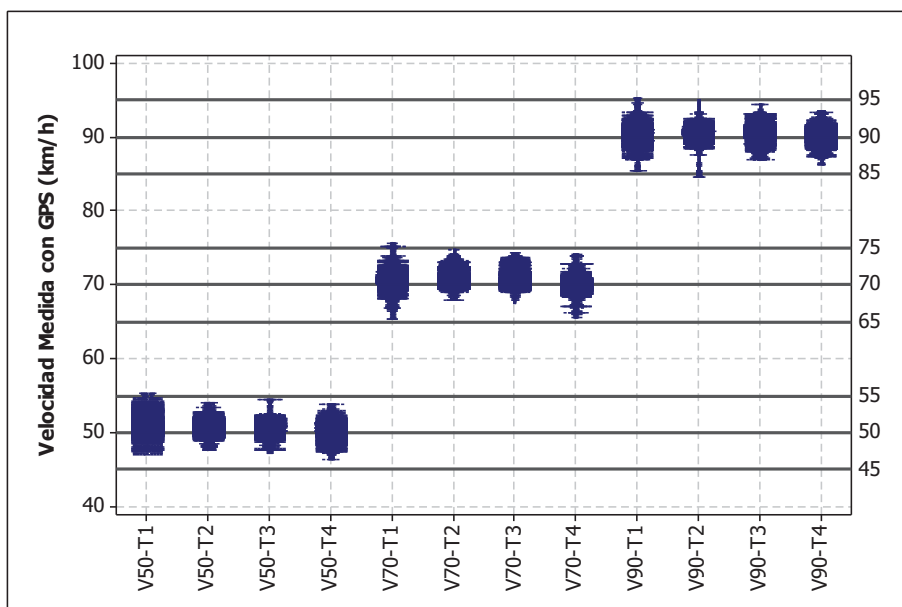
En el caso particular del equipo utilizado, mediante el FK se suavizó la señal al eliminar datos anómalos y predecir el estado de la variable velocidad, asumiendo que el desacoplamiento posición y velocidad originado por la tecnología de medición produce una contaminación o ruido. De este modo, el FK permitió: eliminar los *dropouts*¹ originados en la pérdida de calidad de la señal satelital y acoplar las mediciones de velocidad y distancia.

4.4.- Datos Obtenidos

La Figura 1 muestra los registros procesados de velocidad sobre los cuales se realizó el análisis de precisión. En ella se agrupan los datos de los 3 conductores por tramo, velocidad de referencia para las 5 pasadas. En el gráfico se puede visualizar que la máxima oscilación de los registros de velocidad es del orden de 4 a 5 km/h.

¹ Pérdida de información debido a oscilación de la calidad de la recepción satelital.

Figura 1: Registros de velocidad obtenidos en terreno



Las Tablas 1 a la 6 muestran un resumen de los valores de velocidad y sus desviaciones estándares según velocidad de referencia, conductor, geometría y repetición. Estos valores representan el valor medio de los 500 datos de velocidad medidas para segmentos curvos (C+, C-) y rectos (R+, R-). El signo representa el sentido de la pendiente longitudinal.

Tabla 1: Valor medio de velocidad y su desviación estándar (s) para 50 km/h en segmentos curvos

Segmento de carretera	Pasada	Conductor 1		Conductor 2		Conductor 3	
		velocidad (km/h)	s	velocidad (km/h)	s	velocidad (km/h)	s
C+	1	50.2	0.76	49.8	1.3	52.7	1.1
	2	50.4	0.6	50.3	0.2	52.5	1.2
	3	50.7	0.6	50.7	0.4	51.4	1.3
	4	51.1	1.0	50.0	0.6	51.8	1.2
	5	51.3	1.0	50.0	1.5	50.6	1.2
C-	1	50.1	0.4	50.8	0.7	50.1	1.1
	2	51.0	0.9	52.0	1.2	49.3	1.0
	3	50.0	0.5	51.5	0.5	50.3	0.8
	4	50.4	0.8	51.6	0.7	50.3	1.0
	5	50.7	0.6	50.8	1.5	51.0	0.5

Tabla 2: Valor medio de velocidad y su desviación estándar (s) para 50 km/h en segmentos rectos.

Segmento de carretera	Pasada	Conductor 1		Conductor 2		Conductor 3	
		velocidad (km/h)	s	velocidad (km/h)	s	velocidad (km/h)	s
R+	1	50.2	0.6	49.9	0.8	51.4	0.7
	2	51.1	0.3	50.8	0.9	49.7	1.0
	3	50.1	0.7	51.2	0.7	50.2	0.8
	4	51.2	0.8	50.5	0.5	51.9	1.5
	5	50.4	0.5	50.7	0.9	48.6	1.1
R-	1	49.9	0.5	49.6	1.2	50.6	0.8
	2	49.8	0.5	50.3	1.3	51.0	1.8
	3	50.3	1.0	49.9	1.6	49.6	0.8
	4	50.5	0.6	50.2	1.3	48.9	1.6
	5	51.4	1.1	50.1	1.3	50.5	0.5

Tabla 3: Valor medio de velocidad y su desviación estándar (s) para 70 km/h en segmentos curvos

Segmento de carretera	Pasada	Conductor 1		Conductor 2		Conductor 3	
		velocidad (km/h)	s	velocidad (km/h)	s	velocidad (km/h)	s
C+	1	70.1	0.9	71.5	1.1	70.2	1.9
	2	70.0	1.0	69.7	3.4	71.0	0.8
	3	70.0	0.9	70.5	1.1	72.5	1.6
	4	70.4	0.8	71.0	1.3	70.9	0.8
	5	69.9	0.6	70.8	0.3	70.8	1.3
C-	1	70.7	0.5	-	-	71.4	1.0
	2	70.3	0.5	71.6	0.9	72.2	1.2
	3	70.0	0.6	71.0	0.9	70.9	1.2
	4	70.3	0.5	71.2	0.9	70.5	1.6
	5	70.5	0.3	71.1	1.0	70.7	1.2

Nota: la pasada 1 del conductor 2 fue eliminada debido a una falla en el sistema vinculación con los satélites, lo cual arrojó mediciones nulas en todo el segmento de medición.

Tabla 4: Valor medio de velocidad y su desviación estándar (s) para 70 km/h en segmentos rectos

Segmento de carretera	Pasada	Conductor 1		Conductor 2		Conductor 3	
		velocidad (km/h)	s	velocidad (km/h)	s	velocidad (km/h)	s
R+	1	70.1	0.3	70.6	0.4	71.6	1.3
	2	72.2	1.0	70.3	0.6	70.5	1.3
	3	70.1	0.5	70.1	0.5	72.4	0.9
	4	70.2	0.5	70.5	0.5	71.2	1.3
	5	70.5	0.5	70.2	1.0	72.0	0.8
R-	1	69.2	0.5	70.0	0.8	69.7	1.6
	2	69.7	0.7	69.1	1.6	70.4	1.4
	3	69.5	0.5	70.1	0.5	70.1	0.7
	4	69.7	0.5	69.9	0.6	71.0	1.0
	5	70.0	0.6	69.8	2.5	70.8	1.5

Tabla 5: Valor medio de velocidad y su desviación estándar (s) para 90 km/h en segmentos curvos

Segmento de carretera	Pasada	Conductor 1		Conductor 2		Conductor 3	
		velocidad (km/h)	s	velocidad (km/h)	s	velocidad (km/h)	s
C+	1	90.9	0.3	90.6	0.4	91.0	1.3
	2	90.2	1.0	90.4	0.6	90.9	1.3
	3	91.4	0.5	88.8	0.5	92.0	0.9
	4	90.1	0.5	90.2	0.5	90.4	1.3
	5	89.9	0.5	87.9	1.0	89.1	0.8
C-	1	90.9	0.5	90.1	0.8	91.4	1.6
	2	90.3	0.7	88.4	1.6	91.8	1.4
	3	90.1	0.5	91.1	0.5	89.8	0.7
	4	90.9	0.5	90.7	0.6	90.1	1.0
	5	89.9	0.6	90.8	2.5	90.6	1.5

Tabla 6: Valor medio de velocidad y su desviación estándar (s) para 90 km/h en segmentos rectos

Segmento de carretera	Pasada	Conductor 1		Conductor 2		Conductor 3	
		velocidad (km/h)	s	velocidad (km/h)	s	velocidad (km/h)	s
R+	1	91.4	0.8	89.8	1.4	91.4	1.0
	2	90.8	0.6	90.6	1.4	90.9	1.2
	3	90.5	0.5	89.2	1.6	92.7	0.4
	4	90.9	0.6	90.2	1.3	90.6	1.0
	5	90.3	0.3	89.9	0.7	89.0	0.9
R-	1	90.3	0.6	89.0	1.1	91.4	0.9
	2	91.0	0.6	90.6	0.6	90.9	0.7
	3	91.5	0.9	89.2	1.4	92.7	0.9
	4	90.7	0.6	90.2	1.2	90.6	0.9
	5	89.7	0.9	89.9	1.1	89.0	1.2

5. ANALISIS DE RESULTADOS

La evaluación se realizó en dos etapas. En la primera se realizó un análisis exploratorio de datos y en la segunda se aplicaron dos técnicas de análisis: correlación cruzada espacial y evaluación conjunta. Estas técnicas se utilizaron tanto para el estudio de la repetibilidad como de la reproducibilidad.

5.1.- Análisis Exploratorio de Datos

Con estos datos se realizó un estudio exploratorio simple a partir del cual se obtuvieron las siguientes conclusiones previas a la evaluación de precisión del proceso:

Al comparar la variabilidad absoluta respecto de la velocidad para todos los conductores para todos los tramos y cada valor de velocidad de referencia se llegó a que el rango de variación de velocidad fue entre: 1 y 3 Km/h a la velocidad de referencia de 50 km/h, de 2 a 3 Km/h para la velocidad de 70 km/h y de 3,5 a 4 km/h para la velocidad de 90 km/h. Esto implica que la variabilidad total oscila entre 1 y 4 km/h.

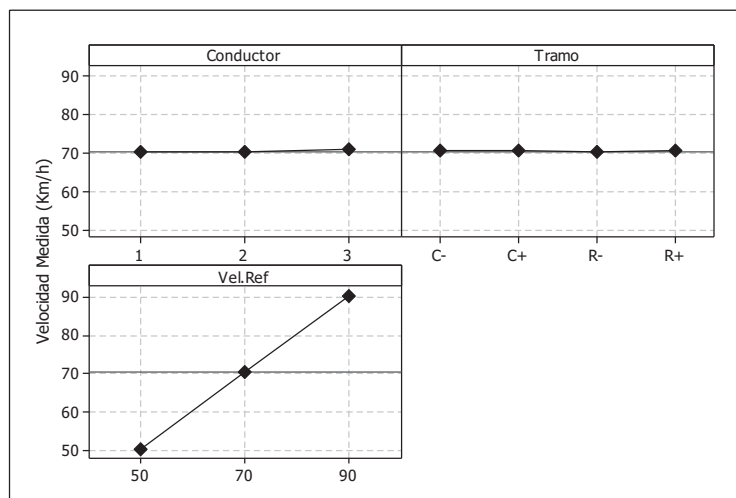
Al comparar la variabilidad absoluta respecto de los conductores, para todos los tramos y según cada velocidad de referencia, se llegó a que el rango de variación de velocidad entre conductores fue entre: 1,5 y 4 Km/h a una velocidad de referencia de 50 km/h; entre 2,5 y 3 Km/h para una velocidad de 70 km/h y de 2 a 4 km/h para una velocidad de 90 km/h.

Para realizar una exploración general de los datos se utilizaron diagramas de efectos principales (Figura 2) y de interacciones (Figura 3), que son de uso habitual en el análisis exploratorio de datos.

El diagrama de efectos principales de la Figura 2, muestra que el factor “Conductor”, no produce un efecto significativo en el valor de la gran media de la velocidad (70 km/h) dado que no la modifica. Igual comportamiento sobre la gran media exhibe el factor “Tramo”, que represente la geometría (Ver sección 4.4).

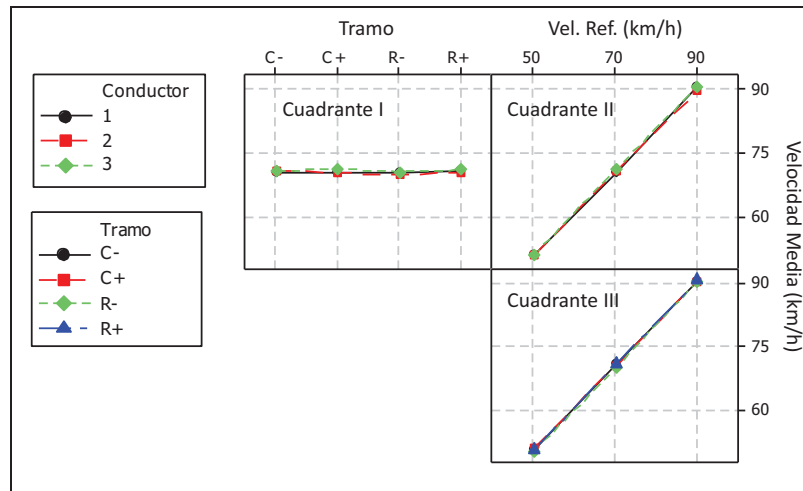
Por el contrario, y como es esperable, el factor “Vel. Ref.” (Velocidad de referencia) si afecta la gran media de la velocidad. Por tanto, se puede concluir en términos generales, que ni el factor “Conductor” ni el factor “Tramo”, modifican el valor de la gran media de la velocidad.

Figura 2: Diagrama de Efectos Principales sobre la gran media de velocidad.



Por su parte, el diagrama de interacción de la Figura 3 representa la interacción entre factores que explican el valor de la velocidad. Cada uno de los cuadrantes representa la interacción entre dos factores parametrizado por el tercero.

El cuadrante I representa la interacción entre la velocidad medida con el GPS y la geometría del tramo parametrizada según el conductor. En este caso, la pendiente de la recta que une los valores medios de velocidad interactuando con la geometría, referida a los conductores 1, 2, y 3, muestra que por un lado no existe una interacción entre el factor conductor y la geometría que explique variaciones en la velocidad.

Figura 3: Diagrama de interacción entre variables.

Asimismo al estar superpuestas, muestra además que la media de la velocidad no está afectada por el conductor lo cual permite, en términos exploratorios, identificar indicios de alta reproducibilidad. Similar comportamiento ocurre en los cuadrantes II y III. En el cuadrante II, en el cual se parametriza por conductor, al estar superpuestas y paralelas las pendientes muestran que no existe interacción. En el cuadrante III, la velocidad está parametrizada por tramo y se aprecia el mismo patrón de comportamiento.

En conclusión, en términos generales se visualiza una independencia del comportamiento de la velocidad medida respecto del tipo de tramo y del conductor, y un grado de repetibilidad y reproducibilidad, lo cual se analiza en más detalle en las siguientes secciones de trabajo.

5.2.- Repetibilidad de mediciones de velocidad

Este análisis se realizó utilizando la correlación cruzada de pares de señales de velocidad considerando la totalidad del contenido de información en los tramos de medición (Ec. 3). Es decir, se consideraron los 495 datos de velocidad por tramo.

El análisis se realizó para cada conductor por separado. La Tabla 7 muestra un resumen de los resultados obtenidos. La Tabla 7 incluye los valores máximos, lo cual representa los pares de mayor repetibilidad.

Los valores máximos de repetibilidad de la Tabla 7 representan el grado de correlación cruzada entre señales para cada tramo, conductor y velocidad de referencia. Se precia en la Tabla que este valor oscila entre 0,5 y 0,9, lo cual muestra una buena repetibilidad.

Tabla 7: Valores máximos de repetibilidad según tipo de conductor, velocidad y tramo de medición.

Velocidad (Km/h)	Tramo	IRE máximo		
		Conductor 1	Conductor 2	Conductor 3
50	C+	0,5	0,7	0,8
	C-	0,8	0,7	0,4
	R+	0,8	0,9	0,7
	R-	0,5	0,8	0,9
70	C+	0,8	0,6	0,6
	C-	0,5	0,8	0,7
	R+	0,5	0,6	0,7
	R-	0,7	0,8	0,8
90	C+	0,8	0,8	0,9
	C-	0,8	0,9	0,5
	R+	0,8	0,9	0,6
	R-	0,7	0,9	0,6

5.3.- Reproducibilidad de mediciones de velocidad

Este análisis se realizó comparando pares de registros de velocidad. El objetivo fue evaluar la reproducibilidad entre conductores para cada una de las pasadas, mediante el estudio de la correlación cruzada de series de datos. La Tabla 8 muestra el resumen de los índices de reproducibilidad espacial obtenidos.

Tabla 8: Valores máximos de reproducibilidad entre conductores para cada pasada a distintas velocidades según tramo de medición.

Velocidad (Km/h)	Tramo	Rango de IRE entre conductores		
		Conductor 1 & 2	Conductor 2 & 3	Conductor 1 & 3
50	C+	0,6	0,5	0,8
	C-	0,6	0,7	0,4
	R+	0,5	0,7	0,6
	R-	0,6	0,6	0,8
70	C+	0,8	0,7	0,8
	C-	0,5	0,6	0,9
	R+	0,7	0,7	0,8
	R-	0,7	0,6	0,8
90	C+	0,7	0,5	0,9
	C-	0,7	0,9	0,5
	R+	0,5	0,5	0,7
	R-	0,5	0,5	0,9

A partir de los datos de la Tabla 8, y considerando un valor aceptable de reproducibilidad de 0,5 (Solís, 2011), se puede visualizar que a velocidades altas la reproducibilidad tiende dispersarse al aplicar este método.

Esto se debe a que a mayor velocidad la distancia entre dos puntos tomados cada 0,1 s aumenta, por lo cual la variabilidad inducida por cambios locales de aceleración aumenta

también. El resultado es un aumento en la varianza de la señal de velocidad e independiente de las características geométricas del tramo en estudio.

No obstante lo anterior, salvo un caso puntual de la comparación entre el conductor 1 y 3 en uno de los tramos, el resto de índices son superiores a 0,5 por lo cual las señales de velocidades son altamente reproducibles.

5.4.- Estudio Conjunto

A partir de la aplicación del análisis GRR, se construyó la Tabla 9, la cual sintetiza el aporte de variabilidad de cada uno de los componentes involucrados en el sistema de medición y la variabilidad inherente al sistema de medición de acuerdo a las ecuaciones 4 y 5. La Tabla muestra el aporte a la varianza tanto en porcentaje como en valor absoluto, según tramo y velocidad de referencia.

Tabla 9: Resultados de Análisis de precisión conjunta para todos los conductores, 5 pasadas, velocidades de 50, 70 y 90 km/h y todos los tramos

Tramo	Componente de la Variación	50 km/h		70 km/h		90 km/h	
		Varianza	% de varianza	Varianza	% de varianza	Varianza	% de varianza
C+	Repetibilidad	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
	Reproducibilidad	0,8	96,0	0,3	73,3	0,3	35,6
	VSM	0,8	96,1	0,3	73,4	0,3	35,6
	VPP	0,0	3,9	0,1	26,6	0,6	64,4
	Variación Total	0,8	100,0	0,4	100,0	0,9	100,0
C-	Repetibilidad	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,2
	Reproducibilidad	0,3	89,3	0,3	70,8	0,1	54,5
	VSM	0,3	89,4	0,3	70,9	0,1	54,6
	VPP	0,04	10,6	0,1	29,1	0,1	45,4
	Variación Total	0,4	100,0	0,5	100,0	0,1	100,0
R+	Repetibilidad	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,05
	Reproducibilidad	0,0	8,0	0,4	95,1	0,3	55,8
	VSM	0,0	8,1	0,4	95,1	0,3	55,8
	VPP	0,3	92,0	0,0	4,9	0,2	44,2
	Variación Total	0,3	100,0	0,4	100,0	0,5	100,0
R-	Repetibilidad	0,0	0,2	0,0	0,1	0,0	0,06
	Reproducibilidad	0,0	25,0	0,2	77,4	0,3	77,6
	VSM	0,0	25,2	0,2	77,6	0,3	77,7
	VPP	0,1	74,8	0,1	22,4	0,1	22,3
	Variación Total	0,1	100,0	0,3	100,0	0,4	100,0

VSM: Variabilidad del sistema de medición; VPP: variabilidad parte a parte.

A partir de los resultados aportados por la Tabla 9, se pueden obtener las siguientes conclusiones:

En todas las combinaciones de casos estudiadas, se puede visualizar que la repetibilidad del equipo es alta y que no aporta significativamente a la varianza. Esto es consistente con los resultados generales descritos en el análisis exploratorio.

Por lo anterior, una parte significativa del aporte a la varianza está asociada a la reproducibilidad, lo cual está relacionada por un lado con el conductor y por otro con la velocidad de referencia.

En esta parte se observan que en curvas (C+ y C-) en la medida que aumenta la velocidad de referencia, disminuye el aporte a la variabilidad de la reproducibilidad y aumenta el aporte de la variación parte a parte. Esta última variabilidad incluye los efectos de la trayectoria y cualidades del pavimento. En tramos rectos en cambio (R+, R-), el patrón de comportamiento no es tan claro y se observa una mayor dispersión en los porcentajes de aporte a la variabilidad.

En términos de números absolutos, se aprecia que la variabilidad total, oscila entre 0,1 y 0,9, lo cual se traduce aproximadamente a una variabilidad entre 0,3 y 0,9 km/h lo cual es consistente con los resultados obtenidos en el análisis exploratorio, en términos de la baja variabilidad de la medición.

6. CONCLUSIONES

La tecnología GPS es una alternativa útil para medir variables de transporte de manera sencilla, rápida y a bajo costo. En particular, proporciona una poderosa herramienta para obtener registros continuos de datos para la construcción de perfiles de velocidad, aceleración y trayectoria.

Sin embargo, no está exenta de limitaciones. Estas limitaciones son las que llevan a plantearse preguntas relacionadas con la estimación eficiente de tamaños muestrales y a la vez con el cálculo del error que implica medir con: seguimiento vehicular, varios conductores, o un conductor con medidas repetidas. Este trabajo abordó los últimos dos temas bajo el enfoque de calidad de sistemas de medición.

Existen diversas formas de medir la precisión de un sistema de medición. En este trabajo, y en base a estudios realizados previamente por uno de los autores, se eligieron como métodos de análisis los de correlación cruzada y de variabilidad conjunta (GRR). En este último una parte del análisis se realiza mediante análisis de varianza, ANOVA.

El experimento de terreno permitió contrastar las principales variables que podrían explicar la variabilidad: los conductores, la velocidad de referencia y las características del tramo. Por motivos de seguridad no se consideraron pendientes longitudinales superiores al 4 %, dado que la interacción entre pendientes y curvas horizontales representan una combinación peligrosa para ejecutar las mediciones. No obstante, los tramos seleccionados son representativos de terrenos llanos y parcialmente ondulados, propios del valle central y algunas zonas de la cordillera de la costa.

Los resultados mostraron que en general el equipo posee una alta repetibilidad, lo cual es consistente con la precisión del mismo. Asimismo, los métodos aplicados llevan a concluir que el efecto de variabilidad de los conductores no afecta a la variabilidad del sistema de medición puesto que muestran variaciones inferiores a 4 km/h en términos absolutos y desviaciones estándares que varían entre 0,1 y 0,9 km/h, lo cual para modelar perfiles de velocidad resulta adecuado. Por otro lado, la variabilidad parte a parte es el componente del sistema de medición que más aporta a la varianza pero no exhibe un patrón de comportamiento claro respecto de la velocidad de referencia o tipo de tramo de medición, por ejemplo.

El método de correlación cruzada si bien aporta información para explicar la variabilidad, requiere de un esfuerzo en el tratamiento de datos dado que se deben construir pares de señales para lograr obtener la repetibilidad / reproducibilidad espacial. Debido a esto, no es recomendable para realizar un análisis de calidad de grandes volúmenes de datos. En tal caso el método GRR toma ventaja respecto del método de repetibilidad espacial.

Para extender los resultados del experimento realizado, se debe expandir su alcance, incorporando una muestra de tramos mayor, particularmente incluyendo otras condiciones geométricas que pueden causar variabilidad como son las pendientes pronunciadas, las combinaciones de curvas y pendientes, y las zonas de pendientes longitudinales variables, a fin de considerar de una manera más representativa las condiciones reales de operación del sistema GPS. Asimismo, se recomienda incorporar como variable adicional la trayectoria de los vehículos y el estado del pavimento a fin de explicar de manera más completa la variación parte a parte del sistema de medición en caminos con carpetas de rodadura deficiente.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo, desean expresar su agradecimiento al Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDECYT) por el financiamiento otorgado al proyecto FONDECYT 11090029, dentro del cual se enmarca este trabajo.

REFERENCIAS

- Cebon, D. (2000). Handbook of Vehicle- Road Interaction. 1ª Edición. Swets & Zeitlinger. Lisse.
- Cortés, C. Gibson, J. Gschwender, A. y Munizaga, M. (2011). Commercial bus speed diagnosis based on GPS-monitored data. Transportation Research Part C, 19, 695 – 707
- Echaveguren, T. Vargas-Tejeda, S. Altamira, A. y Riveros, M.D. (2010). Perfiles de velocidad. Una herramienta esencial para el análisis de consistencia. En Actas (DVD) del II Congreso Ibero-Americano de Seguridad Vial, Buenos Aires, Argentina.
- Escalante, E. (2004). Seis-sigma. Teoría y métodos. 1a Edición. Limusa. Ciudad de México.
- Hair, J.F. Black, B. Babin, R.E. Anderson y Tatham R.L. (2006) Multivariate Data Analysis. 6a Edición. Prentice-Hall. New Jersey.

- ISO (1997) Accuracy (trueness and precision) of Measurement Results-Part 2: Basic Method for Repeatability and Reproducibility of a Standard Measurement Method. International Organization for Standardization. Switzerland.
- Jansson, H. Kozika, E. Sahlholm, P. and Johansson, K.H. (2006). Improved road grade estimation using sensor fusion. Proceedings of the 12th Regleermote. Estocolmo. Suecia.
- Lamm, R. Psarianos, B. y Mailaender, T. (1999). Highway Design and traffic safety engineering handbook. 1^a edición. McGraw-Hill, New York.
- Li, Y. (2009). Travel time estimation and incident detection using probe vehicles. Use of GPS equipped probe vehicles for traffic data collection. 1a Ed. VDM Verlag, Germany.
- Memon, R. Khaskheli, G.B. y Sami Quresh, A. (2008). Operating speed models for two-lane rural roads in Pakistan. Canadian Journal of Civil Engineering, 35, 443-453.
- Montgomery, D. (1990). Introduction to statistical quality control. 2nd Ed. Wiley. New York.
- Pérez, A.M. García, A. Camacho, F. y D'Attoma, P. (2010). Use of GPS data to model operating speed and deceleration on two-lane rural roads. Transportation Research Record 2171, 11 – 20.
- Polus, A. y Mattar-Habib, C. (2004). New consistency model for rural highways and its relationship to safety. Journal of Transportation Engineering, 130(3), 286 – 293.
- Schuessler, N. y Axhausen, K.W. (2009). Processing raw data from Global Positioning Systems without additional information. Transportation Research Record 2105, 28-36.
- Solis, V. (2010). Evaluación de repetibilidad de mediciones de resistencia al deslizamiento efectuadas con equipos de alto rendimiento. Memoria de Título. Ingeniería Civil. Universidad de Concepción, Chile.
- Witte, T.H. y Wilson, A.M. (2004). Accuracy of non-differential GPS for the determination of speed over ground. Journal of Biomechanics. 37, 1891 – 1898.
- Xu, G. (2010). GPS, Theory, algorithms and applications. 2nd Ed. Springer, Berlin
- Zhao, W. Goodchild, A. and McKormack, E. (2011). Evaluating the accuracy of GPS spot speed data for estimating truck travel speed. Artículo 11-1933. TRB 90th Annual Meeting, 23 -27 Enero 2011, Washington D.C.