

XIII CONGRESO CHILENO

2.3.- INTRODUCCIÓN DE FACTORES DE SEGURIDAD HIDROLÓGICOS EN EL DISEÑO DE OBRAS HIDRÁULICAS SITUADAS EN REGIONES CON INFORMACIÓN ESCASA

FERNANDO HARAMBOUR P.¹
XIMENA VARGAS M.²

RESUMEN

En este trabajo se discute la incertidumbre presente en los caudales de diseño cuando estos han sido obtenidos en base a series de corta longitud. Para dichos casos, se analiza la conveniencia y factibilidad de utilizar en Chile, factores de seguridad para mayorar los caudales de diseño obtenidos en base al análisis de frecuencias tradicional. También se discute la incidencia que dichos factores de seguridad tendrían para incentivar la medición de variables hidrológicas.

Tabla 3.- Valores de las probabilidades marginales, P_{ij} , de transición, P_{ij} , y P_{ij} para $i=1,2,3,4$ en la cuenca del Mapocho en Los Almendros

	$q(t,1)$			
	$t=1$	$t=2$	$t=3$	$t=4$
1	0.886	0.965	0.734	0.886
2	0.795	0.926	0.800	0.795
3	0.682	0.771	0.939	0.682
4	0.455	0.608	0.140	0.455
5	0.294	0.550	0.083	0.294
6	0.136	0.385	0.037	0.136
7	0.068	0.237	0.026	0.068
8	0.068	0.567	0.024	0.068
9	0.068	0.995	0.003	0.068
10	0.068	0.995	0.003	0.068
11	0.068	0.995	0.003	0.068
12	0.682	0.990	0.576	0.682

Tabla 4.- Período de retorno (años) de sucesiones de r meses seguidos con caudales ecológicos

Río	Estación	$r=2$	$r=3$	$r=4$	$r=5$
Copiapó	La Puerta	1.8	2.8	8.9	5.6
Tránsito	Justo Carrizo	2.4	2.4	2.9	3.8
Elqui	Chacabuco	1.5	2.0	2.6	3.3
Choapa	Pte. Negro	0.7	1.2	1.6	2.1
Aconcagua	Chacabuco	0.2	0.4	0.6	0.9
Mapocho	Los Almendros	0.3	0.7	1.3	2.4
Maipo	El Mazzano	0.3	0.5	0.8	1.3

Tabla 5.- Retorno de una sucesión de r meses seguidos con caudales ecológicos

Río	Estación	$r=2$	$r=3$	$r=4$	$r=5$
Copiapó	La Puerta	0.99	0.98	0.93	0.87
Tránsito	Justo Carrizo	0.99	0.99	0.98	0.94
Elqui	Chacabuco	0.98	0.99	0.99	0.96
Choapa	Pte. Negro	1.00	1.00	1.00	1.00
Aconcagua	Chacabuco	1.00	1.00	1.00	1.00
Mapocho	Los Almendros	1.00	1.00	1.00	0.99
Maipo	El Mazzano	1.00	1.00	1.00	1.00

¹Ingeniero Civil Universidad de Chile, Ms. Sc. Pontificia Universidad Católica de Chile, Empresa Eléctrica Pangue S.A.
²Ingeniero Civil Universidad de Chile. Profesor Asociado Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile

1.- INTRODUCCIÓN

Debido a que las obras hidráulicas están sometidas a solicitaciones de carácter aleatorio no es posible determinar a priori la magnitud de la solicitación más exigente que la afectará durante su vida útil. Por esta razón, para reducir su riesgo de falla se acostumbra a diseñarlas para que comporten satisfactoriamente ante la ocurrencia de eventos de baja frecuencia.

De acuerdo con este enfoque, lo ideal sería diseñarlas para que resistan eventos extremos que ocurren con una frecuencia prácticamente nula. Este hecho, sin embargo, produciría obras muy caras, difíciles de financiar e incapaces de competir económicamente con otras obras o necesidades de la sociedad y, posiblemente también, cuyo costo de construcción supere ampliamente los beneficios que de ellas se obtienen. Por tal motivo se han desarrollado procedimientos basados en la comparación de costos y beneficios, y se han elaborado reglamentos y recomendaciones orientadas a la selección de los eventos de diseño (por ejemplo, las recomendaciones del Manual de Carreteras de la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas, para seleccionar el periodo de retorno de crecidas de diseño de obras de drenaje de carreteras).

En las regiones extremas de nuestro país, a pesar de que normalmente se cuenta con poca información sobre la frecuencia y magnitud de los eventos relevantes para el diseño de obras hidráulicas, es habitual calcular las solicitaciones de diseño suponiendo que se conoce perfectamente la relación entre la frecuencia y la magnitud de cada evento. Este hecho - que pareciera tener origen en que se confunde el riesgo hidrológico, que se deriva del carácter aleatorio de las solicitaciones hidrológicas, con la incertidumbre existente para determinar la magnitud de un evento - conduce a diseñar obras que pueden tener un riesgo de falla muy diferente al supuesto.

Por ejemplo, es habitual que cuando se diseña una alcantarilla para una crecida con periodo de retorno de 50 años, se indique que en un periodo de 30 años tendrá un riesgo de falla de un 1%, ignorando que la calidad y cantidad de información que se posee sobre dicho fenómeno afecta la precisión con que se determinan los caudales de diseño.

Para introducir el efecto de la cantidad de información con que se cuenta para tomar una decisión respecto de la solicitación de diseño, se han desarrollado procedimientos que permiten calcular intervalos de confianza en función de la longitud de la serie y del periodo de retorno del evento considerado. (Reinius, 1989). Este hecho ha conducido a que en algunos países se recomiende el uso de factores de seguridad similares a los que se emplean en otras áreas de la ingeniería (Mkhandi et al., 1996), con el propósito de asegurar diseños en que el riesgo hidrológico verdadero sea mayor o igual que el riesgo hidrológico supuesto.

En este trabajo se discute y analiza a través de un ejemplo, la conveniencia y factibilidad de utilizar en Chile, particularmente en zonas que cuentan con series de información hidrológica de corta longitud, factores de seguridad para mayorar los caudales de diseño obtenidos con el análisis de frecuencias tradicional (basado en el ajuste de funciones de distribución de frecuencias preseleccionadas a los valores medidos). También se discute la incidencia que dichos factores de seguridad tendrían para incentivar la medición de variables hidrológicas.

2.- INCERTIDUMBRE PRESENTE EN LOS CAUDALES DE DISEÑO

Al considerar que las realizaciones de un evento hidrológico, como son las series de caudales máximos anuales, corresponden a un proceso estocástico, éstas pueden ser analizadas por

Longitud de la serie (n)	Factor de seguridad (F)
10	1.10
20	1.05

SELECCIONAR CAUDALES DE DISEÑO INCORPORANDO LA INCERTIDUMBRE PRESENTE EN SU DETERMINACIÓN. APLICACIÓN A LA SELECCIÓN DE OBRAS EN DESEMBOLCADURA

Consecuentemente con ello, generalmente en los estudios de evaluación de crecidas se indica el caudal máximo de crecidas para diferentes periodos de retorno y se omite toda indicación relativa a la precisión con la que ellos se determinan: como podrían ser, por ejemplo, los intervalos de confianza en que pueden estar comprendidos dichos caudales. Es decir, se procede como si los extremos de los intervalos de confianza se encuentran tan próximos entre sí, que su identificación no aporta información relevante.

Esta afirmación se puede ilustrar a través de una situación concreta, tal como la evaluación de caudales máximos de crecida en la desembocadura del río San Juan (Península Brunswick - Región), destinada, por ejemplo, a la determinación de las características de un puente. En este caso - como en muchos otros cauces superficiales de Chile - no obstante los esfuerzos realizados por la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas, aún no se cuenta con registros de caudales máximos que abarquen muchos años. En este caso, de hecho sólo se cuenta con un registro completo de caudales máximos instantáneos a partir de 1981.

Considerando que no se cuenta con información hidrológica confiable o más extensa de otros ríos situados en aquella zona, es razonable usar la información fluviométrica medida en dicho río para determinar el caudal de diseño del puente. Si se considera la serie de caudales máximos registrada entre los años 1981 y 1991 en la estación fluviométrica Río San Juan Desembocadura, disponible en la región, es posible señalar que ellos provienen de una población lognormal con parámetros 4,982 y 0,502 (media y desviación estándar del logaritmo natural de los caudales máximos registrados) y determinar que el caudal máximo de crecidas con periodo de retorno comprendido entre 10 y 200 años varía entre 277 y 531 m³/s, tal como se indica en la Tabla N° 1.

Tabla N° 1: Río San Juan en Desembocadura.
Crecidas con periodos de retorno comprendido entre 10 y 200 años

Periodo de retorno (años)	Caudal (m ³ /s)
10	277
50	409
100	469
200	531

En base a los resultados indicados en la Tabla N° 1 y considerando lo recomendado por la Dirección de Vialidad para diseñar un puente perteneciente a una carretera secundaria, habitualmente se concluiría que las características del puente deben calcularse sobre la base de un caudal máximo igual 469 m³/s asociado a periodo de retorno 100 años, y que el riesgo hidrológico asumido en el diseño (evaluado con la ecuación (2)) es de 39% en 50 años.

Para investigar si el riesgo hidrológico supuesto es el riesgo hidrológico verdadero, se generaron 100 series de caudales máximos, cada una de ellas compuesta por 11 valores independientes provenientes de una población lognormal con parámetros 4,982 y 0,502 (coincidiendo

con los de la muestra obtenida del río San Juan). En base a cada una de ellas se calculó el caudal correspondiente a una crecida con periodo de retorno de 100 años, que luego fue ordenado de mayor a menor, obteniendo los resultados indicados en la Tabla N° 2.

Tabla N° 2: Río San Juan en Desembocadura.
Caudal Máximo de Crecidas con Periodo de Retorno de 100 años

Caudal m ³ /s	Caudal m ³ /s
5	727
10	691
50	458
90	314
95	283

De acuerdo con los resultados obtenidos (Tabla N°2), si el caudal máximo de crecidas en el río San Juan en Desembocadura efectivamente sigue la distribución lognormal recién indicada, mediante el análisis probabilístico tradicional de muestras de 11 años de duración se podría llegar a concluir que el caudal de diseño del puente debería ser igual a 283 m³/s o 727 m³/s, o bien cualquier otro caudal intermedio. Este hecho es preocupante, pues demuestra que el uso de una serie de 11 años puede conducir a diseñar el puente con un caudal de 283 m³/s, creyendo que se asume un riesgo hidrológico de 39% en 50 años, cuando la verdad es que al dimensionar el puente con dicho caudal en realidad se está asumiendo un riesgo muchísimo mayor (de un 99% en 50 años, debido a que dicho caudal tiene un periodo de retorno real cercano a 11 años en lugar de 100 años).

El análisis anterior muestra, por una parte, que el uso de registros de corta longitud puede conducir a diseños muy inseguros (o muy conservadores) y, por otra, que es necesario realizar esfuerzos para extender los registros de caudales y, simultáneamente, desarrollar métodos para seleccionar caudales de diseño que tomen en cuenta la precisión que la que es posible evaluar dicha variable.

4.- ALTERNATIVAS PARA SELECCIONAR CAUDALES DE DISEÑO INCORPORANDO LA INCERTIDUMBRE EXISTENTE EN SU DETERMINACIÓN. APLICACIÓN A LA CUENCA DEL RÍO SAN JUAN EN DESEMBOCADURA

Tal como se indicó anteriormente, una alternativa para tomar en cuenta la incertidumbre existente en la determinación de solicitaciones de diseño con registros de corta longitud, consiste en introducir factores de seguridad (Mkhandi et al., 1996), que permitan la obtención, con cierto nivel de confianza establecido de antemano, de solicitaciones de diseño que conduzcan a riesgos inferiores o iguales al especificado en códigos y reglamentos. Esta alternativa, sin embargo, podría conducir a diseños extremadamente seguros y caros.

Existen básicamente dos caminos diferentes para introducir factores de seguridad

hidrológicos en el diseño de obras hidráulicas: el primero consiste en calcular el límite superior e inferior del intervalo de confianza de caudales de crecidas con periodo de retorno dado, basándose en la función de distribución de frecuencias de muestreo o bien, en caso que no se conozca dicha función, en base a ellas, calcular el caudal correspondiente al periodo de retorno del evento de diseño efectuando en seguida un análisis de frecuencias del caudal así obtenido.

El segundo camino consiste en utilizar factores de seguridad dependientes de la longitud de la serie de datos disponible, que fueron obtenidos en estudios regionales realizados por organismos responsables de establecer normas y procedimientos de diseño.

Siguiendo el primer camino y considerando que para una población lognormal, los límites superior e inferior del intervalo de confianza asociados al nivel de confianza α de una crecida de periodo de retorno T, pueden calcularse en forma aproximada con la ecuación (1), se obtienen los intervalos de confianza al 90 y 95% indicados en la Tabla N° 3, lo que se presenta gráficamente en la figura 1 para un nivel de confianza del 90%.

Tabla N° 3: Río San Juan en Desembocadura. Caudales de diseño e intervalos de confianza en función del periodo de retorno de la crecida de diseño

T	Q	90%		95%	
		Inferior	Superior	Inferior	Superior
años	m ³ /s				
10	277	198	388	186	414
50	409	263	634	242	690
100	469	290	757	265	830

Según lo indicado en esta tabla, si se desea tener un 95% de seguridad de que el caudal hidrológico en 50 años de vida del puente, sea inferior o igual a un 39%, se debe considerar un caudal de diseño de 757 m³/s, en lugar de 469 m³/s; como se deduce del análisis tradicional, que incorpora la incertidumbre que se deriva del uso de registros de sólo 11 años de duración. Por otra parte, si se desea tener un 97,5% de seguridad se debe considerar un caudal de diseño de 830 m³/s.

Por su parte, si se desea usar el segundo camino, es necesario que alguna institución u organismo publique los factores de seguridad a usar en función de la longitud de la serie, basándose en el análisis del comportamiento hidrológico de los ríos de cada región geográfica de Chile.

Debido a que no se cuenta con dicha información, se procedió a determinar factores de seguridad aproximados para el río San Juan en Desembocadura. Estos factores de seguridad se calcularon, para cada periodo de retorno y longitud de serie, dividiendo el caudal que se deduce de la población lognormal obtenida de la muestra histórica, por el quinto o décimo menor caudal del mismo periodo de retorno (dependiendo del nivel de seguridad con que se desea que el caudal real sea menor o igual al supuesto), obtenido generando 100 series de la longitud considerada. Este procedimiento condujo a los factores de seguridad indicados en la Tabla N° 4.

Tabla N° 4: Río San Juan en Desembocadura. Factores de seguridad hidrológicos.

T	N = 11 datos		N = 20 datos		N = 30 datos		N = 40 datos		N = 50 datos	
	90%	95%	90%	95%	90%	95%	90%	95%	90%	95%
Años										
50	1,40	1,54	1,26	1,41	1,24	1,32	1,23	1,30	1,23	1,24
100	1,49	1,60	1,28	1,46	1,27	1,34	1,25	1,31	1,25	1,27

De acuerdo con esta tabla, si se desea tener un 95% de probabilidad de que el periodo de retorno real sea mayor o igual que el supuesto, el caudal correspondiente a un periodo de retorno de 100 años, obtenido de la forma tradicional (ajuste de una función de distribución de frecuencias a la serie de datos) debe multiplicarse por un factor igual a 1,60 si sólo se dispone de 11 valores medidos o igual a 1,27 si se dispone de una serie compuesta por 50 valores.

5.- SENSIBILIDAD DEL FACTOR DE SEGURIDAD A LAS CARACTERÍSTICAS ESTADÍSTICAS DE LA POBLACIÓN

La introducción de factores de seguridad hidrológicos permite obtener diseños confiables en zonas con información escasa e incentiva la medición de (o el pago por) información hidrológica, debido a que permite cuantificar económicamente los beneficios de contar con más información. Sin embargo, para que sea un procedimiento robusto, es necesario que dichos factores no dependan de las características estadísticas de la información; lo que desafortunadamente, y tal como se indica en las Tablas N° 5 y N° 6, no se cumple.

Tabla N° 5: Río San Juan en Desembocadura. Sensibilidad del Factor de Seguridad Hidrológico (90%)

Promedio (M)	Desv. (D)	N = 10		N = 30		N = 100	
		T=50	T=100	T=50	T=100	T=50	T=100
5,00	0,50	1,43	1,50	1,24	1,27	1,22	1,24
5	0,75	1,71	1,83	1,38	1,43	1,35	1,38
5,00	1,00	2,05	2,24	1,53	1,61	1,50	1,54
7,50	0,50	1,43	1,50	1,24	1,27	1,22	1,24
10,00	0,50	1,43	1,50	1,24	1,27	1,22	1,24

Tabla N° 6: Río San Juan en Desembocadura.
Sensibilidad del Factor de Seguridad Hidrológico (95%)

Promedio (M)	Desv. (D)	N = 10		N = 30		N = 100	
		T=50	T=100	T=50	T=100	T=50	T=100
5,00	0,50	1,66	1,73	1,31	1,34	1,24	1,24
5	0,75	2,15	2,28	1,51	1,55	1,38	1,42
5,00	1,00	2,77	3,00	1,73	1,80	1,54	1,60
7,50	0,50	1,66	1,73	1,31	1,34	1,24	1,24
10,00	0,50	1,66	1,73	1,31	1,34	1,24	1,24

En estas dos tablas se aprecia que el factor de seguridad es independiente de la media serie y depende de su desviación estándar (tal como se observa en la ecuación (1)). Por su parte, según demuestran Mkhani et al. (1996) también depende de la función de distribución de frecuencias ajustada y del método que se emplea para calcular sus parámetros.

Este hecho, sin embargo no invalida el uso de factores de seguridad hidrológicos, sino que refuerza la idea de que sean las instituciones u organismos encargados de establecer criterios y normas de diseño quienes, en base a análisis regionales, establezcan los factores de seguridad hidrológicos que debe ser usados por los encargados del dimensionamiento de obras hidráulicas.

6.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos en este estudio, la determinación de crecidas máximas de crecidas relevantes para el dimensionamiento de obras hidráulicas, normalmente sujeta a incertidumbres que se originan debido a que las series hidrológicas existentes son de mediana o corta longitud.

Este hecho puede conducir a subdimensionamientos con consecuencias lamentablemente catastróficas. Por este motivo, en algunos países que cuentan con registros de mediana y extensión, se ha introducido el uso de factores de seguridad hidrológicos, que permiten dimensionar obras hidráulicas con niveles de seguridad mayores o a lo sumo iguales a los aceptables por la sociedad en que se insertan.

La introducción de dichos factores de seguridad, también constituyen un incentivo para la medición de variables hidrológicas, al poner de manifiesto el costo que se debe pagar por disponer de registros cortos. Además, muestra un aspecto presente en la evaluación de crecidas máximas de crecidas, que normalmente se omite o se relega a un segundo plano.

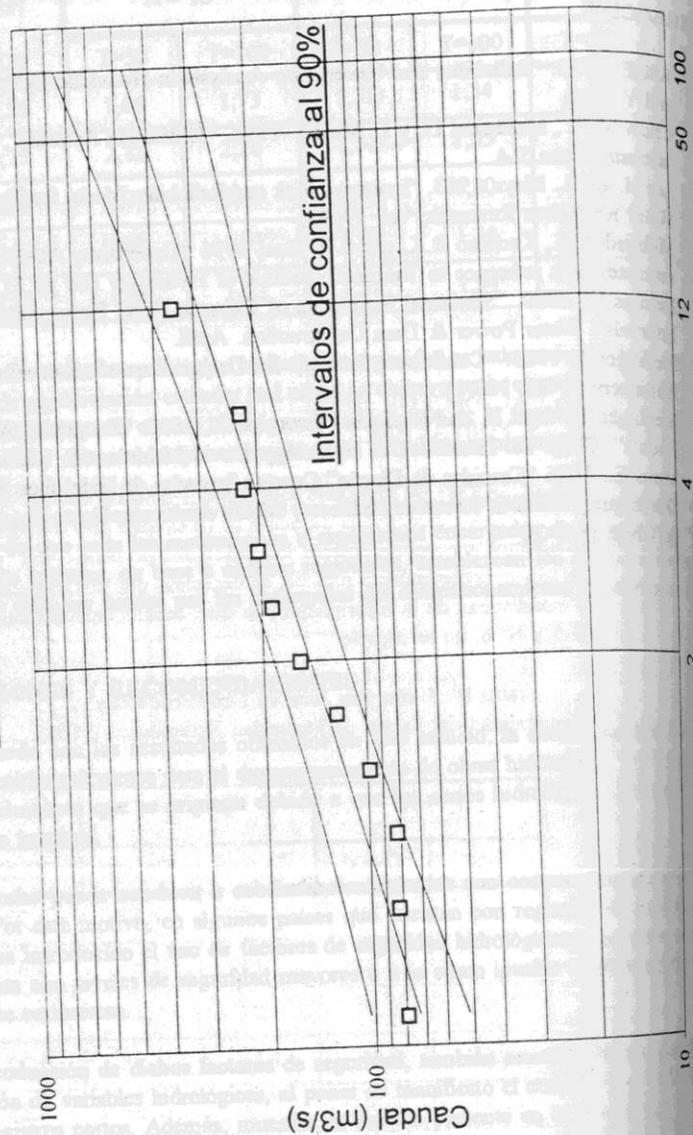
Debido a la dependencia de los factores de seguridad hidrológicos de las características estadísticas de las series hidrológicas, se recomienda que los organismos o instituciones encargadas de velar por la seguridad de las obras hidráulicas insertas en Chile, determinen los factores

usados en distintas regiones con características geográficas y climáticas similares. En la evaluación de tales factores, puede introducirse, además de consideraciones relativas a la seguridad de las obras, aspectos económicos y sociales.

REFERENCIAS

- ASCE. 1993. "Reliability and Uncertainty Analysis in Hydraulic Design". De. B.C. Yen and Y. Tung
- Chow V. T., Maidment D. y L. Mays, 1994. "Hidrología Aplicada". McGraw-Hill Interamericana S.A.
- Lee H. and L. Mays, 1983. "Improved Risk and Reliability Model for Hydraulic Structures". Water Resources Research, Vol. 19(6)
- Mkhani S.H., Kachroo R.K. and S.H. Guo, 1996 "Uncertainty Analysis of flood quantile estimates with reference to Tanzania". Journal of Hydrology 185 pp 317 - 333.
- Reinius E., 1989. "Statistical Estimation of Extreme Flood Flows using Confidence Intervals". Water Power & Dam Construction. April.
- Stedinger J., 1983. "Confidence Intervals for Design Events". Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 109(1).
- Stedinger J., Vogel R. and Foufoula - Georgiou E., 1993. "Frequency Analysis of Extreme Events". Chap. 18. Handbook of Hydrology. David Maidment E. McGraw-Hill.
- Varas E., 1996 "Crecidas de Diseño" Cuartas Jornadas de Hidráulica Francisco Javier Dominguez. División Recursos Hídricos y Medio Ambiente, Depto. Ing. Civil, Universidad de Chile. pp 3-20

Fig. 1: RIO SAN JUAN EN DESEMBOCADURA
Análisis de Frecuencia



2.4.- ESTIMACION DE LA COBERTURA NIVAL USANDO IMAGENES
LANDSAT Y NOAA PARA LA MODELACION Y
PRONOSTICO DE DESHIELO EN LA DGA

WALTER ROSENTHAL ¹
FERNANDO ESCOBAR ²
ROGER BALES ³
MARTIN FARIAS ⁴

RESUMEN

El desarrollo y masificación de las imágenes satelitales, el explosivo perfeccionamiento de los computadores y su incorporación a los estudios de derretimiento de nieves en sus modos de modelación y de pronóstico, nos permite afirmar que se están logrando grandes adelantos en el presente y se prevee su aumento en el futuro. Algunas imágenes aún tienen costos muy elevados, pero la tendencia es a la baja. También cada vez se logran obtener imágenes con mayor resolución y con mayor frecuencia. La incorporación de imágenes de radar ha permitido tener mayor seguridad en la obtención de imágenes claras y permiten obtener algunas características físicas del manto de nieve.

En este trabajo se presenta el proceso de imágenes LANDSAT para la cuenca del Estero Glaciar Echaurren (área = 4.5 Km²), para la temporada 1991/1992 que corresponde a un año normal a húmedo. Este proceso fue realizado en la Universidad de California - Santa Bárbara (UCSB) como parte del convenio entre la Dirección General de Aguas (DGA) y dos Universidades Norteamericanas que se mencionan más adelante.

También se presenta el proceso de imágenes NOAA para la cuenca del Río Yeso en Embalse (área = 350 Km²) para las temporadas 1991/92 y 1993/94, esta última temporada corresponde a un año seco. Este proceso fue realizado por el Centro de Percepción Remota (CPR) de la Universidad Católica (UC), por encargo de la DGA.

Se procesaron 12 cuencas y subcuencas del Maipo y Mapocho (ver figura 2) pero por problemas de espacio, se presentan sólo los resultados del Embalse el Yeso. Éstos son muy alentadores.

¹PH.D., Universidad de California - Santa Barbara - U.S.A.
²ING., Dirección General de Aguas - Chile.
³PH.D., Universidad de Arizona - Tucson - U.S.A.
⁴ING., Pontificia Universidad Católica de Chile.