
ESTUDIO DE REPRODUCIBILIDAD DE MEDICIONES MANUALES DE FLUJO VEHICULAR: HACIA LA DETERMINACIÓN DE LA EXACTITUD Y PRECISIÓN DE LOS ESTUDIOS DE BASE DE TRÁNSITO

Cristian Domarchi, Ivana Sicre y Óscar Hinojosa
Soluciones de Movilidad, DICTUC S. A. – Ingeniería
Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago, Chile
Fono: + 56 2 354 4877

E-mail: cdomarch@dictuc.cl, isicre@dictuc.cl, ohinojos@dictuc.cl

RESUMEN

Los estudios de base constituyen la fuente básica de información para el desarrollo de proyectos de transporte, por lo que resulta fundamental garantizar la calidad de sus resultados. El presente trabajo introduce los conceptos de exactitud, veracidad y precisión de las mediciones de flujo vehicular, extraídos de la Metrología, adaptándolos y aplicándolos al proceso de medición manual. Para tales efectos, se considera al medidor y sus implementos como un sistema de medición. La cuantificación de la reproducibilidad del proceso, componente fundamental de la precisión, se logra a través del diseño y la implementación de un estudio de campo, orientado a la medición de la dispersión de resultados obtenidos en una medición manual de flujo. Los resultados permiten observar que el error de reproducibilidad, inherente a toda medición, aumenta con el nivel de flujo vehicular y con la extensión de los turnos de trabajo. Esta conclusión puede orientar la investigación futura hacia la determinación del efecto de las demás variables influyentes en el proceso de la medición, en la calidad de los resultados obtenidos.

Palabras clave: Estudios de base de transporte, Flujo vehicular, Precisión de mediciones manuales

ABSTRACT

Field studies constitute the primary source of information for transport engineering projects and hence, their quality must be guaranteed. The following paper introduces the concepts of accuracy, veracity and precision of measurements, extracted from Metrology, adapting and applying them to the process of traffic flow manual measurement. For this purpose, this paper considers the operator and his/her implements as a measurement system. Quantification of the process reproducibility -a fundamental component of precision- is obtained through the design and the implementation of a field study, oriented to the calculation of dispersion in a manual flow measurement. Results show that the reproducibility error, which is inherent to every measurement, grows with the level of vehicle flow and with the extension of working shifts. This conclusion might provide a starting point for further research, in order to determine the effect of other variables related to the measurement process and the quality of the final results.

Keywords: Transportation field studies, Vehicle flow, Accuracy in manual measurements

1. INTRODUCCIÓN

Los estudios de base constituyen la primera fuente de información para el desarrollo de proyectos en el ámbito del transporte. La recopilación de datos de terreno resulta fundamental para la adecuada caracterización de la oferta y la demanda de transporte, y la posterior toma de decisiones. Debido a que los errores obtenidos en la etapa de recopilación pueden extenderse hacia las siguientes fases del trabajo, y afectar de manera importante los resultados obtenidos en diferentes estimaciones (Kühlewin & Friedrich, 2000; Gan et al., 2005; Ehlert et al., 2005), la calidad del proceso de levantamiento de datos resulta fundamental para la obtención de resultados confiables.

Entre los estudios de base de transporte, las mediciones manuales de flujo vehicular constituyen una importante fuente de información, debido a su amplia gama de aplicaciones, y a la relativa sencillez de su metodología. Sin embargo, más allá de algunas recomendaciones de SECTU (1988), un bajo nivel de investigación en el ámbito nacional se ha orientado al estudio de la calidad de la información recopilada de acuerdo a esta modalidad, y a los factores que influyen en ella.

En este trabajo, se propone considerar al medidor de flujo vehicular y sus implementos de trabajo (formularios, lápices y cronómetro, entre otros), como un sistema de medición, y estudiar la influencia del volumen vehicular medido y la duración de los turnos de medición, en la precisión de los resultados obtenidos. De esta forma, se pretende lograr una primera aproximación al estudio académico de la precisión de los resultados obtenidos en los estudios de base de transporte, y presentar una metodología que permita identificar las fuentes de error en las mediciones manuales de flujo y, con ello, mejorar la calidad de la información recopilada en terreno.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1. Sistemas de Medición

Un sistema de medición se define, desde el punto de vista de la Metrología, como una composición de elementos que interactúan entre sí, a partir de una relación causa-efecto entre las variables de entrada (x , o lo que se desea medir) y las de salida (y , o el valor obtenido luego de la medición). Asociado al sistema, existe un error de medición ϵ , definido como la diferencia entre el valor de una magnitud obtenida por medición y el valor verdadero del mensurando (ISO, 2004), y que puede reducirse, pero nunca eliminarse (Velasco, 2007). La relación puede observarse en la siguiente figura:

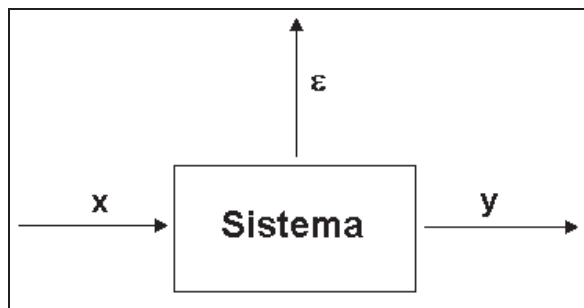


Figura 1. Representación gráfica de un sistema de medición

Fuente: Adaptado de Velasco (2007)

El esquema anterior permite visualizar que el estudio de errores en un sistema de medición se reduce a la comparación del funcionamiento real del sistema *versus* su desempeño en condiciones óptimas, en las que los errores puedan ser reducidos. Por ello, se hace necesaria la identificación y medición de las variables que podrían influir en los errores de medición asociados al sistema, y el estudio de la forma en que estas variables influyen en la incertidumbre detectada en las mediciones.

2.2. Teoría de Errores

Un error puede definirse como la diferencia entre el valor de una magnitud obtenida por medición y el valor verdadero del mensurando (ISO, 2004). Los errores en sistemas de medición se clasifican en sistemáticos y aleatorios (Romero et al., 2005). Los primeros son aquellos que se producen de la misma forma en cada una de las mediciones que se realizan de una magnitud, teniendo como origen un defecto en el sistema de medición o en alguna particularidad del operador o el proceso de medición. Los errores sistemáticos producen resultados que difieren del valor verdadero en una cantidad fija y determinada, de manera permanente. Su efecto global es un sesgo, o desviación de la cantidad observada respecto de la magnitud real, que se traduce en una disminución en la veracidad (proximidad al valor verdadero del mensurando) de la medición (Romero et al., 2005).

Por otra parte, los errores aleatorios se relacionan con las dispersiones asociadas a mediciones repetidas de una misma magnitud, debidas a pequeños errores en el proceso de medición, que escapan al control del observador y, por tanto, afectan la precisión de un resultado. Su resultado es una dispersión de los resultados de las diferentes mediciones y, por ende, una disminución en la confiabilidad del valor medio finalmente reportado.

En general, los errores aleatorios pueden estudiarse según en dos componentes: la repetibilidad, o variación observada cuando el mismo medidor (u operario) mide el mismo elemento de forma repetida usando el mismo instrumento de medición, y la reproducibilidad, o variación observada cuando distintos operarios miden el mismo elemento usando el mismo instrumento. A través de la repetibilidad puede tenerse una medida de la variación en la precisión debida al instrumento (forma) de medición. Por otra parte, la reproducibilidad entrega un indicador de las variaciones en la precisión que pueden deberse a la variación de las condiciones de medición, incluyendo el

procedimiento, el operario, el lugar, las condiciones ambientales, entre otros. (ISO, 2004). El esquema que permite relacionar todas estas magnitudes, se muestra en la Figura 2. Aquí se presentan también las traducciones al inglés de los conceptos involucrados, tal como se encuentran en Howarth y Redgrave (2003) y en la norma ISO 5725, citada por Velasco (2007).

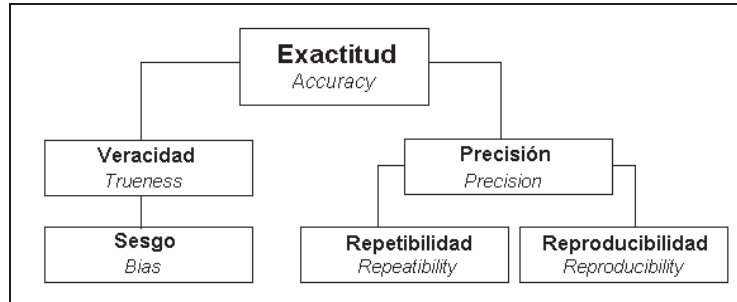


Figura 2. Determinación de la exactitud de un sistema de medición

Fuente: Norma ISO 5725, citada por Velasco (2007)

De esta forma, los estudios de repetibilidad y reproducibilidad entregan importantes indicadores respecto de la precisión de un sistema de medición, aunque no permiten asegurar que una medida se ha realizado con la exactitud adecuada. En otras palabras, un sistema de medición puede ser muy “preciso”, pero poco “veraz”, lo que implica que su exactitud será baja.

2.3. El Sistema de Medición Manual de Flujo Vehicular

El sistema de medición manual de flujos vehiculares tiene un funcionamiento sencillo, cuya precisión, sin embargo, puede verse afectada por un conjunto heterogéneo de variables. En la práctica, la medición manual consiste en registrar, en un formulario adecuado y a través de un conjunto de símbolos comprensibles, el número de vehículos que pasa por una determinada sección de vía en una unidad temporal, o que efectúa un determinado movimiento al llegar a una intersección.

El sistema de medición, por tanto, está conformado por el medidor y el material utilizado para las mediciones. Aplicando el modelo presentado en la Figura 1, la variable observada o mensurando (x) corresponde al número real de vehículos que pasa por la sección transversal, o realiza el movimiento, en el intervalo de medición. Las diferencias (ϵ) entre esta magnitud y la reportada finalmente en los formularios de medición (y) se deben a factores de diverso origen, difíciles de manejar en conjunto. Los factores influyentes en la calidad de la medición de flujos vehiculares pueden clasificarse en endógenos (asociados a la variable de medición y asociados al sistema de medición), y exógenos, según se explica a continuación.

2.3.1. Factores endógenos asociados a la variable de medición

Son aquellos que dependen del nivel y las características del flujo vehicular. Debido al carácter variable (espacial y temporalmente) del flujo como variable de medición, es probable que el nivel de precisión del sistema de medición dependa de los volúmenes de flujo observados por cada

medidor (a mayor flujo, mayor probabilidad de subreportes y/o sobreestimaciones); hecho reconocido por la literatura especializada (ver, por ejemplo, SECTU, 1988 y TRB, 2000). Un problema adicional en este aspecto, podría darse al considerar mediciones vehiculares cuando la composición del flujo es heterogénea.

2.3.2. Factores endógenos asociados al sistema de medición

Son aquellos aspectos relativos al sistema de medición de flujo (medidor e implementos). En este grupo se encuentran los errores en el conteo causados por dificultades en la visión de las pistas o movimientos encargados a un medidor, o por problemas en el registro de datos. Adicionalmente, debe contemplarse un conjunto de variables relacionadas directamente con el operario, como sus condiciones físicas y psicológicas en el momento de efectuar el trabajo, su estado fisiológico (horas de sueño, alimentación), experiencia, capacidad de concentración y compromiso con las labores desarrolladas, y la calidad del aprendizaje desarrollado. Estos factores están lejos de un control completo por parte de quien desarrolla el estudio, aunque muchas de las recomendaciones usadas en los estudios de tránsito permiten reducir su incidencia en los resultados finales (Secretaría de Tránsito y Transporte, 2005; Cal y Mayor, 1994).

2.3.3. Factores exógenos

Corresponden a aspectos relacionados con las condiciones externas al sistema de medición, que igualmente pueden afectar su calidad, incluyendo: la visibilidad de la vía desde el lugar de medición, las condiciones climáticas, la seguridad del punto de control, y otros similares.

2.3.4. Discusión

Es claro que, al tratarse de un sistema de medición basado eminentemente en habilidades y competencias de medidores humanos, los factores presentados se complementan entre sí para conformar un elemento de perturbación que influye en el desempeño de los medidores, aumentando la aleatoriedad de mediciones manuales sucesivas y alterando, de esta forma, la confiabilidad los resultados finales. Puede notarse que no es posible aislar completamente un factor de otro para estudiar sus efectos por separado. En este documento sólo se ha analizado la influencia de dos factores endógenos en la precisión de los flujos reportados; sin embargo, los factores no analizados en este trabajo, deben tomarse en cuenta para contar con un panorama completo de los aspectos que pudieran funcionar como fuentes de errores aleatorios en este tipo de mediciones.

3. DISEÑO DEL EXPERIMENTO

La verificación de la veracidad de una medición resulta algo compleja, puesto que se requiere conocer de antemano el valor exacto de la magnitud a medir, o concordar en un valor adecuado como referencia (Martínez, 2005). Dada la naturaleza altamente variable del flujo vehicular, resulta complejo establecer su “valor exacto” en un intervalo prolongado de tiempo, y es

esperable que los diversos procedimientos existentes para realizar mediciones, entreguen resultados diferentes entre sí.

Adicionalmente, el flujo vehicular es una magnitud de oportunidad única de medición (Martínez, 2005), lo que hace altamente improbable que un mismo medidor pueda realizar el proceso de medición sobre una misma cantidad en dos ocasiones distintas. Ante la imposibilidad de estudiar la repetibilidad, se optó por estimar la precisión del proceso a partir del estudio de su reproducibilidad, utilizando diferentes medidores en un mismo punto de medición y horario, de acuerdo a lo indicado por Romero et al. (2005). Al comparar sus diferentes resultados, se obtuvieron estimadores adecuados de la precisión del sistema de medición y, con ello, fue posible comparar los distintos niveles de precisión de acuerdo a cambios en las variables de control. Los aspectos metodológicos de diseño del experimento se presentan a continuación.

3.1. Sitio de Medición

Como primera aproximación al problema, fue necesario escoger un tramo de vía para efectuar todas las mediciones. Se escogió el segmento localizado en el eje Vicuña Mackenna, entre las calles Benito Rebolledo y Monseñor Carlos Casanueva, en la comuna de Macul, Santiago, Chile. Ello, dado que la extensión del tramo permitió ubicar al total de medidores (ocho, de acuerdo a lo indicado en la siguiente sección), a distancias aproximadas de entre 30 y 50 metros entre sí, y que, al mismo tiempo, midieran el mismo flujo circulante.

3.2. Medidores

Para lograr homogeneidad de medición, y eliminar el efecto de las posibles diferencias entre los medidores, fue necesario garantizar que los observadores cuenten con condiciones similares en cuanto a dominio de la tarea encomendada, y condiciones físicas para el trabajo. Estas características permiten independizar el experimento de algunas de las variables endógenas del sistema de medición, mencionadas anteriormente. En cumplimiento de este objetivo, se realizó una selección previa de medidores de flujo, con experiencia similar en las tareas. Se realizó una prueba que involucró la medición de flujos vehiculares conocidos de antemano, a través de una cámara de video, a diez (10) medidores distintos. Los resultados de la prueba permitieron escoger a ocho (8) observadores con condiciones similares, para realizar el trabajo de terreno.

3.3. Variables de control

Establecida la homogeneidad de las variables exógenas que se decidió fijar, para evitar su influencia en las mediciones, fue necesario definir las variables de control. En su carácter de primera aproximación, el estudio se concentró en estudiar los cambios de precisión en la medición de acuerdo a dos variables: el flujo vehicular (factor endógeno relativo a la variable de medición) y la duración de los turnos (factor endógeno relativo al sistema de medición).

3.3.1. Flujo vehicular circulante

Por los requerimientos del trabajo, y la naturaleza de sus conclusiones, se realizó un seguimiento al flujo vehicular en el punto de medición en días laborales y de fin de semana, intentando encontrar períodos adecuados en los que, según se esperaba, existieran distintos niveles de flujo vehicular. Al menos, se consideró la repetición del instrumento en condiciones de flujo “alto” (día laboral en horario punta), “medio” (día laboral en horario fuera de punta, o día sábado en la mañana) y “bajo” (día sábado en la tarde o domingo). Por otra parte, y para no alterar las condiciones óptimas de visibilidad, el trabajo de terreno se realizó en condiciones de luz natural, y en época de verano, sin la presencia de alteraciones climáticas de importancia.

3.3.2. Duración de los turnos

La segunda variable, cuya influencia en la precisión fue estudiada, es la duración de los turnos de medición. Para estos efectos se utilizaron turnos únicos, sin reemplazo, de dos (2), seis (6) y ocho (8) horas de duración. La programación del trabajo fue optimizada, de modo que existieran mediciones de distintos niveles de flujo para cada turno, posibilitando el estudio de la influencia conjunta de ambas variables en la calidad de medición. La calendarización del proceso de medición se presenta en la Tabla 1:

Tabla 1. Programación de mediciones según nivel esperado de flujo y duración del turno

| Duración del turno (h) | Nivel de flujo | | |
|------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| | Alto | Medio | Bajo |
| 2 | Lunes 26-01-09 (7:00 – 9:00) | Sábado 31-01-09 (12:00 – 14:00) | Sábado 31-01-09 (8:00 – 10:00) |
| 6 | Martes 27-01-09 (7:00 – 13:00) | Jueves 29-01-09 (10:00 – 16:00) | Domingo 25-01-09 (9:00 – 15:00) |
| 8 | Miércoles 28-01-09 (7:00 – 15:00) | Sábado 24-01-09 (10:00 – 18:00) | Domingo 01-02-09 (9:00 – 17:00) |

Fuente: Norma ISO 5725, citada por Velasco (2007)

4. RESULTADOS

4.1. Aspectos Generales

Los resultados fueron analizados mediante la construcción de una base de datos a partir de los valores de flujo vehicular detectados por los medidores en cada unidad temporal (15 minutos). De esta forma, fue posible calcular, por cada cuarto de hora \mathbf{j} , y a partir del flujo registrado por cada medidor \mathbf{k} , un valor medio de flujo vehicular ($\bar{\mathbf{q}}_j$), mediante:

$$\bar{\mathbf{q}}_j = \frac{\sum_{\mathbf{k}}^{\mathbf{N}} \mathbf{q}_{\mathbf{k}}}{\mathbf{N}}, \quad (1)$$

donde \mathbf{N} es el total de medidores. Este valor corresponde al mejor estimador del flujo circulante en dicho intervalo de tiempo. Adicionalmente, se determinó, para cada cuarto de hora \mathbf{j} , una

desviación estándar s_j , a partir de la información registrada por la totalidad de los medidores, a través de la expresión:

$$s_j = \sqrt{\frac{\sum_k (q_{jk} - \bar{q}_j)^2}{N-1}}. \quad (2)$$

Finalmente, se calculó el coeficiente de variación para el cuarto j , CV_j , mediante:

$$CV_j = \frac{s_j}{\bar{q}_j} \quad (3)$$

Este valor permite entregar una medición de dispersión independiente del nivel de flujo, y por ende, es un indicador del nivel de precisión de la medición realizada, o del error de reproducibilidad que debe reportarse para la medición manual de flujos vehiculares. El análisis de los flujos consideró la base temporal de 15 minutos, normalmente requerida por los estudios de transporte, y se basó en el análisis de flujos totales. Ello, considerando que la dispersión detectada en el caso de las mediciones de vehículos pesados (buses y camiones), fue notoriamente inferior a aquella registrada en el caso de mediciones de vehículos livianos, debido a la importante diferencia detectada en las magnitudes de ambos.

4.2. Variabilidad de los Flujos Medidos Según Variables de Control

Los medidores debieron trabajar con un nivel medio de flujo vehicular igual a 371,3 veh/15 min (casi 25 veh/min como promedio), con un máximo de 702,0 veh/15 min, registrado entre las 7:45 y las 8:00 de un día hábil, y un mínimo de 134,2 veh/15 min, registrado entre las 9:00 y las 9:15 de un día domingo.

Si bien se encontró una leve correlación entre el flujo vehicular medio y la desviación estándar detectada en la medición ($r = 0,539$, $p < 0,001$), no fue posible establecer una correlación estadísticamente significativa entre flujo y coeficiente de variación (CV), considerando la totalidad de la información disponible. Esto indica que la información debe revisarse a partir de las variables de control definidas en el diseño experimental.

En la Tabla 2 se presentan los principales estadísticos descriptivos del CV, de acuerdo a los grupos definidos por las dos variables de control escogidas: duración del turno de trabajo y nivel de flujo vehicular medido. En este último caso, debe señalarse que los niveles de flujo considerados para diseñar el proceso de medición (reportados en la Tabla 2) no siempre se adecuaron de manera estricta a lo observado en terreno (esto es, no siempre un cuarto de hora con flujo “bajo” contó exclusivamente con niveles bajos de flujo). Sin embargo, esta clasificación subjetiva de diseño se mantuvo para el análisis, considerando que los medidores estuvieron conscientes de esta programación, y la revisión de la información obtenida permitió observar que su desempeño pudo haber estado, al menos parcialmente, condicionado por este elemento. El análisis del efecto del nivel real de flujo se realizó considerando su correlación, en magnitud, con el error medio, en el análisis de regresión lineal reportado más adelante.

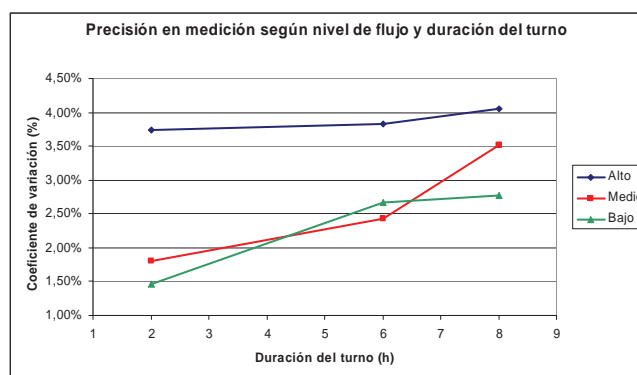
Tabla 2. Estadísticos descriptivos para el coeficiente de variación

| Variable de control | Valor | Tamaño muestral | Flujo medio (veh/15 min) | CV promedio | Desviación estándar de CV | Intervalo de confianza 95% para CV | | CV mínimo | CV máximo |
|--------------------------|---------|-----------------|--------------------------|--------------|---------------------------|------------------------------------|-----------------|--------------|---------------|
| | | | | | | Límite inferior | Límite superior | | |
| Duración del turno | 2 horas | 24 | 469,9 | 2,33% | 1,34% | 1,77% | 2,90% | 0,91% | 5,38% |
| | 6 horas | 72 | 372,1 | 2,98% | 1,93% | 2,52% | 3,43% | 0,48% | 12,16% |
| | 8 horas | 96 | 346,0 | 3,45% | 1,90% | 3,06% | 3,83% | 0,71% | 9,83% |
| Nivel de flujo vehicular | Bajo | 64 | 235,4 | 2,57% | 1,46% | 2,20% | 2,94% | 0,71% | 6,78% |
| | Medio | 64 | 376,8 | 2,89% | 1,57% | 2,50% | 3,29% | 0,63% | 7,78% |
| | Alto | 64 | 501,7 | 3,93% | 2,25% | 3,37% | 4,49% | 0,48% | 12,16% |
| Total | | 192 | 371,3 | 3,13% | 1,88% | 2,86% | 3,40% | 0,48% | 12,16% |

Se reporta un error medio de 3,13% por dispersión en la medición de flujos vehiculares, con un valor mínimo de 0,48% y un máximo de 12,16%, registrados ambos en períodos calificados como de flujo alto. El análisis de varianza (ANOVA) permite verificar que la relación creciente observada en el CV promedio, según la duración del turno de trabajo, es estadísticamente significativa ($F = 3,891$, $p < 0,022$). Las pruebas *post hoc* permiten verificar que existe una diferencia significativa entre el 2,33% de dispersión promedio obtenido en el turno de 2 horas, y el 3,45% promedio obtenido en el turno de 8 horas, mientras que el CV promedio obtenido en el turno de 6 horas no es estadísticamente distinto de ninguno de estos valores ($p < 0,227$).

A partir de la Tabla 2, es posible observar que el valor del error crece al aumentar el nivel de flujo vehicular, de acuerdo a los valores predefinidos en el diseño experimental. Nuevamente, el ANOVA permite verificar que esta relación es estadísticamente significativa ($F = 10,076$, $p < 0,001$). Las pruebas *post hoc* permiten verificar que los errores asociados a flujos “bajos” y “medios” no presentan diferencias estadísticas significativas entre sí; no obstante, cada uno difiere del CV promedio asociado a los casos definidos como de flujo vehicular “alto”.

El gráfico de líneas presentado en la Figura 3 permite observar el efecto de la interacción entre ambas variables de control en el CV promedio observado en la muestra.

**Figura 3. Precisión en medición (CV promedio) según nivel de flujo y duración del turno**

Fuente: Elaboración propia

Se observa que los máximos de CV promedio ocurren, en todos los casos, para el nivel de flujo alto, y que la magnitud de los errores aumenta según la duración de los turnos. Sin embargo, dado

que para los niveles de flujo reportados como “bajos”, los errores son mayores que para los flujos “medios” en el caso del turno de 6 horas de duración, no es posible establecer que la interacción entre ambas variables tenga un efecto significativo en el valor del CV. El análisis de varianza factorial confirma este hecho ($F = 1,052$, $p \leq 0,382$).

4.3. Análisis de Regresión

Establecido el hecho de que el error de medición varía de acuerdo a los grupos definidos por las variables de control del experimento, se realizó un análisis de regresión lineal, que permitiera cuantificar el efecto de los valores en las variables de control, en el CV, indicador de la dispersión en las mediciones manuales. Los resultados del modelo, luego de la exclusión de la constante ($t = 0,895$), se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados del modelo de regresión lineal

| Variable | Coefficiente | Error estándar | Test-t | Significación |
|--------------------------|--------------|----------------|--------|---------------|
| Flujo medio (veh/15 min) | 3,235E-05 | 6,868E-06 | 4,710 | 0,000 |
| Duración del turno | 2,936E-03 | 3,993E-04 | 7,354 | 0,000 |

Tamaño muestral = 192; $R^2 = 0,754$; R^2 ajustado = 0,751; Test-F = 290,916 ($p \leq 0,001$).

Puede observarse que el modelo explica más del 75% de la varianza de los datos (R^2 ajustado = 0,751). Así mismo, ambas variables son estadísticamente significativas, lo que permite concluir que, a partir del conjunto de datos recopilados en terreno, un aumento en una hora en el turno de medición, podría inducir a que el error medio de medición aumentara en cerca de un 0,3%. Por otra parte, el aumento en el flujo vehicular de 400 veh/h (con un promedio de 100 veh cada 15 minutos), podría tener un efecto similar. Sin embargo, dado que la interacción entre ambas variables no fue estadísticamente significativa en ninguno de los casos, no es posible afirmar que el efecto de ambos cambios, de manera simultánea, sea aditivo. Se requiere de investigación adicional para llegar a conclusiones estadísticamente relevantes respecto de este aspecto.

Por otra parte, al evaluar la función de regresión obtenida en la media de las variables, se observa que el flujo medio tiene un peso del 38,6% en el CV promedio, mientras que la duración del turno cuenta con una ponderación equivalente al 61,4% de su valor promedio.

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El procedimiento de trabajo desarrollado ha permitido estudiar la reproducibilidad como indicador de la precisión en las mediciones de flujo vehicular. La disposición de un conjunto de sistemas de medición efectuando los registros de información de manera simultánea, ha permitido estudiar las variables que podrían incidir en la dispersión de los resultados reportados, generándose, de esta forma, un indicador del error aleatorio, inherente a cualquier medición manual de flujo vehicular. Tal como se ha indicado, este error no es necesariamente atribuible a la calidad del sistema de medición (medidor), ni a los niveles de ajuste existentes entre las cantidades reales y las reportadas.

El estudio no corresponde, por tanto, a una evaluación de la calidad del trabajo de cada uno de los medidores, ni del ajuste de sus registros a la realidad. En rigor, se trata de un error originado en la dispersión que caracteriza a cualquier sistema de medición y que, por ende, no puede ser reducido; sin embargo, este error debe tomarse en cuenta en los análisis de la información generada a partir de esta vía, especialmente cuando formen parte del conjunto de estudios que sirvan como base de proyectos de mayor envergadura en el ámbito de la Ingeniería de Transporte.

Las conclusiones obtenidas a través del simple análisis estadístico de los resultados obtenidos a partir de la modelación, han permitido establecer una influencia positiva del nivel de flujo vehicular en los niveles de dispersión de los resultados obtenidos. Adicionalmente, fue posible cuantificar esta influencia, estableciendo que un aumento en la duración del turno tiene una influencia mayor que un aumento en el flujo vehicular medido, en el CV obtenido como producto de las mediciones simultáneas. Al respecto, debe indicarse que la regresión lineal realizada utilizando al CV como variable dependiente, permitió independizar al resultado de la correlación detectada entre nivel de flujo y desviación estándar, resolviendo, de esta forma, el efecto de heteroscedasticidad detectado en una primera instancia, y posibilitando la aplicación de los mínimos cuadrados ordinarios para encontrar los estimadores respectivos.

Al examinar la interacción entre ambas variables de control (Figura 3), tal como se esperaba, el mayor nivel de error ocurre en los casos de flujo alto y turnos prolongados, obteniéndose un máximo de CV promedio del 4,05% en el caso de flujo alto y turno de 8 horas. Este hecho se relaciona con la influencia conjunta de los factores inherentes a la variable y al sistema de medición, que interactúan entre sí, originando que el factor humano del sistema sea el causante de niveles más altos de error.

Por otro lado, se observa que, en el caso de un turno de 6 horas de duración, ocurren errores mayores para flujos calificados como “bajos”, que para aquellos que fueron definidos como “medios”. Si bien, como ya se indicó, la división cualitativa de niveles de flujo respondió a un valor de diseño (subjetivo), que no siempre se ajustó a los órdenes de magnitud en la realidad, ésta fue una característica del experimento conocida de antemano por parte de los medidores.

Al realizar la supervisión de la actividad, y recoger las impresiones de los medidores, no fue posible detectar diferencias significativas en la forma de realizar el trabajo según se tratara de flujos predefinidos como “medios” o “bajos”, debido a que, en ambos casos, el medidor observó disminuciones significativas en la intensidad del tránsito vehicular, comparada con aquella que se detectó en los casos de flujo “alto”. Es probable que esta distinción haya tenido algún peso en el momento de registrar la información, posiblemente a través de un “relajamiento”, que permitiera una disminución en la concentración y, por ende, en el registro del conteo. Para validar y extender estas conclusiones preliminares, se requiere una investigación que incluya un seguimiento más estricto a las metodologías de medición de cada medidor, incorporando, si es pertinente, estudios psicológicos que permitan establecer los niveles de concentración asociados a las distintas instancias de medición.

Debido a que sólo se controlaron las variaciones en la duración de los turnos y la magnitud de los flujos vehiculares circulantes, el error medio obtenido (3,13%) puede considerarse únicamente como una cota inferior para el error originado por el sistema de mediciones manuales. En efecto, al tratarse de un trabajo exploratorio, se trabajó con una medición vehicular de un único

movimiento, con tres categorías vehiculares, y en condiciones ambientales favorables (luz del día, medidores sentados y protegidos del sol por la sombra de los árboles). Estos factores ideales normalmente se ven alterados en terreno, por lo que las circunstancias de medición del presente experimento corresponden a condiciones de laboratorio. A modo de comparación, debe indicarse que dispositivos de conteo automático basados en placas metálicas reportan errores de medición inferiores al 3,0% en condiciones normales de operación (STERELA, 2008).

El presente trabajo corresponde a una primera aproximación en la aplicación de conceptos metrológicos en el ámbito de los estudios de base de transporte. Se pretende que estudios futuros permitan estudiar la influencia de estas variables en la dispersión detectada. A partir de la determinación de una cantidad “verdadera” con la que comparar los registros de medición de diferentes operarios, debiera ser posible realizar estudios que permitieran cuantificar la veracidad de las mediciones, tomando en cuenta las diferentes variables que explican la ocurrencia de errores sistemáticos en los resultados obtenidos. Este tipo de estudios permitiría, de la misma manera, estudiar el componente de repetibilidad de la precisión, facilitando la medición repetida del mismo nivel de flujo, para un mismo operario, y completando el estudio de las componentes de los errores aleatorios en la medición.

El desarrollo de investigaciones para la determinación de la exactitud de las mediciones debería permitir no sólo cuantificar el error de las magnitudes reportadas, sino adicionalmente, generar manuales de medición que permitan reducir estos errores, ya sea a partir de un mejoramiento de las condiciones de medición, o considerando modificaciones en las metodologías tradicionalmente utilizadas. Lo anterior, tomando en cuenta que las mediciones manuales de flujo vehicular continúan siendo una alternativa altamente conveniente para recopilar información con alto nivel de confiabilidad y bajo costo.

REFERENCIAS

- Cal, y Mayor, R. (1994) **Ingeniería de Tránsito: Fundamentos y Aplicaciones**. Ediciones Altaomega, Ciudad de México.
- Ehlert, A., Bell, M. & Grosso, S. (2005) The optimization of traffic count locations in road networks. **Transportation Research B**, 40 (6), 460–479.
- Gan, L., Yang, H. & Wong, S. (2005) Traffic counting location and error bound in origin-destination matrix estimation problems. **Journal of Transportation Engineering**, 131 (7), 524–534.
- Howarth, P. & Redgrave, F. (2003) **Metrology – in short**. 2nd Ed. EURAMET Publications, Albertslund.
- ISO. (2004) ISO VIM (DGUIDE 9999): International vocabulary of basic and general terms in metrology. International Standardisation Organization [en línea]. Disponible: <http://www.ntmdt.com/download/vim.pdf> (Sitio visitado el 2 de abril de 2008)
- Kühlwein, J. & Friedrich, R. (2000) Uncertainties of modeling emissions from road transport. **Atmospheric Environment**, 34 (27), 4603–4610.

Martínez, D. (2005) Evaluando la repetibilidad y reproducibilidad de sistemas de medición para características de calidad replicables, definidas por atributos múltiples en escala nominal. **Tecnointelecto**, 4(1), 34–41.

Romero, L., Hernández, I. y Lazos, R. (2005) Precisiones sobre la exactitud y otros términos relacionados. **Actas del XX Congreso de Metrología, Normalización y Certificación**. 17-19 de octubre 2005, Mérida, México.

Secretaría de Tránsito y Transporte (2005) **Manual de Planeación y Diseño para la Administración del Tránsito y el Transporte. Tomo III. Tránsito**. 2ª Ed. Alcaldía Mayor de Bogotá, Colombia.

SECTU (1988) **Manual de evaluación social de proyectos de infraestructura vial urbana, MESPIVU**. Secretaría Ejecutiva de Transporte Urbano. Ministerio de Planificación y Cooperación, Chile.

STERELA (2008) Portable Traffic Analyser: Capitole [en línea]. Disponible: http://www.sterela.fr/docs/eng/CAPITOLE_ANG.pdf (Sitio visitado el 5 de abril de 2008)

TRB (2000) **Highway Capacity Manual**. Transportation Research Board. National Research Council, Washington D.C., Estados Unidos.

Velasco, M. (2007). Determinación de la exactitud de sistema de medición. [en línea]. Disponible: http://www.metrologiaydesarrollo.com.mx/notas_tec/exactitud_de_un_sistema.pdf (Sitio visitado el 2 de abril de 2008)