

ANÁLISIS DEL USO DEL MÉTODO RACIONAL PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MÁXIMOS DE DISEÑO, EL TÉRMINO K

ANALYSIS OF THE USE OF THE RATIONAL METHOD TO CALCULATE DESIGN PEAK DISCHARGES, THE K TERM

Autores: Dr. José Vergara, José-Pedro Mery
Departamento de Obras Civiles,
Escuela de Construcción Civil,
Pontificia Universidad Católica de Chile,
Av. Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile.
emails: drvergara@uc.cl, meryj@uc.cl

Fecha de recepción : 01/10/2004

Fecha de aceptación : 25/10/2004

RESUMEN

La estimación de los caudales máximos de diseño requiere previamente la determinación de las precipitaciones máximas en 24 horas, lo que se realiza por medio de un término empírico (K). Se demuestra en este estudio que el valor de K puede variar entre 1,0 y 2,0, dependiendo, entre otros, de factores meteorológicos, siendo su valor medio cercano a 1,14. La incertidumbre en la determinación de este factor tiene un impacto significativo en el costo y la seguridad de los proyectos viales y de aguas lluvias que utilizan esta metodología.

Adicionalmente a las estaciones consideradas en la normativa vial nacional, dentro de este estudio se incorporan doce nuevas estaciones para la determinación del factor K, dentro de las cuales se incorporan en forma inédita, registros del extremo norte y sur del país.

Palabras claves: Lluvia, caudal de crecida, método racional.

ABSTRACT

The estimation of the maximum river flow of design previously requires the determination of maximum precipitations in 24 hours, this is made by means of an empirical term (K). This study demonstrated, that the value of K can vary between 1,0 and 2,0, depending on the meteorological factors, with an average value of 1,14. The uncertainty in the determination of factor K has a significant impact in the cost and the security of the road and drainage projects. In addition to the meteorological stations considered within the chilean road regulations, this study includes twelve new stations and factor K, in order to improve the K value estimation.

Keywords: Rainfall, peak discharges, rational method.

1. INTRODUCCIÓN

La Fórmula Racional (Ec. 1) constituye una herramienta poderosa y ampliamente utilizada en el cálculo de caudales máximos, siendo frecuentemente recomendada para el diseño de obras de drenaje en proyectos viales y de aguas lluvias (por ejemplo ver Chow, V. T, *et al*, 1994). Sin embargo, esta fórmula presenta una serie de términos que deben ser analizados con precaución al momento de diseñar una obra específica, dado que una mala selección de ellos repercutirá en los costos y seguridad global del proyecto.

$$Q = CIA / 3,6 \tag{Ec. 1}$$

$$P_i^T = K \times CD_i \times CF_T \times P_D^{10} \tag{Ec. 2}$$

$$K = \frac{PP_{\text{Máx}24h}}{PP_{\text{OMM}}} \tag{Ec. 3}$$

El presente artículo forma parte de una secuencia de publicaciones donde se analizarán en detalle cada uno de los términos e incertidumbres involucrados en esta fórmula, utilizando datos y su aplicación en proyectos reales. Esta secuencia se iniciará con el análisis del término K (Ec. 3), utilizado en la determinación de las precipitaciones máximas (Ec. 2), y definido como la relación entre la lluvia máxima en 24 horas (PP_Máx24h) y la lluvia máxima diaria que se mide entre 8:00am y 8:00am (PP_OMM), información usualmente disponible a partir de estaciones pluviométricas tradicionales, y de las cuales se cuenta con registros históricos.

Tabla 1

Resumen de valores del factor K determinados en las doce estaciones utilizadas en el estudio

ESTACIÓN	REGIÓN	K	R ²
LLUTA	I	1,053	0,98
LEQUENA	II	1,380	0,97
AYQUINA	II	1,047	0,98
QUISQUIRO	II	1,007	0,99
CODEGUA	VI	1,126	0,98
COLIN	VII	1,080	0,99
LOS NICHES	VII	1,166	0,94
LA ISLA	VII	1,019	0,96
ROMERAL	VII	1,117	0,96
TALCAHUANO	VIII	1,090	0,96
O' HIGGINS	XI	1,220	0,92
BAKER	XI	1,210	0,83

El Manual de Carreteras (MOP, 2002) recomienda un valor medio de 1,1 para el término K. Sin embargo, en este mismo documento se incorpora una tabla donde este valor presenta una gran variabilidad, que va entre 1,01 en la Paloma (IV Región) y 1,18 en Ensenada (X Región). Esto implica una variación cercana al 10% con respecto al valor propuesto y utilizado normalmente en los proyectos. Por otra parte, este parámetro también muestra una gran variabilidad espacial, dado que una misma Región, y que se encuentra sometida a un régimen de precipitaciones similar, presenta importantes variaciones. Tal es el caso de los registros entregados para la X Región, donde se puede observar valores que van desde 1,06 en el Lago Chapo hasta 1,18 en Ensenada.

En el Manual de Carreteras no se incluye información de la I, II, III, XI y XII regiones, por lo que los valores propuestos en esta normativa técnica no pueden ser extrapolados a las zonas extremas del país. Pese a ello, importantes proyectos de aguas lluvias y viales se están desarrollando en esta zona, por lo que se requiere definir una metodología más precisa.

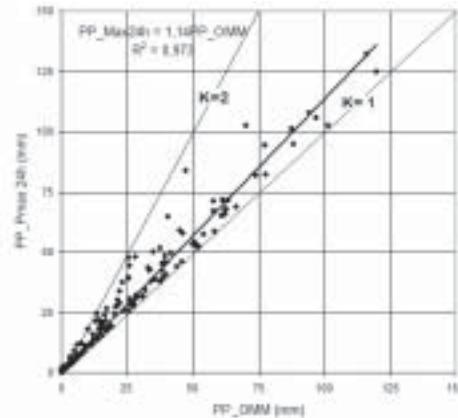


Figura 1: Relación entre PP_OMM y PP_Máx24, determinadas con los datos de todas las estaciones del estudio. Se muestra con línea recta fina los casos K=1 y 2, y mejor ajuste con línea negra gruesa.

La incertidumbre mostrada por el término K, impacta significativamente en los caudales de diseño, y por ende en los costos y seguridad de las obras proyectadas. Esta incertidumbre resulta ser de a lo menos un 10% en los caudales de diseño, la que al ser positiva redundaría en obras más costosas y al ser negativa repercute en obras menos seguras y con períodos de retorno inferiores a los proyectados.

Por lo anteriormente señalado, se estima necesario hacer un análisis más profundo de las causas de la variabilidad del término K, de tal forma de lograr diseños más precisos, obras más confiables y consistentes con los niveles de seguridad requeridos.

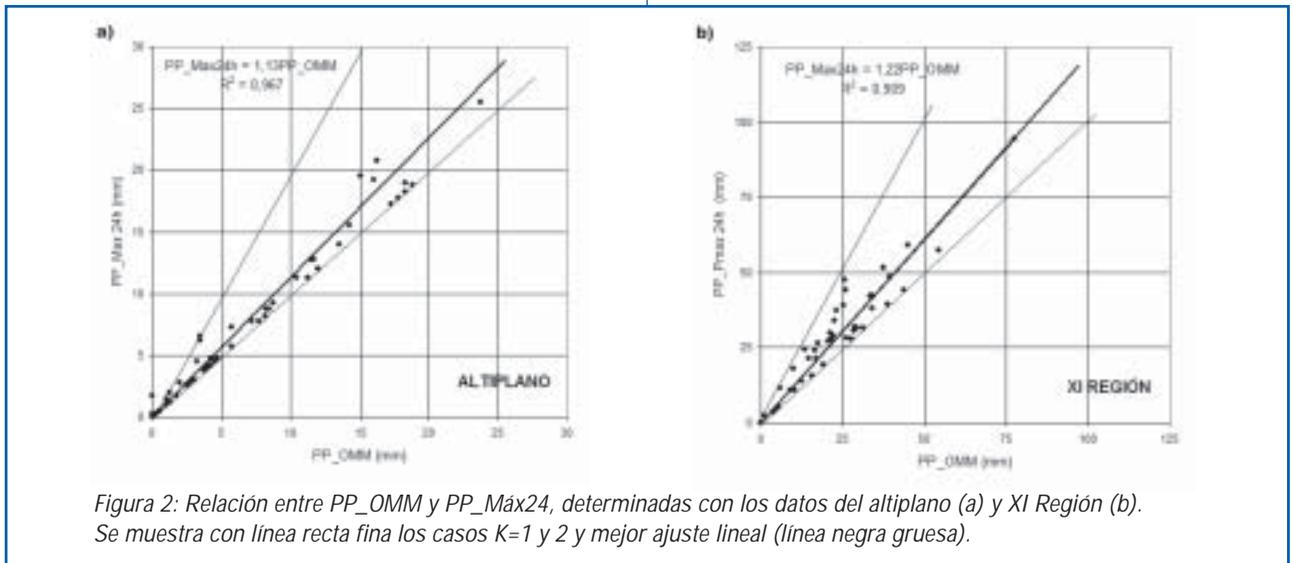
2. DATOS UTILIZADOS EN EL ESTUDIO

Para el presente estudio se contó con información meteorológica horaria de doce estaciones automáticas con registro digital, localizadas en las regiones I, II, VI, VII, VIII y XI. Dentro de estos registros se encuentran los años 1997, 2001 y 2002, años que se encuentran dentro de los más lluviosos en los últimos 50 años, en tanto que el año 1998 resultó ser un año seco. Por lo anterior, los registros utilizados pueden ser considerados como representativos de las condiciones pluviométricas extremas del país, y por tanto adecuadas para el diseño. Con la información horaria de precipitaciones se calcularon tanto la precipitación en 24 horas entre 8:00 am y 8:00 am del día siguiente (PP_OMM), como la máxima en 24 horas (PP_Máx24h), lo que fue tabulado a nivel mensual y anual.

cercano a la unidad (1,007), y un valor superior de 1,38 en Lequena, ambas estaciones localizadas en la II Región. Las estaciones del extremo norte del país tienden a ubicarse, a excepción de Lequena, en valores de K más cercanos a la unidad (Figura 2a), mientras que las observaciones de K de la zona austral tienden a hacerlo cerca de 1,2 (Figura 2b).

El análisis de todos los registros mensuales disponibles en este estudio, muestra una gran variabilidad en el parámetro K, con valores que se encuentran entre 1 y 2,0 (Figura 1), y valor medio igual a 1,14. Se observa una débil zonificación, dado que las estaciones del extremo norte presentan una tendencia a valores más cercanos a la unidad, con un valor medio de 1,13 (Figura 2a), mientras que las estaciones de la zona austral muestran valores mejor distribuidos entre 1 y 2,0, con un valor medio de 1,22 (Figura 2b).

A nivel de las estaciones individuales, se observa un significativo número de casos en que el valor de K se localiza cerca de la recta K=2 (Figura 3). Este fenómeno se repite



3. RESULTADOS

La Tabla 1 resume los distintos de valores de K determinados en el presente estudio, con un valor medio de 1,14, superior en un 4% al valor 1,1 recomendado por el Manual de Carreteras (que utiliza sólo estaciones de la zona central y sur de país). El rango de variación encontrado en el presente estudio es superior a lo indicado en la literatura (MOP, 2002), con un valor inferior en Quisquiró

en prácticamente todas las estaciones del extremo norte al extremo sur del país. Ello permite concluir que el valor de K se encuentra entre 1,0 y 2,0, por lo que asumir un valor cercano a la media de 1,1 puede llevar a errores significativos en el diseño, y en particular en la seguridad de los proyectos.

Entender las causas de la variabilidad del término K resulta fundamental para la de terminación de los parámetros

de diseño y la adecuada aplicación de la Fórmula Racional (Ec. 1). En lo que sigue se enumeran las principales causas que explican variabilidad del término K, basado en la información recopilada en el presente estudio.

1) *Efecto de duración y hora de ocurrencia de las precipitaciones*: este efecto tiene relación con la duración de las precipitaciones, producto que éstas tienen en Chile su origen principalmente en sistemas frontales y convectivos (Vergara, 1998), con una duración media usualmente inferior a 24 horas (Figuras 4a, 4b y 4c). Cuando se tiene lluvias de duración mayor a 24 horas, éstas están asociadas a más de un sistema frontal o sistema convectivo. Por lo anterior, dependiendo de la hora de ocurrencia o paso del sistema de mal tiempo por el lugar, será el valor de K. Si por ejemplo el sistema de mal tiempo ocurre durante la tarde, este valor será cercano a la unidad (Figura 4a), dado que todo el evento podrá ser registrado entre las 8:00 am y 8:00 am. Por el contrario, si éste llega durante la madrugada, las precipitaciones se distribuirán en dos días (Figuras 4b y 4c). Dependiendo de la distribución horaria de precipitaciones (histograma de precipitaciones), el valor de K podría llegar a un valor de 2 en el caso de una lluvia uniforme de 24 horas de duración, que se inicia a las 2:00 am y declina a las 14:00 pm. La Figura 4c muestra el caso de una estación en el Río Baker, donde K resultó igual a 1,85.

2) *Efecto meteorológico*: en general las precipitaciones convectivas (tormentas), que son más frecuentes en el extremo norte del país (Figura 4a) o en el verano en la zona central, tienen un fuerte ciclo diario (las precipitaciones más intensas tienden a ocurrir cerca de la hora de mayor calentamiento solar), mientras que las frontales (más comunes de la zona sur) no presentan este ciclo (los sistemas frontales pueden llegar a cualquier hora del día). Por ello, aquellas zonas del país donde domina una precipitación de componente convectiva (Altiplano), tienen un K más cercano a la unidad. En lugares donde dominan las precipitaciones frontales (por ejemplo extremo sur), este factor puede ser superior a los valores medios recomendados, e incluso cercano a 2,0, lo que permite explicar parte de la variabilidad observada en la Figura 3.

3) *Ciclo anual*: durante el transcurso del año las precipitaciones pasan de sistemas predominantemente convectivos (tormentas) en el verano, a frontales durante el invierno. Esto hace que el factor K presente un fuer-

te ciclo anual, con valores cercanos a 1 durante el verano, a valores en invierno superiores a 1,1 (Figura 5).

4) *Superposición de precipitaciones frontales y convectivas*: estas condiciones tienden presentarse durante los meses de transición en la zona central y sur del país. Durante los meses de abril y mayo, el calentamiento diurno modula la precipitación de los sistemas frontales, por lo que las precipitaciones de estos últimos tienden a tener una fuerte componente convectiva que se superpone a la frontal, y por lo tanto un factor K más alto (Figura 5). Una situación similar ocurre con las precipitaciones invernales en el extremo norte y que afectan, entre lo otros, la zona costera, como lo ocurrido en Antofagasta durante el aluvión de junio de 1991. En este caso las lluvias se iniciaron durante la madrugada (Hauser, 1997).

Tabla 2

Resumen con las características generales del proyecto de mejoramiento Ruta A-55, Huara-Colchane

CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN
PROYECTO SECTOR	: Estudio de Ing. Mejoramiento Ruta A-55, Huara – Colchane : Huanta – Caxuzaya, Km 122,50 al Km 147,70
LONGITUD	: 25,2 Km
PROVINCIA / REGIÓN	: Iquique / I Región
INVERSIÓN ESTIMADA	: \$ 4.100 millones de pesos (en dinero de 1996)
TIPO DE PAVIMENTO	: Imprimación reforzada especial
VELOCIDAD DE DISEÑO	: 70 – 100 KPH
CALZADA / BERMAS	: 7 m / 1 m
ALTITUD MEDIA	: 3200 m.s.n.m.
PRECIPITACIÓN DE DISEÑO	: 36,7 mm
PERÍODO RETORNO T	: 10 años
Nº CUENCAS APORTANTES	: 8
DRENAJE TRANSVERSAL	: 16 alcantarillas en tubos de acero corrugado Ø 0.8 – 1.0 m. Considera alto arrastre de sedimentos
DRENAJE LONGITUDINAL	: Cunetas de tierra, y revestidas para pendientes sobre 4% Fosos y contrafosos de tierra, y sección 0,5 x 0,5 m

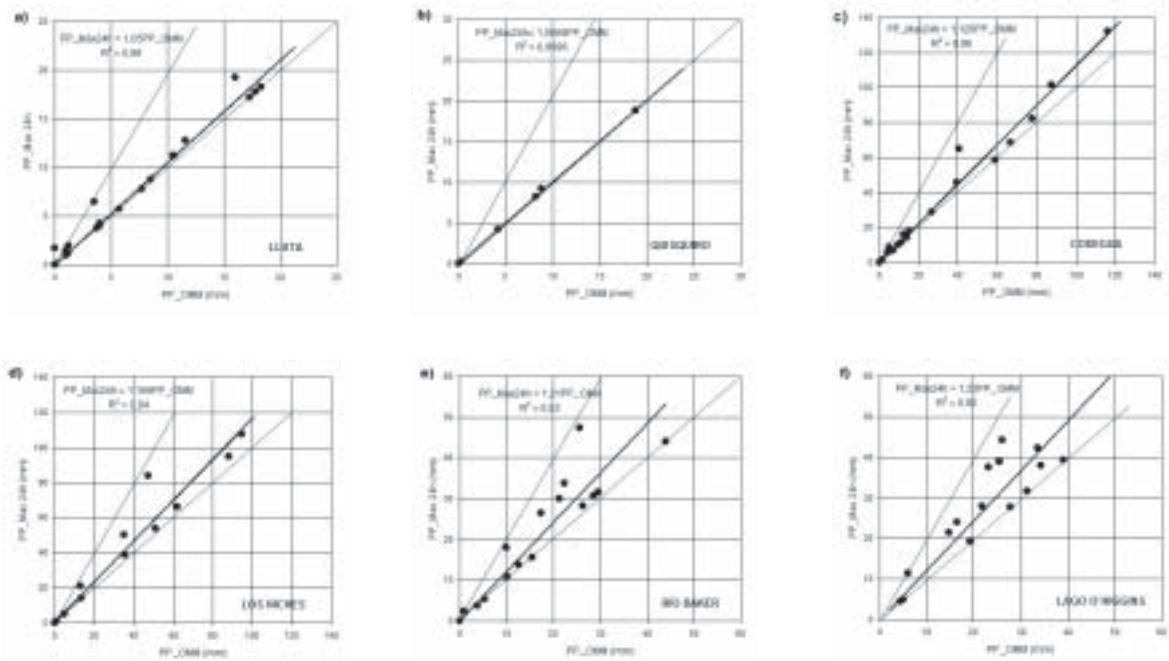


Figura 3: Relación entre PP_OMM y PP_Max24, determinadas en seis de las estaciones utilizadas en el estudio. Se muestra con línea recta fina los casos K=1 y 2 y mejor ajuste con línea negra gruesa.

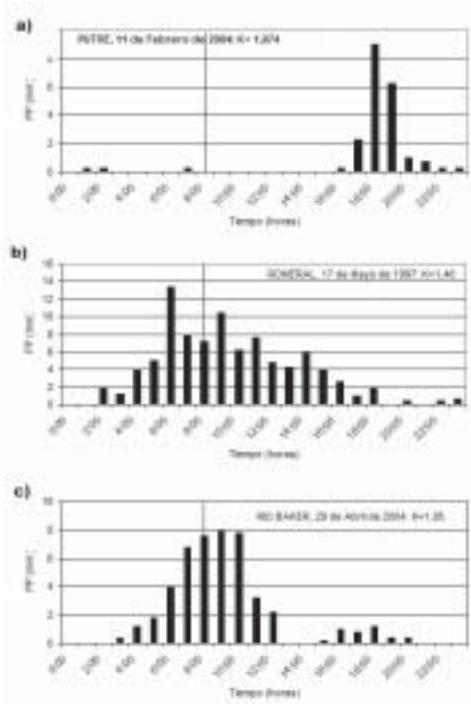


Figura 4: Histograma de precipitaciones de tres eventos de precipitaciones con K=1,07 (arriba), 1,46 (centro) y 1,85 (abajo).

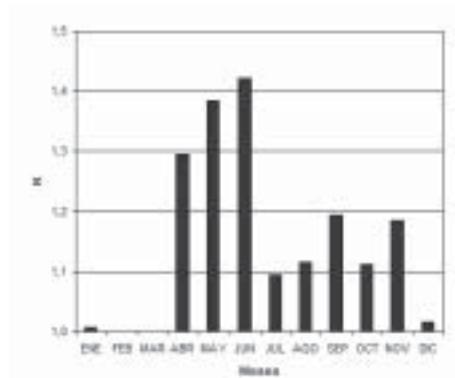


Figura 5: Evolución mensual de los valores medios de K determinados durante el año 1997 en las estaciones de las regiones VII y VIII.

4. IMPACTO EN LA SEGURIDAD DE LAS OBRAS

Dada la incertidumbre asociada al término K, queda hacerse pregunta ¿cómo afecta ésta a la seguridad de las obras o su período de retorno? Dado las características poco elásticas que tienen las distribuciones de probabilidades de las precipitaciones extremas (Figura 6), su impacto será entonces significativo. Tomando como ejemplo una precipita-

ción de diseño de 36,7 mm para una obra con 10 años de período de retorno en la localidad de Colchane, ubicada en el norte de Chile (Altiplano de la I Región), donde se dispone de precipitaciones tradicionales por 20 años (PP_OMM), y asumiendo que las distribuciones de probabilidades de éstas son similares a las de las precipitaciones máximas en 24 horas (PP_Máx24h), una subestimación en las precipitaciones de diseño en 24 horas de tan sólo un 10% (Figura 6), correspondiente a 3,7 mm, significa una reducción en la seguridad de la obra cercana al 30%. Considerando el período de retorno y la precipitación de diseño mencionada, el efecto de reducir esta última en un 10% (3,7 mm), disminuirá a 7 años el período de retorno o seguridad del proyecto final (Figura 6).

Este considerable efecto de la incertidumbre en las precipitaciones de diseño, en este caso asociado a al término K sobre la seguridad de las obras, permite explicar las frecuentes fallas en obras viales asociadas a lluvias intensas y frecuentemente llamadas “inusuales”.

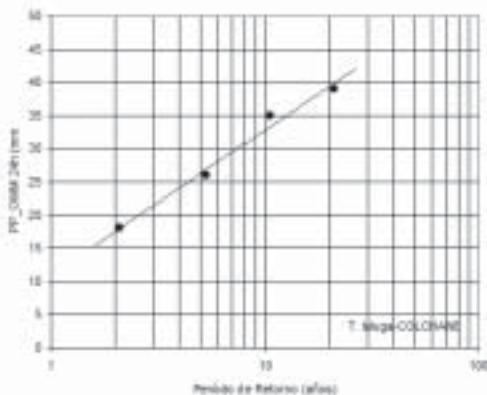


Figura 6: Precipitaciones en 24 horas en función de su período de retorno. Colchane, Altiplano de la I Región.

5. IMPACTO ECONÓMICO EN EL VALOR FINAL DE LAS OBRAS

Para evaluar el impacto económico que tiene la incertidumbre en la determinación del factor K en el costo de las obras drenaje transversal y proyecto total, se ha elegido un caso real, correspondiente a un estudio de ingeniería de mejoramiento de un tramo de 25 kilómetros de la Ruta A-55, Huara – Colchane, I Región (Tabla 2), elaborado en 1996 por una empresa consultora del MOP. El sector específico corresponde al tramo Huanta–Caxuzaya, Km 122,50 al 147,60, cuya solución de drenaje transversal se proyectó en base tubos de acero corrugado de diámetros 1 y 0,8 metros, siguiendo las recomendaciones del Manual de Carreteras de la época.

El diseño de las alcantarillas se basó en estadísticas de precipitaciones de la estación pluviométrica T. Isluga ubicada en Colchane (Figura 6), considerada como representativa para el tramo en cuestión, dada su ubicación en el altiplano, y que comprende las zonas de Huanta, Cariquima, Caxuzaya y Colchane.

A partir de los registros de pluviometría se efectuó un análisis de frecuencia de precipitaciones máximas anuales en 24 horas, para luego determinar las intensidades de lluvia de diseño, con un período de retorno de 10 años, conforme lo indica el Manual de Carreteras, resultando una lluvia de diseño de 36,7 mm (Tabla 2).

El análisis de sensibilidad del costo de las obras frente a variaciones en los caudales de diseño, producto de la incertidumbre en las precipitaciones de diseño asociadas al

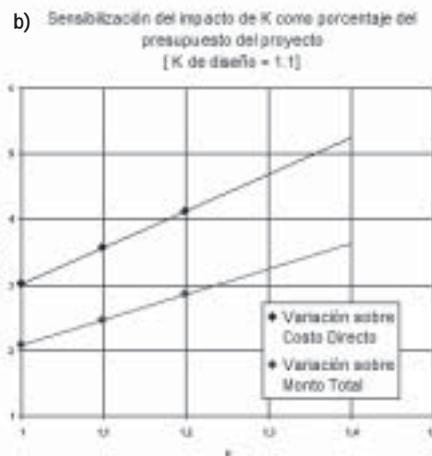
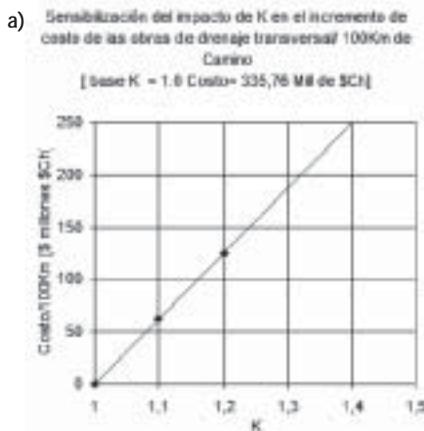


Figura 7: Incidencia de variaciones en el valor de K sobre el costo de las obras de drenaje transversal por cada 100 km de camino (izquierda) e incidencia en el presupuesto total (derecha). La solución de drenaje transversal es en base a tubos de acero corrugado (ϕ 1,0 y 0,8 m). Ruta A-55, Sector Huanca-Caxuzaya, I Región.

valor de K, muestra que una sobreestimación en la intensidad de precipitación de 10% (inadecuada selección del término K en el cálculo de las precipitaciones máximas en 24 horas), puede generar un incremento en el costo de las obras por un monto aproximado de 60 mill\$Ch, por cada 100 Km de mejoramiento de la ruta (Figura 7a). Mientras que la incidencia en el costo total del proyecto puede ser del orden de sólo un 0,5% (Figura 7b). De lo anterior, y para un proyecto de similares características, se concluye que no es relevante ahorrar en el ítem obras de drenaje, en perjuicio de la seguridad global de la obra.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Del presente estudio se concluye que la utilización del factor K, que permite estimar las precipitaciones máximas en 24 horas a partir de registros pluviométricos históricos, y con esto los caudales máximos de diseño como por ejemplo obras de arte, puede llevar a importantes errores que impactan tanto en la seguridad de la obra como en el costo de la misma.

Dentro del estudio se identifican distintos elementos que permiten explicar la variabilidad observada en K, entre los cuales destacan: la hora de ocurrencia de las precipitaciones, el tipo de precipitación y el ciclo diario en las precipitaciones, todos factores que hacen que el valor de K pueda variar teóricamente entre 1,0 y 2,0, mientras que los valores reales determinados en este estudio se encuentran entre 1,0 y 1,9 confirmando los anteriores. Estas variaciones introducen por tanto una gran incertidumbre en el diseño de obras de protecciones, dado que no se puede asumir un valor específico.

El análisis de un proyecto vial real de la zona norte del país muestra que variaciones de un 10% en el valor de K, generan variaciones cercanas a un 15% (60 mill\$Ch, por cada 100 Km) en el costo de obras de drenaje, al mismo tiempo que repercute de manera considerable en la seguridad de la obra, dado que una subestimación en 10% en las precipitaciones asociadas al valor de K disminuye la seguridad de la obra en aproximadamente un 30%. Es decir que se pasa de un período de retorno de 10 años requerido por diseño, a uno de 7 años, lo que pone en riesgo las obras y su explotación.

Por lo anteriormente expuesto, los autores recomiendan no utilizar un valor medio para K de 1,1 en proyectos de drenaje y saneamiento donde se pueda comprometer la seguridad de las obras completa, sin antes analizar detenidamente los datos meteorológicos disponibles. En el caso de no existir registros confiables en la zona del proyecto, se recomienda seleccionar un valor más cercano a 2,0, teniendo en consideración el adecuado equilibrio que debe existir en todo proyecto entre seguridad, calidad de servicio y costos en los sistemas de protección.

También se resalta que en un proyecto vial, sólo una parte menor (~3%) corresponde al ítem obras de drenaje y saneamiento, por lo que no se justificaría ahorrar en esta partida a costa de poner en riesgo la seguridad de la obra final.

7. RECONOCIMIENTO

Los autores agradecen al Ministerio de Obras Públicas, que facilitó parte de la información de precipitaciones utilizada en el estudio. De igual manera a la empresa Copefrut S.A. por permitir el uso de los registros de su red estaciones automáticas en la VII región.

REFERENCIAS

1. Chow, V.T., D. R. Maidement y L. W. Mays, 1994, Hidrología Aplicada, Mac Graw Hill, 58p.
2. Hausser, A., 1997, Los Aluviones del 18 de junio de 1991 en Antofagasta: Un Análisis Crítico, a 5 años del Desastre, Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín, Nº 49, 47p.
3. Ministerio de Obras Públicas Transporte y Telecomunicaciones (MOP), 2002, Manual de Carreteras: Instrucciones y Criterios de Diseño, y Procedimientos de Estudios Viales, Volúmenes 2 y 3.
4. Vergara, J., 1998, Pronóstico del Tiempo Aplicado al Sector Hidroeléctrico Chileno, Seminario Latino-Americano sobre los Impactos del El Niño/La Niña en Gesto de Recurso Hídricos em Sistemas Hidroeléctricos, 14p.