

FIGURA 1 Esquema del Procedimiento

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

IX CONGRESO NACIONAL

CURVAS DE FRECUENCIAS REGIONALES

PARA LA VARIABLE VOLUMEN DE ESCORRENTIA DIRECTA

XIMENA VARGAS M. (1)

CARLOS ANDREANI V. (2)

ERNESTO BROWN F. (1)

RESUMEN

Se aborda el problema de determinación de regiones hidrológicamente homogéneas, utilizando el método denominado Cálculo de Estadígrafos. El procedimiento se aplica en la zona comprendida entre las cuencas del río Maipo por el norte y el río Maule por el sur, definiendo tres regiones que pueden considerarse homogéneas desde el punto de vista del volumen de escorrentía directa.

Para cada una de las tres regiones, se derivan ecuaciones de regresión con el fin de estimar el valor medio de la variable en el periodo de interés, y que en consecuencia, servirían para estimar la curva de frecuencias en zonas con escasa o nula información pluviométrica.

- (1) Ingeniero Civil. Profesor e Investigador. Centro de Recursos Hidráulicos, Universidad de Chile.
 (2) Ingeniero Civil. ICC CONIC

1.-INTRODUCCION.

En el diseño de obras hidráulicas, resulta fundamental la estimación del valor de las variables hidrológicas con que dicha obra será proyectada. Frecuentemente, los valores del periodo de retorno para los que se desea estimar el valor de la variable, quedan fuera del rango de las observaciones históricas disponibles o bien, dichas observaciones son escasas o nulas, en consecuencia los valores inferidos pueden ser bastante inciertos. Con el fin de disminuir dichas incertidumbres, se ha planteado (Vargas et al 1988 b) el uso del análisis de frecuencias Bayesiano, para lo cual es necesario contar con información a priori que sea apropiada, la que puede ser de tipo subjetivo, empírico o regionalmente basada. En este trabajo se analiza el uso de un método de regionalización que puede ser usado con dichos fines.

Para ello, en primer lugar se definen regiones hidrológicamente homogéneas, desde el punto de vista del volumen de escorrentía directa originado por una crecida pluvial, seleccionando para dichos fines, de entre los métodos citados en la literatura (Dalrymple, 1960; Kite, 1977) el método de Cálculo de Estadígrafos (Wiltshire, 1985). Luego, en dichas regiones se plantean ecuaciones de regresión que permitan el uso de las curvas de frecuencias regionales, o bien, provean información para realizar el análisis de frecuencias Bayesiano.

La variable seleccionada para efectuar el análisis corresponde al volumen de escorrentía directa, ya que se ha considerado que de las variables que caracterizan una crecida pluvial, es ella la que está más directamente relacionada con los datos hidrometeorológicos que frecuentemente están disponibles (precipitación diaria, duración de la tormenta, temperatura, etc). La zona de aplicación de la metodología abarca desde la cuenca del río Maipo por el norte hasta la del río Maule por el sur.

2.- METODOS DE HOMOGENEIZACION.

Una zona hidrológicamente homogénea queda definida por un conjunto de cuencas hidrográficas con comportamientos hidrológi-

cos similares en alguna o más variables, tomando en cuenta sus características fisiográficas y meteorológicas principales.

Para homogeneizar se usan las técnicas de agrupamiento que se basan en formar subgrupos de n_i unidades, a partir de un grupo original de M unidades, de modo que los elementos de cada subgrupo tengan mayor similitud entre sí que con los de otros subgrupos o entre los elementos del grupo original.

Los métodos existentes para la búsqueda de grupos pueden ser catalogados básicamente en jerárquicos y no jerárquicos. Los primeros se forman por la unión de subgrupos existentes hasta la etapa anterior, en que el aumento o disminución de la fuerza de agrupamiento es monótona al pasar de un nivel a otro; en los últimos, los nuevos grupos se obtienen por agrupamiento o particiones de viejos grupos sin significar un incremento o decrecimiento monótono de la fuerza al pasar de un grupo a otro. El método que aquí se utiliza corresponde al denominado Cálculo de Estadígrafos (Wiltshire, 1985) y se clasifica dentro de este último tipo.

El método consiste en dividir el conjunto total de cuencas en 2 grupos, basándose en el valor de alguna característica cuantificable de las cuencas (área, precipitación media anual, etc). En cada partición se hacen medidas de la variabilidad de los datos con respecto a la curva de frecuencias determinada a partir de todos los puntos pertenecientes a dicho grupo. La secuencia de formar grupos, encontrar la curva de frecuencias y evaluar pruebas estadísticas, es repetida usando varios criterios de división de las cuencas hasta encontrar la óptima partición que corresponderá a aquella que genere los mínimos valores de las pruebas. Al combinar características se obtiene lógicamente, particiones múltiples.

Para cuantificar las diferencias ("distancias") entre la curva ajustada y los datos, se usan 4 estadígrafos; dos de ellos miden la dispersión en la dirección de la variable y los otros la miden en la dirección de la probabilidad, tal como se muestra en la Figura 1. Los estadígrafos que se usan son:

- Método del Cuantil:

$$SSV_5(k) = \sum_{j=1}^{M_k} (v_5(j) - \bar{v}_5(k))^2 \quad (1)$$

en que $v_5(j)$ es el valor de la variable de interés con período de retorno 5 años, en cada una de las M_k estaciones del grupo k y $\bar{v}_5(k)$ es el promedio de dichos valores.

- Método Variable:

$$SSV(k) = \sum_{j=1}^{M_k} \sum_{i=1}^{N(j)} (v(i,j) - \hat{v}(i,j))^2 \quad (2)$$

siendo $v(i,j)$ el valor de la variable de interés en la estación j , $\hat{v}(i,j)$ el correspondiente valor estimado de la curva ajustada al grupo k y $N(j)$ el número de observaciones disponibles en la estación j .

- Prueba de Kolmogorov - Smirnov:

$$KS(k) = \sum_{j=1}^{M_k} D(j) \quad (3)$$

siendo $D(j) = \max\{i/N(j) - Z_i, Z_{i-1}/N(j)\}$ para $i = 1, \dots, N(j)$

$$Z_i = 1 - F(x_i)$$

en que $F(x_i)$ corresponde a la función densidad de frecuencias acumulada, que se ha ajustado a los datos.

- Prueba de Log - Verosimilitud:

Para la función densidad de frecuencias logarítmica normal, ésta se expresa como:

$$LL(k) = - \sum_{j=1}^{M_k} \sum_{i=1}^{N(j)} (\ln(2\pi b) + \ln x_i + (\ln x_i - a)^2 / (2b^2)) \quad (4)$$

siendo a y b los parámetros de la distribución, es decir:

$$a = \frac{\sum_{j=1}^{M_k} \sum_{i=1}^{N(j)} (\ln x_i) / NT}{\sum_{j=1}^{M_k} \sum_{i=1}^{N(j)} (\ln x_i - a)^2 / (NT-1)}$$

en que NT es el número total de observaciones en el grupo.

Cada uno de estos estadígrafos es graficado en función de la variable usada como criterio de separación de grupos, tal como se muestra en el punto siguiente, para seleccionar como división óptima aquella que entregue los mínimos valores de ellos.

3.- APLICACIONES Y RESULTADOS

3.1.- Descripción de la Zona en Estudio.

La zona geográfica seleccionada para el estudio (Fig. 2), forma parte de la denominada Zona Central de Chile, cuya orografía origina una depresión intermedia con un clima claramente continentalizado, en donde se producen fundamentalmente precipitaciones de tipo frontal, a veces distorsionadas por efectos orográficos. La precipitación ocurre preferentemente en invierno y se aprecia un aumento de ésta con la latitud y también variaciones importantes de mar a cordillera. En cuanto a la temperatura, se advierte un decrecimiento general de norte a sur, aunque en la zona costera estas son bastante parejas debido al efecto regulador del océano. En la depresión intermedia, la amplitud térmica anual es mas marcada, especialmente entre invierno y verano: el estío es caluroso y seco mientras que el invierno es frío y lluvioso.

Las características de las estaciones fluviométricas seleccionadas para el estudio, que en general poseen registros desde 1950, se presentan en la Tabla 1 y en la Figura 2 se muestra su ubicación. En la Tabla 2 se indican las características principales de las cuencas que definen dichas estaciones.

3.2.- Análisis de Frecuencias.

En el período comprendido entre los años 1950 y 1982, se detectaron todas las crecidas pluviales ocurridas entre los meses de Abril y Septiembre, y se seleccionaron las mayores crecidas desde el punto de vista de volumen de escorrentía directa. Luego, las series de duración parcial se adimensionalizaron usando el volumen medio de cada una de las muestras y se calculó la probabilidad empírica asociada a cada valor usando la fórmula de Weibull. Para ajustar una función densidad de frecuencias a cada muestra, se utilizó un programa computacional disponible en el Centro de Recursos Hidráulicos (Armas y Vargas, 1987) que se basa en ajustar los parámetros media (μ) y desviación estándar (σ) del modelo probabilístico a través del método de mínimos cuadrados, usando como criterio de ajuste el coeficiente de determinación y la probabilidad posterior (Vargas et al 1988 b).

El análisis de los resultados (Vargas et al, 1988 a) indica como razonable para todas las muestras consideradas, el modelo logarítmico - normal, aunque no necesariamente corresponde al de mejor ajuste. Las curvas ajustadas se presentan en la Tabla 3, en conjunto con la curva regional derivada como se indica a continuación.

Usando las curvas ajustadas se aplicó la metodología descrita en el punto anterior adoptando básicamente 2 variables como criterios de agrupamiento: latitud de la estación y precipitación media sobre la cuenca. En la Tabla 4 se resumen los criterios de agrupación analizados y en la Tabla 5 se presenta los resultados de las pruebas estadísticas, en conjunto con los errores unitarios correspondientes calculados como el valor del estadígrafo dividido por el número de estaciones que quedan incluidas en el criterio primario. En las Figuras 3 y 4 se pueden apreciar los comportamientos de los estadígrafos calculados para los criterios designados por los números 4 y 7.

En la Tabla 5 se observa que, en general, el criterio de la precipitación media anual (criterios 1 y 2) entrega errores unitarios mayores que los que entrega el criterio de separación por latitud (criterios 4 y 6) y por lo tanto se acepta este segundo criterio como mas representativo para la división en zonas hidrológicamente homogéneas, desde el punto de vista del análisis de frecuencias de volúmenes. Sin embargo, el criterio 7 que corresponde a un criterio mixto que considera la latitud y la hoya hidrográfica a la cual pertenece la estación, es indudablemente el que aparece como mas recomendable. De esta forma, se definen 3 regiones homogéneas y al mismo tiempo sus respectivas curvas de frecuencia presentadas en la Tabla 3 y mostradas gráficamente en la Figura 5.

3.3 Regresiones Regionales .

Para usar las curvas de frecuencia regionales, es necesario contar con una estimación del volumen medio de escorrentía directa en la cuenca. Para determinar dicho valor, se determinaron ecuaciones de regresión entre el volumen de escorrentía directa de

una tormenta y características de ella (Precipitación total, P; Índice de Precipitaciones Antecedente, IPA) y de la cuenca (Area, A). El área de la cuenca se consideró variable, aceptando que el valor de 1°C para la temperatura índice (Stowhas y Seguel, 1985) marca la separación entre precipitación líquida y sólida. Para ello, se determinó en primer lugar el valor medio del gradiente de temperaturas existente en cada región cuando ocurre una tormenta (Vargas et al, 1988 a) obteniéndose los siguientes valores en (°C/Km): G1 = -5.68 ; G2 = -4.35 y G3 = -4.04, para las regiones 1, 2 y 3, respectivamente.

El análisis del volumen de escorrentía directa en función de las variables explicativas muestra un comportamiento distinto de la variable a partir de un cierto valor, diferente en cada región, dependiendo del volumen de agua precipitado sobre la cuenca (P·A). Considerando la precipitación total media sobre la cuenca P, en mm, el área A en Km² y el índice de precipitaciones antecedente IPA, definido como la precipitación media acumulada en la cuenca hasta 30 días antes de la tormenta, en mm, se obtienen las siguientes ecuaciones para el volumen en millones de m³:

$$\begin{aligned} \text{- Región 1:} & \quad - P \cdot A < 50 \text{ millones de m}^3 \\ & \quad V = 0.0252 P^{1.0678} \cdot 1.0023^{IPA} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \quad r^2 = .726 ; S_e = 2.82 \\ \text{- P} \cdot \text{A} > 50 \text{ millones de m}^3 \\ & \quad V = 2.63 \cdot 10^{-8} P^{1.99} \cdot 1.002^{IPA} \cdot A^{1.38} + 4.73 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{- Región 2:} & \quad - P \cdot A < 100 \text{ millones de m}^3 \\ & \quad V = 1.17 \cdot 10^{-5} P^{1.577} \cdot 1.0021^{IPA} \cdot A^{.979} + 3.22 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & \quad r^2 = .822 ; S_e = 5.78 \\ \text{- P} \cdot \text{A} > 100 \text{ millones de m}^3 \\ & \quad V = 6.61 \cdot 10^{-8} P^{1.664} \cdot 1.0014^{IPA} \cdot A^{1.5496} + 44.64 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{- Región 3:} & \quad - P \cdot A < 200 \text{ millones de m}^3 \\ & \quad V = 0.0175 \cdot P^{1.203} \cdot 1.00001^{IPA} \cdot A^{.273} + 0.243 \end{aligned} \quad (9)$$

$$r^2 = .739 ; S_e = 22.06$$

- P.A > 200 millones de m³

$$V = 4.6 \cdot 10^{-3} p^{1.21} \cdot 1.00047^{19A} \cdot A^{1.08} + 35.25 \quad (10)$$

$$r' = .800 ; S_e = 54.00$$

Es conveniente hacer notar que el coeficiente de determinación r' que se indica en cada caso muestra el grado de asociación que existe entre el volumen de escorrentía directa observado, V_o , y el correspondiente volumen estimado, V_e , mientras que el error estándar considera los grados de libertad perdidos, p , es decir:

$$r' = 1 - \frac{\sum (V_{oi} - V_{ei})^2}{\sum (V_{oi} - V)^2} \quad (11)$$

$$S_e = \left[\frac{\sum (V_{oi} - V_{ei})^2}{(n - p)} \right]^{1/2} \quad (12)$$

Al usar estas relaciones para derivar los valores medios del volumen de escorrentía directa de una serie de excedencias anuales, se obtienen los resultados que se consignan en la Tabla 6. En ella se aprecia que en 2 de las estaciones el error de estimación es mayor que 30%, lo que globalmente conduce a un error promedio de 20.7% que se considera aceptable.

4.- CONCLUSIONES.

Se ha planteado una metodología de homogeneización, la que aplicada a la variable volumen de escorrentía directa durante tormentas pluviales, en la zona comprendida entre las hoyas hidrográficas del río Maipo por el norte y el río Maule por el sur, dan origen a tres regiones homogéneas y a sus respectivas curvas de frecuencias de la variable adimensional. La dispersión de la curva en la Región 1, se aprecia significativamente mayor que en las otras dos, lo que indica la necesidad de contar con mayor número de cuencas base que permitan definir quizás nuevas particiones. En dichas regiones, se plantean regresiones para obtener el valor de la variable en función de características de la tormenta y de la cuenca, las que usadas adecuadamente, permiten obtener con una precisión razonable el valor medio de los mayores valores de la variable en estudio.

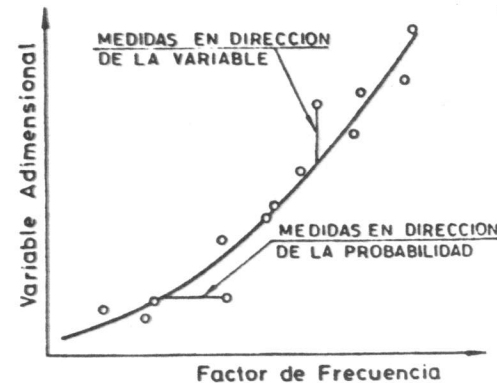
Referencias Bibliográficas

- Armas J.P. y X. Vargas (1987) "Programa REGWAY. Manual de Uso" Centro de Recursos Hidráulicos, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile. CRH 87 - 47 - I
- Kite W. (1977) "Frequency and Risk Analysis in Hydrology" Fort Collins Colorado
- Stowhas L. y R. Seguel (1985) "Estimación de Crecidas de Diseño en Cuencas Mixtas Pluvio-Nivales" VII Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica. Vol 2
- Vargas X., E. Brown y C. Andreani (1988 a) "Uso de Información Regional para la Estimación de Crecidas" Centro de Recursos Hidráulicos, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile. CRH 88-54-I
- Vargas X., E. Brown y J.P. Armas (1988 b) "Regresiones Bayesianas en el Análisis de Frecuencias" Centro de Recursos Hidráulicos, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile. CRH 88 - 51 - I
- Wiltshire (1985) "Grouping Basins for Regional Flood Frequency Analysis" Hydrological Sciences Journal, Vol 30, N°1-3 pp 151-159

Reconocimiento.

Los autores desean agradecer al Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico y al Departamento Técnico de Investigación de la Universidad de Chile, por el financiamiento parcial de este trabajo otorgado a través de los proyectos 89-1008 y 2841-8812, respectivamente

FIG.1 AGRUPAMIENTO NO JERARQUICO
METODO DE CALCULO DE ESTADIGRAFOS



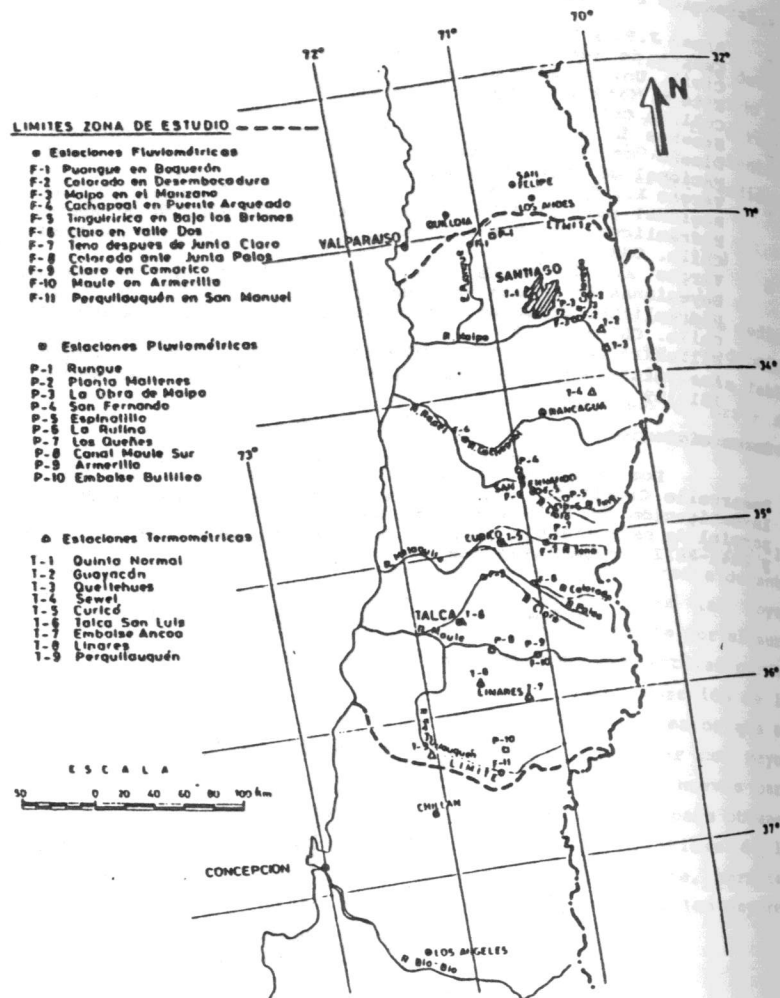


FIG. 2 MAPA DE UBICACION GENERAL

TABLA 1
ESTACIONES FLUVIOMETRICAS

NOMBRE ESTACION	BOYA	LATITUD (°, ')	LONGITUD (°, ')	ALTURA m. s. n. m.	TIPO	AREA TOTAL (Km ²)
E-1: MANQUE EN BOURERON	NAIPO	33.08	71.08	488	LN-LG	149
E-2: COLORADO EN DESEMBOCADURA	NAIPO	33.37	70.22	890	LN-LG	1687
E-3: NAIPO EN EL MANZANO	NAIPO	33.36	70.24	850	LN-LG	4876
E-4: CACHAPOAL EN PUENTE ARQUEADO	BAPEL	34.17	71.21	117	LN-LG	6697
E-5: TENO EN BAJO LOS BRIONES	BAPEL	34.41	70.52	518	LN-LG	1461
E-6: CLARO EN EL VALLE DOS	BAPEL	34.41	70.53	476	LN-LG	367
E-7: TENO DESPUES DE JUNTA CLARO	RAYAQUITO	35.01	70.51	880	LN-LG	1999
E-8: COLORADO ANTES DE JUNTA PALOS	RAYAQUITO	35.16	71.01	600	LG	880
E-9: CLARO EN CAMARICO	MAULE	35.10	71.23	220	LN-LG	747
E-10: MAULE EN ARMERILLO	MAULE	35.42	71.06	450	LN-LG	5475
E-11: PERQUILLAUQUEN EN SAN MANUEL	MAULE	36.25	71.30	293	LG	389

TABLA 3
CURVAS DE FRECUENCIAS REGIONALES Y EN LAS ESTACIONES PARA LA VARIABLE ADIMENSIONAL

T	E-1	E-2	E-3	REG. 1	E-4	E-5	E-6	E-7	E-8	REG. 2	E-9	E-10	E-11	REG. 3
2	0.690	0.716	0.658	0.691	0.805	0.798	0.718	0.963	0.801	0.817	0.854	0.853	0.961	0.889
3	1.051	1.033	1.005	1.031	1.062	1.066	1.000	1.230	1.055	1.084	1.074	1.068	1.125	1.090
4	1.325	1.274	1.278	1.294	1.264	1.258	1.207	1.414	1.235	1.273	1.223	1.214	1.230	1.224
6	1.754	1.639	1.707	1.702	1.504	1.534	1.515	1.673	1.491	1.546	1.431	1.416	1.370	1.408
8	2.089	1.918	2.046	2.021	1.694	1.737	1.746	1.858	1.678	1.746	1.578	1.559	1.466	1.536
10	2.368	2.147	2.330	2.285	1.845	1.900	1.934	2.004	1.827	1.904	1.693	1.671	1.538	1.636
14	2.823	2.515	2.794	2.714	2.079	2.152	2.230	2.227	2.057	2.151	1.868	1.841	1.646	1.786
18	3.191	2.808	3.172	3.060	2.260	2.348	2.463	2.397	2.235	2.342	2.001	1.969	1.726	1.899
22	3.503	3.054	3.493	3.353	2.407	2.509	2.656	2.535	2.380	2.498	2.108	2.073	1.789	1.989
26	3.775	3.266	3.774	3.608	2.533	2.645	2.822	2.651	2.503	2.631	2.199	2.160	1.841	2.065
30	4.017	3.454	4.026	3.804	2.642	2.765	2.969	2.752	2.610	2.747	2.277	2.235	1.886	2.130

TABLA 2: CARACTERISTICAS GENERALES DE LAS CUENCAS

C U E N C A	Qmed (m3/s)	Pmed (mm)	Tmed (°C)	Hmáx (msnm)	Hmed (msnm)
Puangue en Boquerón	0.7	355.6	12.6	2190	904
Colorado en Desemb.	28.0	573.8	5.7	6570	2276
Maipo en El Manzano	102.8	847.9	7.6	6570	1933
Cachapoal en P. Arq.	70.5	615.8	10.5	5100	1089
Ting. en B. Briones	46.2	922.2	6.9	4300	1757
Claro en Valle Dos	11.0	1123.0	9.1	3100	1242
Teno Después J. Claro	56.5	1670.2	6.1	3600	1749
Colorado en J. Palos	44.0	1777.9	6.6	3440	1644
Claro en Camarico	17.4	1337.8	12.9	2700	551
Haule en Armerillo	228.3	1723.7	9.6	3550	1490
Perquillauquén en S.M.	33.6	2233.4	10.1	2180	1062

TABLA 4: CRITERIOS DE AGRUPAMIENTO

NUMERO DEL CRITERIO	CRITERIO PRIMARIO	CRITERIO SECUNDARIO
1	PRECIPITACION	
2	PRECIP. <1200 mm	PRECIPITACION
3	PRECIP. >1200 mm	LATITUD
4	LATITUD	
5	LATITUD > 34°	PRECIPITACION
6	LATITUD > 34°	LATITUD
7	LATITUD > 34°	LATITUD Y CUENCA

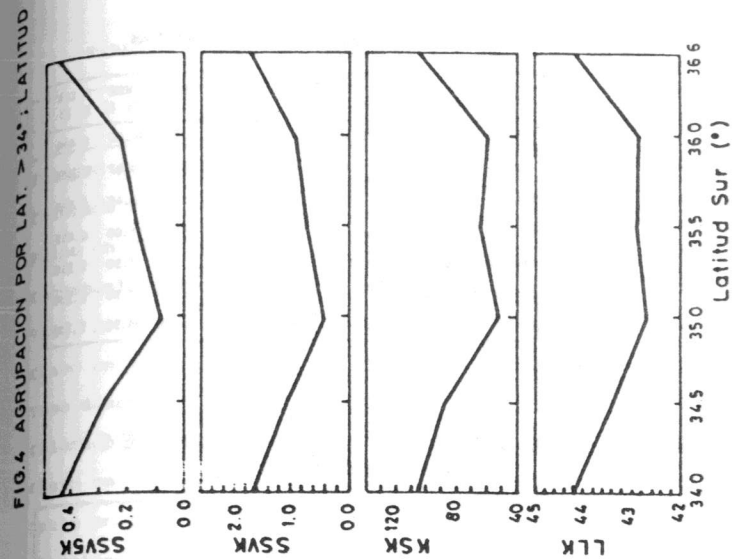
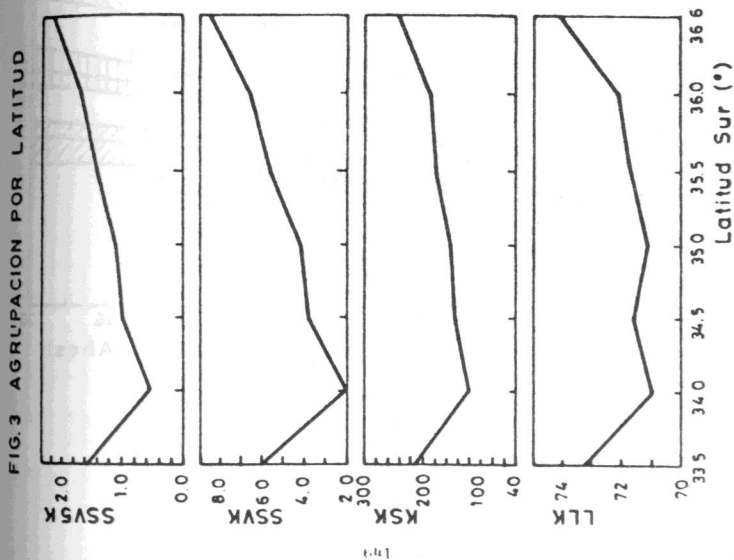


TABLA 5: ERRORES UNITARIOS EN LOS MINIMOS

CRITERIO	PUNTO MINIMO	EST. BAJO CRITERIO	EST. SOBRE CRITERIO	N° DE EST	SSVK	SSVK	ESK	LLK
1	1200 mm	1 a 6	7 a 11	11	0.100	0.391	14.00	4.464
2	600 mm	1 y 2	3 a 6	6	0.097	0.383	11.67	7.833
3	35*75'	7 a 10	11	5	0.024	0.096	8.40	4.580
4	34*00'	1 a 3	4 a 11	11	0.047	0.191	11.00	6.455
5	1800 mm	4 a 10	11	8	0.028	0.113	7.50	5.350
6	35*50'	4 a 9	10 y 11	8	0.020	0.088	7.50	5.350
7	35*30'	4 a 8	9 a 11	8	0.010	0.050	6.50	5.338

FIG.5 CURVAS REGIONALES ZONAS HOMOGENEAS

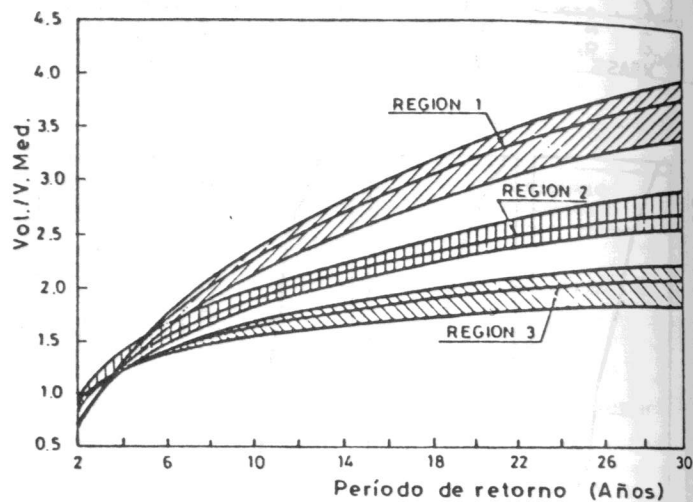


TABLA 6: VOLUMENES MEDIOS OBSERVADOS Y ESTIMADOS

C U E N C A	V obs Millones m3	V est Millones m3	EP %
Puangué en Boquerón	10.4	3.5	66
Colorado en Desemb.	6.6	5.9	11
Maipo en El Manzano	31.7	30.6	4
Cachapoal en P. Arq.	262.6	293.6	12
Ting. B. Briones	48.1	28.8	40
Claro en Valle Dos	31.3	29.0	7
Teno después Jta.	74.6	58.2	22
Colorado J. Palos	49.6	58.7	18
Claro en Camarico	76.9	72.3	6
Maule en Armerillo	302.8	346.2	14
Perquillauquén en S.M.	134.7	96.4	28