

APLICACIÓN DE MÉTODOS ESTADÍSTICOS PARA EVALUAR LA EFECTIVIDAD DE LAS ACTUACIONES DE MEJORA DE LA SEGURIDAD EN LA CIRCULACIÓN

Ignacio Pérez Pérez

Departamento de Transportes. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Ciudad Universitaria s/n, 28040 Madrid. Tfno. (91) 3.36.67.08

1. INTRODUCCIÓN

Las actuaciones en carreteras están dirigidas a eliminar las deficiencias que presentan éstas en relación con la congestión, el tráfico, la seguridad en la circulación, etc. Aunque las administraciones de carreteras realizan un gran esfuerzo en desarrollar actuaciones específicas que eliminen estos problemas, en el caso de la seguridad en la circulación, no suelen ser habituales los estudios que evalúen el impacto de tales actuaciones. La evaluación de los proyectos de mejora de la seguridad que han sido ejecutados hasta el momento es muy importante para poder determinar qué actuaciones han resultado ser las más eficaces a la hora de minimizar los riesgos inherentes a una red de carreteras.

Por otra parte, la decisión de continuar, eliminar o mejorar los diversos programas de mejora de la seguridad en la circulación depende de la habilidad de medir la efectividad de cada uno de ellos. Mientras que sí existen evaluaciones de programas de ámbito estatal o regional, en los proyectos puntuales o actuaciones específicas ejecutadas a nivel local esta clase de evaluaciones de la efectividad son poco frecuentes. Es más, la evaluación de un programa de ámbito estatal o regional, cuando se hace, suele estar basada en criterios subjetivos o en presunciones no verificadas.

Los grandes programas de actuaciones de mejora de la seguridad en la circulación implican un conjunto de actuaciones puntuales cuyo diseño y posterior ejecución tienen mayores o menores consecuencias sobre la accidentalidad. Ello justificaría la evaluación de la efectividad de todas y cada una de las actuaciones contempladas en el programa, a fin estimar su comportamiento respecto a la seguridad en la circulación, con el objeto de adoptar, si procede, las medidas correctoras más eficaces.

2. METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD

2.1. ANÁLISIS A NIVEL INDIVIDUAL

Para evaluar la efectividad de una actuación de mejora de la seguridad en la circulación ejecutada en un único emplazamiento se hará uso del diseño *antes y después convencional* registrando el *índice de peligrosidad* durante dos intervalos de tiempo de la misma duración, uno anterior y otro posterior a la ejecución de la actuación objeto de estudio. Si el *índice de peligrosidad* en el período posterior a la ejecución de la actuación disminuye, se dice que la actuación ha sido efectiva como *medida correctora* que mejora la seguridad. Por lo tanto, según este diseño la efectividad de una actuación ejecutada en un emplazamiento, se puede expresar en porcentaje de la manera siguiente (Pérez, 1996):

$$E(\%) = \frac{I_{Ai} - I_{Di}}{I_{Ai}} \cdot 100 \quad (1)$$

donde:

I_{Di} = Índice de peligrosidad en el emplazamiento i después de la actuación. Si éste es puntual se expresa en accidentes/ 10^6 veh. y, si es una sección, en accidentes/ 10^6 veh.- km.

I_{Ai} = Índice de peligrosidad en el emplazamiento i antes de la actuación. Si éste es puntual se expresa en accidentes/ 10^6 veh. y, si es una sección, en accidentes/ 10^6 veh.- km.

E = Efectividad de la actuación.

No obstante, es necesario todavía profundizar en el análisis para esclarecer si la efectividad, calculada en base al registro del *índice de peligrosidad* y expresada en términos porcentuales, es o no *significativa*. Hay que tener en cuenta que una variación pequeña en el *índice de peligrosidad* anterior y posterior a la ejecución de la actuación puede ser debida al azar. Existen diversas formas de contrastar la *significación* de un cambio en el *índice de peligrosidad*, siendo algunas de las más utilizadas, los contrastes correspondientes a dos procesos de *Poisson*, por ejemplo, el contraste *binomial* y el de la diferencia de medias.

- **Contraste de la distribución binomial**

En el caso que se requiera contrastar la *hipótesis nula* de la igualdad de los *índices de peligrosidad* frente a las *alternativas* de que la media del índice antes de una actuación sea menor que la media del índice después de la misma, la siguiente ecuación proporcionaría dicha probabilidad (Cox y Lewis, 1966):

$$\alpha = \sum_{N_1}^{N_2} \binom{N_A + N_D}{N_1} p^{N_1} (1-p)^{N_A + N_D - N_1} \quad (2)$$

el valor del parámetro (**p**) de esta distribución binomial se puede expresar como:

$$p = \frac{E_D}{E_A + E_D}$$

donde:

N_A = Número de accidentes registrados antes de la actuación.

N_D = Número de accidentes registrados después de la actuación.

E_A = Exposición al riesgo en millones de veh.-km. antes de la actuación.

E_D = Exposición al riesgo en millones de veh.-km. después de la actuación.

En el supuesto de que se quiera contrastar la *hipótesis nula* con la *alternativa* de que la media del *índice de peligrosidad* antes de la actuación es mayor que la media del índice de peligrosidad después de la actuación se tendría que utilizar $N_1=0$ y $N_2=N_D$ como límites de la sumatoria de la ecuación 2. En contraposición, cuando la hipótesis alternativa sea que, la media del índice antes de la actuación es menor que la media del índice después de la misma, los límites de la sumatoria son $N_1=N_D$ y $N_2=N_A+N_D$.

- **Contraste de la diferencia de medias.**

Para realizar la comparación de dos procesos de *Poisson* también se puede utilizar la *diferencia de las medias de los índices de peligrosidad* ($\eta_A - \eta_D$). En este caso se tiene que

al registrar N_A y N_D accidentes conjuntamente con las exposiciones E_A y E_D , la estimación insesgada de $(\eta_A - \eta_D)$ tendrá la siguiente expresión (Cox y Lewis, 1966):

$$\hat{\eta}_A - \hat{\eta}_D = \frac{N_A}{E_A} - \frac{N_D}{E_D} \quad (3)$$

siendo una estimación insesgada de la varianza una expresión igual a la siguiente (Cox y Lewis, 1966):

$$\text{Var}(\hat{\eta}_A - \hat{\eta}_D) = \frac{N_A}{E_A} + \frac{N_D}{E_D} \quad (4)$$

Por lo tanto, la prueba estadística a utilizar sería en este caso la siguiente:

$$z = \frac{(\hat{\eta}_A - \hat{\eta}_D) - (\eta_A - \eta_D)}{\sqrt{\{\text{var}(\hat{\eta}_A - \hat{\eta}_D)\}}} \quad (5)$$

Cuando N_A y N_D toman valores lo suficientemente grandes, este estadístico se puede considerar como una *distribución normal estándar* con media y varianza iguales a *cero* y *uno* respectivamente. En estas condiciones se puede contrastar la *hipótesis nula* de la igualdad de las *medias de los índices de peligrosidad*, frente la *hipótesis alternativa* de que la media del índice antes de la actuación sea menor que la media del índice en el período posterior a la ejecución de la misma, o sea:

$$H_o : \eta_A = \eta_D$$

$$H_a : \eta_A < \eta_D \quad (6)$$

Esto se logra haciendo $(\eta_A - \eta_D)$ igual a cero en la ecuación 5 y calculando z . A partir de este valor de z , se obtiene la probabilidad α correspondiente a una *distribución normal estándar*. Al igual que en el contraste de la distribución *binomial*, este valor de α se compara con el *nivel de significación* fijado para un *nivel de confianza* determinado y, en función de esto, se acepta o se rechaza la *hipótesis nula*.

2.2. Análisis en el conjunto de las actuaciones

Hasta ahora se han expuesto dos métodos de contraste de la efectividad de una actuación que se realiza para mejorar la seguridad de la circulación en un sólo emplazamiento; es decir, se consideran una a una y por separado las actuaciones de un mismo tipo. Pero también se puede llegar a una conclusión sobre la efectividad de un determinado tipo de actuación se necesitan sumar los resultados registrados en un elevado número de emplazamientos similares donde se haya ejecutado el mismo tipo de actuación.

En tal caso se requerirá el registro de cada uno de los *índices de peligrosidad* antes y después de la ejecución en la totalidad de las actuaciones de mejora de la seguridad en la circulación de un mismo tipo, con el fin de obtener la suma de los mismos. Por lo tanto, la fórmula a emplear sería, en este caso, la siguiente (Pérez, 1996):

$$E(\%) = \frac{\sum_{i=1}^n I_{Ai} - \sum_{i=1}^n I_{Di}}{\sum_{i=1}^n I_{Ai}} \cdot 100 \quad (7)$$

Como ya se sabe, hay que confirmar que el cambio registrado en la suma *del índice de peligrosidad* en los distintos emplazamientos antes y después del conjunto de actuaciones de mejora de la seguridad en la circulación es *significativa* desde el punto de vista estadístico y, por lo tanto, no es debida al azar. Para ello, se puede realizar un contraste de hipótesis mediante el estadístico *t de Student* para muestras pareadas. En este contraste se toma como *hipótesis nula* la no existencia de una *diferencia significativa* entre las medias de los *índices de peligrosidad* antes y después de las actuaciones en el conjunto de emplazamientos. También se debe asumir que las distribuciones de los *índices de peligrosidad* antes y después son aproximadamente *normales* con medias μ_A , μ_D y varianzas σ_A^2 , σ_D^2 respectivamente.

Para utilizar este contraste, las medias de las distribuciones de los *índices de peligrosidad* (μ_A y μ_D) se estiman a partir de las medias de las muestras (\bar{I}_A y \bar{I}_D). Análogamente, las varianzas de la distribución de los *índices de peligrosidad* en el conjunto de emplazamientos (σ_A^2 y σ_D^2) antes y después de las actuaciones se estiman a partir de las

varianzas de las muestras (S_A^2 y S_D^2). En tal caso, la expresión del estadístico de la *t de Student* es la siguiente (Snedecor y Cochran, 1989):

$$t = \frac{I_A - I_D}{s_B / \sqrt{n}} \quad (8)$$

donde:

S_B^2 = Varianza de la diferencia de las medias de los índices de peligrosidad estimada a partir de la muestra.

n = Número de emplazamientos de la misma categoría.

La varianza de la *diferencia de las medias de los índices de peligrosidad* se estima en función de las varianzas y covarianza de las dos muestras utilizando la siguiente expresión (Snedecor y Cochran, 1989):

$$S_B^2 = S_A^2 + S_D^2 - 2 \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (I_{Ai} - I_A)(I_{Di} - I_D) \right]$$

(9)

Una vez calculado el estadístico t mediante la ecuación 8, hay que localizar paralelamente el *valor crítico* t_c en las tablas de la *t de Student* para $n - 1$ *grados de libertad* y un *nivel de confianza* elegido. Cuando el valor de t sea mayor que el de t_c se rechazará la *hipótesis nula* y se dirá que la diferencia entre las dos medias es *significativa* y, por lo tanto, la actuación ha sido efectiva en la reducción del *índice de peligrosidad*.

3. DATOS DE LAS ACTUACIONES

Se estudiaron las actuaciones de acondicionamiento y refuerzo de firme de carreteras rurales con intensidades medias superiores a 1000 v/d, ejecutadas en la red de la Comunidad de Madrid, entre los años 1983 y 1995.

4. RESULTADOS

4.1. EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD A NIVEL INDIVIDUAL

En primer lugar, a partir del número de accidentes registrados antes y después de cada actuación y sus respectivas exposiciones al riesgo, se estimaron los índices de peligrosidad en ambos períodos. En segundo lugar, se evaluó la efectividad de todas y cada una de las actuaciones aplicando la fórmula 1. El análisis de los resultados obtenidos a nivel individual permite expresar, a continuación, unas primeras consideraciones sobre los mismos.

La mayoría de las actuaciones de *acondicionamiento* ejecutadas en la Comunidad de Madrid produjeron una *disminución* del *índice de peligrosidad*. Concretamente, de un total de 75 actuaciones, en 63 de ellas se produjo, en el período posterior a la ejecución de la actuación, una reducción de la peligrosidad y en las 12 restantes un incremento del índice citado (ver la tabla 1).

Con respecto a los *refuerzos de firmes*, de un total de 75 actuaciones, en 37 de ellas se produjo una disminución del índice, en 35 un aumento y en 3 no se registraron accidentes ni antes ni después de la actuación. Evidentemente en esta ocasión no hay una mayoría clara de actuaciones en un sentido u otro, por lo que, a primera vista, de estas cifras no se puede extraer ninguna conclusión sobre su eficacia (ver la tabla 2).

Como se sabe, después de haber evaluado la efectividad de cada actuación, hay que corroborar todavía, haciendo uso de los *contrastos de significación* de los *índices de peligrosidad* explicados anteriormente, que las diferencias observadas en la estimación de la efectividad son *estadísticamente significativas* y no un producto del azar.

En primer lugar se empleó el contraste de las *proporciones* o *binomial*, haciendo uso de la ecuación 2. Para llevar a cabo el contraste de las *diferencias de medias*, basado en la distribución *normal*, se utilizó en cambio el estadístico *z*, de la manera que ha sido explicado con anterioridad (ecuaciones 3 a 6).

- **Resultados de la aplicación de los contrastes de significación en las actuaciones de acondicionamiento.**

Resumiendo los resultados se confeccionó la tabla 1. En ella puede verse como, al aplicar el contraste *binomial* con un *nivel de confianza* del 90 %, de las 63 actuaciones de acondicionamiento que produjeron una reducción de la peligrosidad, en 46 de ellas se produjo

una disminución *significativa* mientras que en las 17 restantes no se pudo verificar dicha circunstancia. En contraposición, de los 12 tramos en que los que se observó un incremento de la peligrosidad después de las actuaciones, solamente en 3 de ellos se produjo un incremento que puede ser considerado como *significativo*. En la tabla 1 también se resumieron los resultados obtenidos mediante el contraste *normal*. Para un *nivel de confianza* de un 90 % se volvieron a repetir los resultados obtenidos mediante el contraste *binomial*, lo cual confirma que una mayoría de las actuaciones de *acondicionamiento* produjeron una *disminución significativa* del *índice de peligrosidad*.

<i>Hipótesis.</i>	<i>Actuaciones</i>	<i>Significativo al 90%.</i>		<i>No significativo al 90%.</i>	
		<i>BINOMIAL</i>	<i>NORMAL</i>	<i>BINOMIAL</i>	<i>NORMAL</i>
<i>Disminución del índice</i>	63	46	46	17	17
<i>Incremento del índice</i>	12	3	3	9	9

Tabla 1. Resumen de los contrastes de significación en acondicionamientos.

- **Resultados de la aplicación de los contrastes de significación en las actuaciones de refuerzo de firmes.**

Los resultados resumidos de los contrastes de significación de los refuerzos de firme están expuestos en la tabla 2. En los 37 tramos donde las actuaciones produjeron una disminución del índice, al utilizar el contraste *binomial* al *nivel de confianza* del 90 %, esta reducción resulta *significativa* en sólo 6 tramos; elevándose a 9 al aplicar el contraste *normal*. En contraposición, de los 35 tramos donde las actuaciones llevan asociado un aumento de la peligrosidad, solamente fue *significativo* este incremento en 7 de ellos utilizando el contraste *binomial* y en 9 casos cuando se aplicó el contraste *normal*. De lo dicho anteriormente se deduce que en las actuaciones de *refuerzo de firmes* no hay una mayoría clara donde se produzca un aumento o una disminución *significativa* de la peligrosidad en el período posterior

<i>Hipótesis.</i>	<i>Actuaciones</i>	<i>Significativo al 90%.</i>		<i>No significativo al 90%.</i>	
		<i>BINOMIAL</i>	<i>NORMAL</i>	<i>BINOMIAL</i>	<i>NORMAL</i>
<i>Disminución del índice</i>	37	6	9	31	28
<i>Incremento del índice</i>	35	7	9	28	26

Tabla 2. Resumen de los contrastes de significación en refuerzos.

4.2. EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD EN EL CONJUNTO DE ACTUACIONES.

A continuación se procederá a evaluar la efectividad promedio del conjunto de actuaciones de acondicionamiento y después se evaluarán las actuaciones de refuerzo.

- Resultado de la evaluación de la efectividad al conjunto de actuaciones de acondicionamiento**

La efectividad promedio del conjunto de las actuaciones de acondicionamiento es de un 55,36%. Esto quiere decir que, en conjunto, se aprecia que las actuaciones de *acondicionamiento* redujeron la peligrosidad - en aquellos tramos donde fueron ejecutadas - en un 55,36%. Sin embargo, como se sabe, queda todavía por verificar que ese valor de la efectividad es *significativo* desde el punto de vista estadístico y, que por lo tanto, la reducción de la peligrosidad es atribuible a la ejecución de dichas actuaciones.

Para ello, se estimaron las medias de los *índices de peligrosidad* en el conjunto de tramos de carreteras antes y después de las actuaciones, dando como resultado respectivamente 0,8908 y 0,3976. Por otra parte, los valores de las varianzas en ambos períodos son 0,8855 y 0,1514. Para poder realizar el test *t de Student* hay que estimar primero la covarianza y sustituir después el valor obtenido en la expresión 9 para estimar S_B^2 . La estimación de la covarianza dio un resultado de 0,1668. A continuación se estimó un valor de S_B^2 igual a 1,0414. Al sustituir estos valores en la fórmula del estadístico *t de Student* se obtuvo un valor de $t = 4,1854$. Por otro lado, consultando la tabla de la *t de Student* se obtiene que el *valor crítico* t_c , con 74 *grados de libertad* y un *nivel de confianza* de un 95%, es igual a 1,67. En consecuencia, dado que t es mayor que t_c se rechaza la

hipótesis nula y se puede concluir, por tanto, que las actuaciones de *acondicionamiento* son *efectivas* en la reducción del *índice de peligrosidad*.

• Resultado de la evaluación de la efectividad al conjunto de actuaciones de refuerzo

En este caso, la efectividad del conjunto de actuaciones de *refuerzo de firmes*, evaluada empleando la ecuación 7, es de un -20,98% o, lo que es lo mismo, dichas actuaciones incrementaron, en conjunto, la peligrosidad de los tramos de carretera donde fueron ejecutadas en un 20,98%.

Las medias de los *índices de peligrosidad* antes y después de las actuaciones de *refuerzo de firmes* son, respectivamente, 0,4930 y 0,5965. Las varianzas estimadas fueron 0,1230 y 0,4205. La covarianza es igual a 0,13497. Por lo tanto, aplicando el test estadístico *t de Student* para muestras pareadas se obtiene un resultado del contraste igual a -1,1871. Buscando el *valor crítico* t_c en la tabla de la *t de Student* se obtiene un valor de -1,67 para 71 *grados de libertad* y un *nivel de confianza* de un 95%; por lo tanto, no se puede rechazar la *hipótesis nula* de la igualdad de los *índices de peligrosidad* antes y después de las actuaciones de *refuerzo de firmes*. Es decir, no se puede afirmar que, tomadas en su conjunto, el incremento del *índice de peligrosidad* registrado después de las actuaciones de *refuerzo de firme* sea debido a la ejecución de las mismas.

5. CONCLUSIONES

Los métodos expuestos, basados en el análisis estadístico clásico, son fácilmente aplicables a la evaluación de la efectividad de las actuaciones de mejora de la seguridad en la circulación.

Se constata también que la gran mayoría de las *actuaciones de acondicionamiento* realizadas en la Comunidad de Madrid en el período 1985 a 1993 resultaron realmente *efectivas*, desde el punto de vista estadístico, como medidas que contribuyeron a la reducción de la peligrosidad de los tramos de carretera donde fueron ejecutadas.

La aplicación de estos métodos a la evaluación de la efectividad en la reducción de la peligrosidad en las *actuaciones de refuerzo de firme* realizadas en la Comunidad de Madrid

en el período 1985 a 1993 dio como resultado que, en la mayoría de los casos, la efectividad o no efectividad de dichas actuaciones, consideradas éstas individualmente, no era significativa. Por lo tanto, desde un punto de vista estadístico, se puede concluir que estas *actuaciones de refuerzo de firme* apenas tuvieron incidencia en la mejora o empeoramiento de la seguridad en la circulación. Aunque, consideradas en su conjunto, se observa una tendencia que, sin ser significativa, parece indicar que tales actuaciones suelen incrementar la peligrosidad.

6. BIBLIOGRAFÍA

1. COX, D. R., y LEWIS, P. A. W. (1966). *The Statistical Analysis of Series of Events*. London: Methnen.
2. PÉREZ PÉREZ, I. (1996). *Evaluación de le efectividad de las actuaciones en carreteras sobre la accidentalidad. Aplicación al caso de la Comunidad de Madrid*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
3. SNEDECOR, G. W., y COCHRAN, W. G. (1989). *Statistical Methods*. 8ª Edición, Iowa State University Press/Ames.