

C.D.U.: 519.2:624/628

Ingeniería civil
2-76

Algunas aplicaciones de la estadística a la ingeniería civil

*Por el Lic. Jorge Luis Romeu**

RESUMEN. La estadística matemática tiene numerosas aplicaciones a la resolución de problemas de ingeniería civil. Se esbozan algunos trabajos que ejemplifican la utilización de las encuestas por muestreo, la estimación por el modelo de regresión lineal, la incidencia de diferentes diseños geométricos de vía en los accidentes mediante análisis de correlación, y la comparación de métodos alternativos mediante análisis de varianza y covarianza. En cada caso se relaciona el método estadístico con su alternativa no estadística; se presentan las ventajas que ofrece el primero sobre la segunda.

Introducción

De una y otra forma todos hemos oído o empleado el término "estadística" en relación con nuestro medio circundante. Y muchas veces esto nos ha llevado a formarnos una idea errónea de esta ciencia, de su utilidad y de su alcance.

Se ha llamado estadística a la recopilación sistemática de gran cantidad de información y a su presentación atractiva mediante cuadros, gráficos, etc., que facilitan su inter-

* Departamento de Computación. Grupo Vial Nacional, D.A.P.

pretación. Y esto es sólo una fase preliminar y elemental del trabajo estadístico.

Otras veces hemos llegado a identificar la estadística con cierto tipo específico de trabajo, como el control de calidad. Este concepto, aunque nos da una idea más clara de la estadística, nos lleva a confundir la parte con el todo.

La estadística es, en realidad, una poderosa herramienta de trabajo en las manos de todo aquel que maneja datos experimentales, ya que permite sacar conclusiones de estos resultados. Este es el caso de los economistas, los psicólogos, los ingenieros, etc.

El ingeniero civil se plantea a diario una serie de interrogantes que deben ser contestadas de una manera u otra para proyectar y ejecutar una obra:

¿Cuál será el número de vehículos que transitarán por una vía de aquí a diez años?

¿Cuáles diseños geométricos de vías inciden mayormente en los accidentes de carretera?

¿Cuál es la norma real de un equipo en un terreno determinado y bajo condiciones específicas?

La estadística aporta un criterio probabilístico para responder a éstas y muchas otras interrogantes similares, que son alternativamente resueltas por criterios no matemáticos.

Y es la finalidad de este trabajo presentar al ingeniero algunos ejemplos ilustrativos de aplicaciones estadísticas a la resolución de problemas de ingeniería civil.

1. Encuestas por muestreo

Cuando una población objeto de nuestra investigación es tan numerosa o se encuentra tan dispersa, o su procesamiento demora tanto que el analizarla completamente resulta demasiado costoso en:

- tiempo,
- recursos materiales o humanos,

recurrimos a la técnica del muestreo.

Esta técnica estadística obvia todos estos inconvenientes al dar una estimación de los parámetros buscados con un intervalo de confianza, y una aproximación al valor real del parámetro estimado tan precisa como numerosa sea la muestra tomada.

Supongamos que se quiera conocer las características de operación de un equipo cualquiera, por ejemplo, un camión de volteo:

- porcentaje de horas productivas,
- porcentaje de horas de mantenimiento,
- velocidad media de la carga y la descarga,
- tiempo medio de carga y espera de carga,
- distancia media de tiro, u otros datos.

Existe la alternativa de dos métodos para averiguarlo. El primero consiste en la elaboración de un complicado modelo que requeriría, para ser llenado, una sobrecarga de trabajo para el personal disponible con la consiguiente pérdida en la calidad de la información o el aumento del personal dedicado a esta tarea, más el incremento del personal necesario para procesar los resultados obtenidos. Si añadimos a esto la imprecisión de los datos recogidos en la base, por ser difícil que los operadores recuerden exactamente el tiempo empleado en cada operación, llegamos a la conclusión de que los resultados serían demasiado pobres para los recursos invertidos en este trabajo.

El otro consiste en diseñar adecuadamente una encuesta por muestreo, con la cual obtendríamos resultados:

- a) más rápidos, al ser muy inferior el número de datos a procesar y estar mejor organizados;
- b) más precisos, al ser utilizados enumeradores dedicados específicamente a tomar esas medidas, quienes anotarían en el momento los valores exactos y no estimaciones, como sería el caso de los operadores cuya función principal es otra que recoger un dato;

- c) más económicos, pues aunque los enumeradores formarían una empleomanía suplementaria dedicada por entero a este trabajo, sería mucho más reducida que la empleomanía necesaria para llenar y procesar el sistema alternativo de planillas; además, los rápidos resultados que se obtendrían de estas encuestas serían utilizados para disminuir los costos y aumentar la eficiencia en la utilización de los equipos, y los beneficios económicos provenientes de estas mejoras cubrirían con creces los costos de las encuestas.

II. Predicciones o estimaciones

El modelo estadístico utilizado para la predicción es el de Regresión Lineal y consiste en explicar una variable dependiente Y en función de " p " variables independientes X_j , $1 \leq j \leq p$, y un error experimental e_i que sigue una distribución normal.

Su expresión matemática es:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \dots + \beta_p X_{ip} + e_i \quad 1 \leq i \leq n$$

donde

X_j = variables continuas llamadas "variables independientes";

β_j = parámetros que representan los efectos de los p factores que influyen sobre el comportamiento de la variable Y ;

Y_i = variable dependiente;

e_i = variable aleatoria que sigue una distribución normal tal que:

$$E(e_i) = 0 \quad E(e_i e_j) = \sigma^2 \delta_{ij} \quad \text{donde} \quad \delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i=j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$$

Es decir, tienen igual varianza y están incorrelacionadas.

Pongamos un ejemplo de aplicación de este modelo: supongamos que deseamos estimar el número de vehículos que transitarán por una región dada en un período de tiempo

futuro, a fin de planificar las necesidades de vías de comunicación en la región para ese tiempo.

Determinamos previamente las características socio-económicas que inciden en el tráfico por carretera, por ejemplo:

- densidad de población,
- desarrollo agropecuario,
- desarrollo industrial,
- escuelas en el campo y otras características.

Estas serían las variables independientes X del modelo, que explicarían el número de vehículos o la variable dependiente Y .

Evalúamos en ellas distintas regiones del país y calculamos la ecuación de Regresión, que estima el número de vehículos en función de las condiciones o variables socio-económicas determinadas.

Sustituimos en esta ecuación para los valores específicos de la región dada en el tiempo futuro, y obtenemos una estimación del número de vehículos que transitarán y un intervalo de confianza para dicha estimación, siempre que se cumplan las hipótesis estadísticas del modelo arriba mencionadas.

En el caso de que estas hipótesis estadísticas no se cumplan, se sigue obteniendo una estimación del número de vehículos que transitará en un tiempo, pero no tendremos entonces intervalo de confianza para nuestra estimación.

En recientes trabajos hemos obtenido algunos resultados con regresiones para explicar el movimiento de la tierra en función de las horas productivas de los equipos que intervienen en esta operación, y para explicar el número de horas trabajadas en taller y mantenimiento en función del Fondo Horario Bruto.

Estas herramientas permiten tanto planificar como chequear un determinado período de trabajo. Además, tienen la ventaja sobre el método tradicional de planificación o estimación por tasa de crecimiento que, mientras este último considera un solo factor global de análisis —la tasa—, el pri-

mero utiliza tantos elementos como influyan en el proceso o seamos capaces de analizar y cuantificar (los X_j , $1 \leq j \leq p$) y, por consiguiente, su estimación es mucho más precisa. Por último, cuando se cumplan todas las hipótesis estadísticas, obtendremos por Regresión un intervalo de confianza para las estimaciones que no puede ser obtenido por el otro camino.

III. Aplicaciones a problemas técnicos

Muchos problemas eminentemente técnicos pueden atacarse y resolverse utilizando variados modelos estadísticos debido a su carácter experimental. Veamos algunos ejemplos:

Para el estudio de diferentes diseños geométricos de vías en autopistas —rampas, curvas, pasos a nivel— se plantea el análisis estadístico de los accidentes del tráfico producidos en un segmento de ellas que contenga los diseños a estudiar, con el fin de establecer la correlación existente entre los accidentes y las distintas características de los diversos diseños, por ejemplo:

- condiciones de iluminación y visibilidad;
- superelevación;
- pavimento, etc.

Del estudio del grado de influencia de estas características en los accidentes ocurridos pueden sacarse conclusiones sobre mejoras o cambios técnicos, con el propósito de obtener mayor seguridad, velocidad, etc., en dichas autopistas.

Otro estudio, esta vez para conocer la peligrosidad en los cruces a nivel entre carreteras y líneas de ferrocarril, se plantea de la siguiente manera: se toma, a partir de una fecha, la serie histórica de accidentes en los pasos a nivel, analizando en cada cruce varias variables X_j , $1 \leq j \leq p$, por ejemplo:

- intensidad de tráfico;
- visibilidad;
- existencia de barreras, luces u otros sistemas de alarma;
- geometría de la vía y otras.

Estas características servirán para explicar el número de accidentes que se han producido en el período de tiempo estudiado, que sería la variable dependiente Y .

Aplicando los procedimientos de Regresión mencionados en II junto con otras herramientas estadísticas, como Regresión paso a paso y Análisis Discriminante, se llega a encontrar entre las variables que hemos considerado cuáles son las que más inciden en los accidentes ocurridos, y a construir con ellas una ecuación para predecir el número de accidentes en igual período de tiempo, y otra ecuación para discriminar la peligrosidad de los diferentes pasos a nivel, de acuerdo con las probabilidades respectivas de que se produzcan accidentes en ellos.

Los resultados de estos estudios arrojarían luz sobre las causas principales de accidentes y permitirían mejorar o cambiar los trazados de los cruces, a fin de reducir el número de accidentes, así como a priorizar, de acuerdo con su peligrosidad potencial, la construcción de otras obras de mayor envergadura, por ejemplo, pasos superiores.

También pueden compararse distintos métodos o sistemas de trabajo para realizar una misma labor, y saber cuál o cuáles son mejores o si, por el contrario, todos dan resultados equivalentes. Para esto se utiliza el modelo del Análisis de Varianza, cuya expresión más sencilla es:

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + e_{ij} \quad 1 \leq i \leq p; \quad 1 \leq j \leq n$$

Donde cada medición Y_{ij} puede expresarse como resultado de un efecto general μ más un efecto particular α_i debido al método o sistema de trabajo i -ésimo y un error que cumple las mismas hipótesis de II ya mencionadas.

Estos métodos han sido usados, por ejemplo, para determinar la situación de distintos tipos de vías con referencia al porcentaje de horas productivas, de taller y de mantenimiento, en cuyo caso cada observación Y correspondió a:

Y = Porcentaje de horas productivas, etc., del j -ésimo mes en el i -ésimo tipo de vía;

μ = efecto general;

α_i = efecto de más o de menos correspondiente al i -ésimo tipo de vía;

e_{ij} = error experimental.

Existe otro método estadístico para hacer comparaciones entre distintos métodos o sistemas que a la vez dependen de otros elementos, y conocer igualmente si sus resultados difieren o son equivalentes.

Como los distintos métodos no se encuentran en pie de igualdad, puesto que la magnitud de los factores de dependencia puede variar de un método a otro, se utiliza el modelo de Análisis de Covarianza, cuya expresión más sencilla es:

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta X_{ij} + e_{ij} \quad 1 \leq i \leq p; \quad 1 \leq j \leq n$$

donde cada medición Y_{ij} puede expresarse como resultado de un efecto general μ más uno particular α_i debido al método o sistema i -ésimo, más una variable independiente X_{ij} más un error experimental con las mismas características expresadas en II.

Estos métodos han sido utilizados, por ejemplo, para determinar al igual que en el caso anterior la situación de diferentes tipos de vías, esta vez con respecto al movimiento de tierras realizado, y teniendo en cuenta que el número de horas productivas varía en cada tipo de vía de acuerdo con el número de equipos que tiene asignado. En este caso:

Y_{ij} = movimiento de tierras del mes j -ésimo, i -ésimo tipo de vía;

μ = media general;

α_i = efecto producido en el movimiento de tierras, de más o de menos, por el i -ésimo tipo de vía;

X_{ij} = horas productivas en el i -ésimo tipo de vía durante el j -ésimo mes;

β = coeficiente;

e_{ij} = error experimental.

Existen muchos otros métodos estadísticos que no hemos mencionado aquí, así como muchas posibilidades de trabajo

con cada uno de ellos. Nuestro único propósito en esta breve y sencilla exposición de ejemplos es el de interesar al ingeniero en las posibilidades que puede ofrecerle la estadística como herramienta de trabajo, pues como bien dice un artículo del *Journal of the Construction Division*, de la ASCE (volumen 91, de 1965):

“Cualquier serie de observaciones o medidas muestra variabilidad en la propiedad que se está estudiando... La Estadística es la disciplina matemática que estudia los patrones de estas variaciones y trata de sacar un partido de ellas... Es imposible evadir los conceptos estadísticos cuando manejamos datos porque las variaciones están allí, reconocidas o no.”

Referencias

1. *Autostrade*, jun./1973.
2. *Journal of the Construction Division*, ASCE. Vol. 91/1965, may; Vol. 92/1966, sep.
3. *Journal of the Highway Division*, ASCE. Vol. 91/1965, Jan-Dec.
4. *Laboratorio de Transporte y Mecánica de Suelos*. No. 77-78/1970.
5. *Transportation Engineering Journal*, ASCE. Vols. 96/1970, may-aug; 97/1971, aug; 98/1972, nov.
6. *Vialidad*. No. 48/1969.