

Estimaciones de precipitación en lugares con poca información¹

Iván Vidal P.²
Eduardo Varas³

INTRODUCCION

Debido a la importancia del conocimiento a futuro de la disponibilidad de recursos hídricos, se han desarrollado diversos métodos para su cálculo. Algunos de estos métodos son sofisticados y otros muy simples, pero todos requieren registros, en lo posible, superiores a los 30 años en el lugar del estudio, a causa de la variabilidad de la lluvia en espacio, especialmente en regiones montañosas.

Varios investigadores han estudiado este problema. Algunos (Unwin, 1969; Shaw y Linn, 1972) han querido estimar la precipitación media mensual en función de dos coordenadas. Este tipo de aproximación parece tener éxito en lugares donde no existen efectos orográficos significativos. Otros (Spreen, 1947; Schermerhorn, 1967; Grafton y Dickerson, 1969; Bamberg y Friesen, 1972), han incluido variables de vegetación, topográficas y geográficas. Esta última aproximación parece ser más prometedora y aplicable a una amplia variedad de situaciones.

En un trabajo más reciente, efectuado por Varas y Linsley (1977) en California, se estima la precipitación media estacional, a partir de índices geográficos

y topográficos generalmente disponibles, concluyendo que es posible inferir los montos de precipitación con suficiente precisión, preferentemente en regiones con predominancia de precipitación frontal u orográfica.

El objetivo del presente trabajo es desarrollar un método basado en índices geográficos y topográficos, para estimar la precipitación media anual y media mensual en lugares sin información o con información incompleta, de tal modo de tener una idea clara de su variabilidad expresada en términos de probabilidades.

MATERIALES Y METODOS

Se consideró un área de la zona central de Chile, entre los paralelos 35°40' y 38°00' de lat.S y todo el ancho del territorio chileno, a excepción de la Cordillera de Los Andes. La superficie total que abarca el estudio es 43.000 km².

La Figura 1 corresponde a las estaciones consideradas en el estudio. El período de registro considerado fue desde 1935 a 1970. La información pluviométrica disponible se sometió a un ajuste previo, para establecer su calidad y consistencia, suplementándose las estaciones pluviométricas incompletas. Para tal propósito se utilizaron los métodos de las curvas de doble acumulación y razón de valores normales (Linsley, Kohler y Paulhus, 1967).

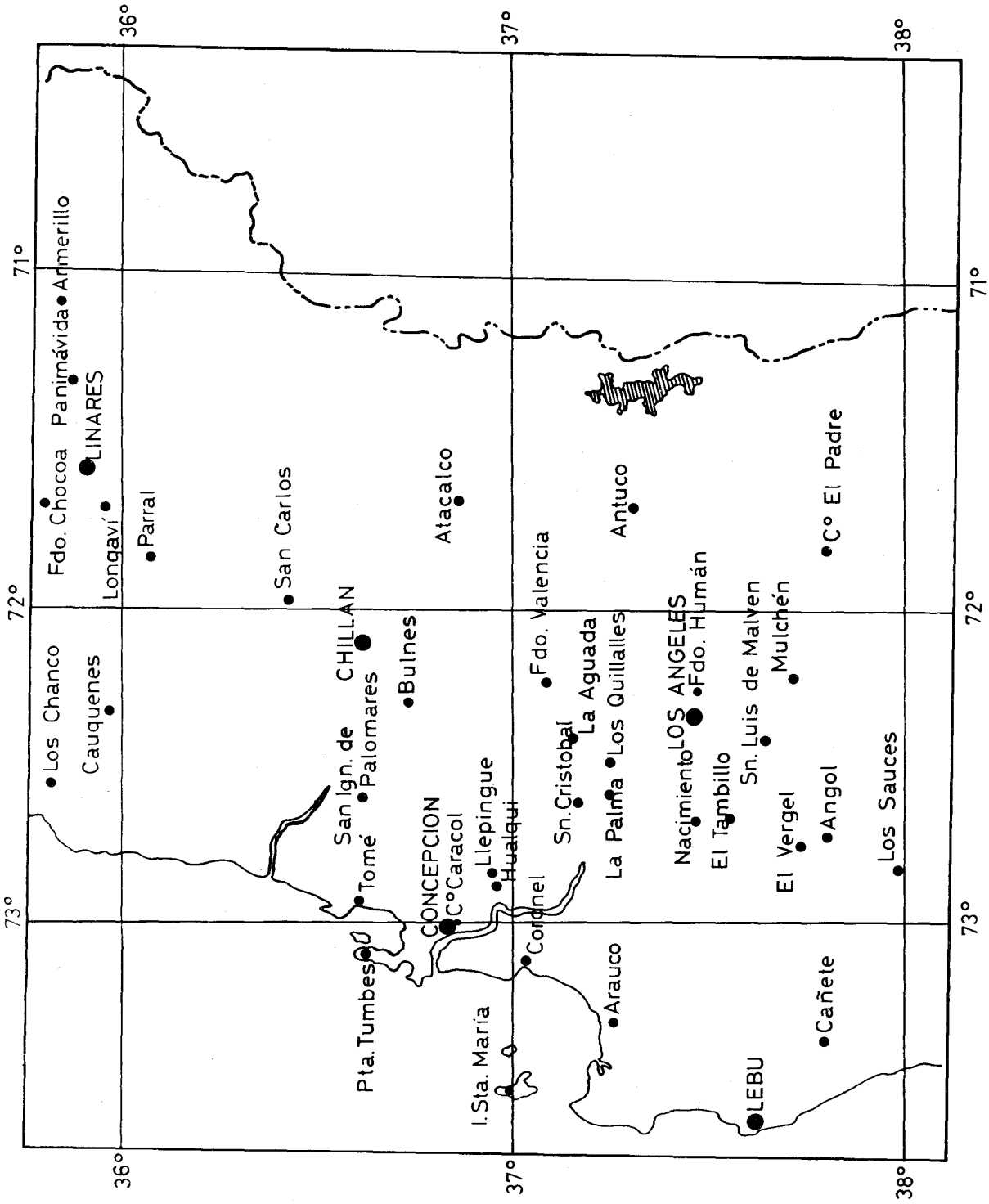
El análisis de curvas de doble acumulación consiste en comparar, para un mismo período, valores acumula-

¹ Recepción de originales : 30 de marzo de 1981.

² Ing. Agr., M.S. Departamento de Agronomía, U. de Concepción, Casilla 537, Chillán, Chile.

³ Ing. Civ., Ph.D., Departamento de Obras Hidráulicas, U.C. de Chile, Casilla 114—D. Santiago, Chile.

Figura 1. Estaciones base.



dos de la precipitación de una estación con valores análogos, es decir, de la misma época y acumulados del promedio de precipitación de varias estaciones vecinas, que se usan como patrón. Para este propósito, se usó el promedio de las estaciones Linares, Chillán, Concepción y Los Angeles, las que se seleccionaron por su longitud de registro, mayor confianza en sus observaciones y porque representan en buena forma el carácter de la precipitación en la región.

La teoría está basada en el hecho de que un gráfico que muestre valores acumulados de una variable versus valores acumulados de otra variable durante el mismo período, determinan una recta cuando las variables son proporcionales, siendo la tangente de la recta la constante de proporcionalidad.

Para analizar la relación entre la precipitación media anual y el conjunto de variables topográficas y geográficas, se realizó una regresión lineal múltiple, desarrollada a partir de un programa de computación. Además, se realizaron regresiones entre la precipitación media mensual y la precipitación media anual, como también entre la precipitación media mensual y el coeficiente de variación respectivo. El modelo que más se ajustó es del tipo $y = ax^b$.

RESULTADOS Y DISCUSION

Las variables se definieron en forma arbitraria, como se detalla a continuación, y sus valores fueron calculados, para cada estación, a partir de un mapa topográfico publicado por el Instituto Geográfico Militar a escala 1:250.000, con la primera curva a nivel de 150 metros y las restantes cada 300 metros.

- Barreras : promedio de las elevaciones máximas en metros, dentro de un radio de 60 kilómetros de la estación, de seis sectores ubicados entre ésta y los siguientes grados, contabilizados en el sentido del reloj y tomando como referencia al norte: 270°–285°, 285°–300°, 300°–315°, 315°–330°, 330°–345° y 345°–360° (Figura 2).
- Altitud local : altura promedio en metros de los 4 puntos ubicados a 8 kilómetros de la estación en la dirección norte, sur, este y oeste (Figura 3).
- Distancia al litoral : distancia en kilómetros desde la estación hasta el litoral en la dirección este–oeste.
- Exposición : sumatoria de aquellos ángulos que no incluyen una barrera efectiva, expresada en grados, dentro de una superficie circular centrada en la estación y de 30 kilómetros de radio (Figura 4). Las

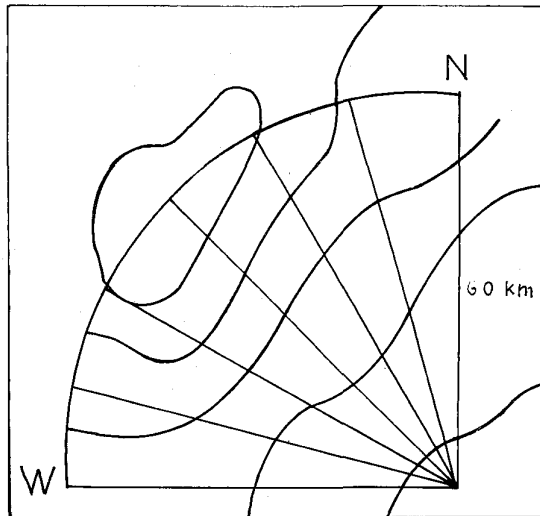


Figura 2. Barreras.

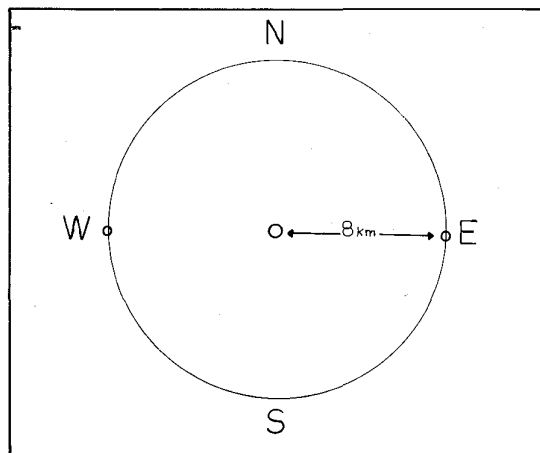


Figura 3. Altitud local.

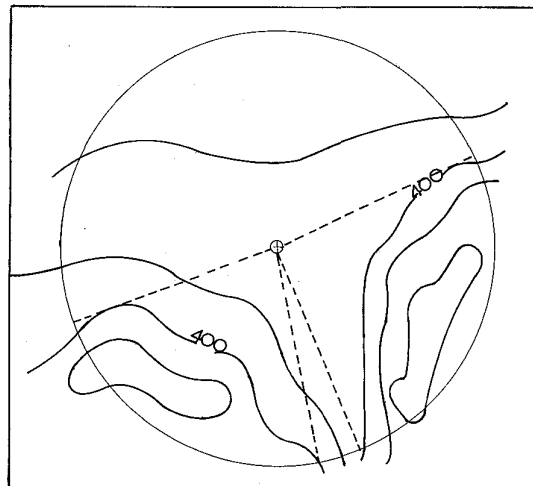


Figura 4. Exposición.

barreras efectivas se definen en forma arbitraria, al igual que las variables, en función de altitud de la estación, de acuerdo al Cuadro 1.

CUADRO 1. BARRERAS EFECTIVAS (m), FIJADAS EN FUNCIÓN DE LA ALTITUD DE CADA ESTACION (m)

Altitud de estación	Barrera efectiva
0 – 50	100
50 – 100	200
100 – 300	400
300 – 500	600
500 – 1.000	1.200

– Exposición local : sumatoria de aquellos ángulos que no incluyen barreras efectivas, dentro de una superficie circular de 8 kilómetros de radio centra da en la estación.

– Pendiente : diferencia entre la elevación de los cuadrantes NE y SO, situados a 8 kilómetros de la estación, expresada en metros por mil. Las elevaciones de cada cuadrante se computan considerando un promedio de siete puntos. Por ejemplo, en el cuadrante NE se promedian los puntos correspondientes a 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° y 90° (Figura 5).

– Orientación : distancia en grados desde el norte hasta la línea central del mayor espacio libre de barrera efectiva dentro de un radio de 30 kilómetros de la estación. Se contabiliza en el sentido del reloj (Figura 6).

Además de estos parámetros, se incluyó la latitud, longitud y altitud de las estaciones, de acuerdo con la Dirección Meteorológica de Chile.

Relación regional para estimar la precipitación media anual

De las relaciones de estimación desarrolladas, se eligió la que se indica a continuación, debido a su mejor ajuste con la precipitación media anual:

$$P = \frac{-47.700 + 1,60 E.L.}{\sqrt{\text{Long} + 66,72 \sqrt{D.L.}}} = 0,56 \text{ Or} + 5.688 - 0,54 B - 6,82 S - 0,77 \text{ Ex}$$

Coefficiente de correlación múltiple : 0,94
 Error estándar del estimador : 132,00
 Valor de F : 28,3**

P = Precipitación media anual (mm)

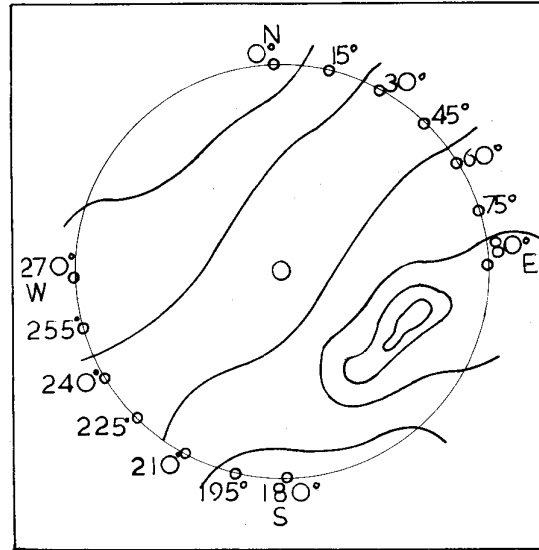


Figura 5. Pendiente.

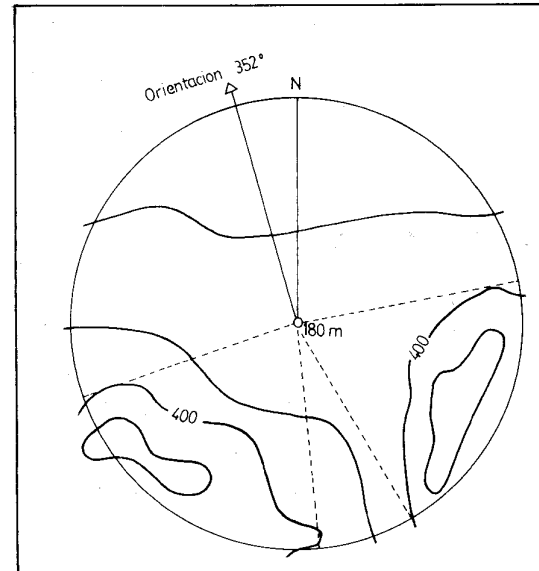


Figura 6. Orientación.

- E.L. = Elevación local (m)
- Or = Orientación (grados)
- Long = Longitud (grados)
- D.L. = Distancia al litoral (km)
- B = Barreras (m)
- S = Pendiente (m/mil)
- Ex = Exposición (grados)

Las variables de mayor incidencia e importancia en la representación de la precipitación media anual son la elevación local, raíz cuadrada de longitud y raíz cuadrada de la distancia al litoral. La latitud, al contrario

de lo que se pensaría, no aportó absolutamente nada al ajuste de la relación, debido posiblemente a que se usó un intervalo reducido de valores y porque las mayores variaciones de precipitación se expresan en esta zona en el sentido transversal, distorsionando, en consecuencia, la influencia de la latitud.

La elevación local es la variable considerada más importante y está en relación directa con la precipitación media anual, debido al enfriamiento de las masas de aire al elevarse, lo que aumenta la condensación de humedad.

La longitud es otro factor importante; la lluvia media anual se incrementa directamente con la raíz cuadrada de ésta. La longitud representa, en cierta forma, la posición en relación al litoral, que es de donde provienen las masas de aire y está relacionada, además, con la mayor parte de las características topográficas, especialmente con la elevación, que sería el factor más relevante. Así también, la distancia al litoral, que es otro parámetro de importancia, se puede considerar como un componente de la longitud, para las condiciones del estudio.

Las barreras son otro parámetro de significación y, a un aumento de éstas, la lluvia se reduce, puesto que son un obstáculo para el desplazamiento de las masas de aire y provocan la remoción de su humedad.

La exposición y pendiente no son de mucha importancia, pero su respectiva inclusión disminuye el error estándar del estimador.

Estimación del promedio y desviación estándar de la precipitación mensual

Utilizando algunos registros mensuales observados, se buscó, dentro de las funciones corrientes (ley normal, ley log-normal y ley Gamma incompleta o Pearson III), cual representaba en mejor forma los datos.

Se empleó el test de Chi-cuadrado para estimar la bondad de ajuste en cada caso. Basándose en dicho test, el mejor ajuste lo presentó la función Gamma incompleta. Esta función es completamente definida por el promedio aritmético y la desviación estándar.

De acuerdo a lo anterior, a partir del promedio de precipitación anual y promedio de precipitación mensual, se estableció un análisis de regresión, considerando información de las 30 estaciones anteriormente señaladas. El mejor ajuste se logró con una relación del tipo $y = ax^b$. Las ecuaciones obtenidas se muestran en el Cuadro 2.

El segundo parámetro requerido por el modelo probabilístico es la desviación estándar de la precipita-

ción mensual. Para su representación se utilizó el coeficiente de variación (CV), que es una variable muy conveniente para tal propósito, puesto que presenta un menor intervalo de variación. Este coeficiente corresponde al cociente entre la desviación estándar y el promedio aritmético.

CUADRO 2. ECUACIONES DE REGRESION ENTRE EL PROMEDIO DE LA PRECIPITACION MENSUAL (P_1, \dots, P_{12}) Y PROMEDIO DE PRECIPITACION ANUAL (P_a)

Mes	Ecuación	r ²
Enero	$P_1 = 4,38 \cdot 10^{-3} P_a^{1,2}$	0,74
Febrero	$P_2 = 1,61 \cdot 10^{-3} P_a^{1,31}$	0,59
Marzo	$P_3 = 0,01 \cdot P_a^{1,13}$	0,70
Abril	$P_4 = 0,05 \cdot P_a^{1,02}$	0,87
Mayo	$P_5 = 0,31 \cdot P_a^{0,91}$	0,93
Junio	$P_6 = 0,43 \cdot P_a^{0,89}$	0,91
Julio	$P_7 = 0,28 \cdot P_a^{0,94}$	0,96
Agosto	$P_8 = 0,10 \cdot P_a^{1,05}$	0,98
Septiembre	$P_9 = 0,09 \cdot P_a^{0,99}$	0,94
Octubre	$P_{10} = 0,01 \cdot P_a^{1,18}$	0,89
Noviembre	$P_{11} = 3,59 \cdot 10^{-3} P_a^{1,32}$	0,85
Diciembre	$P_{12} = 2,20 \cdot 10^{-3} P_a^{1,34}$	0,78

Se desarrolló la siguiente ecuación de regresión entre el CV y el promedio de precipitación mensual (P_m).

$$CV = 3,55 P_m^{-0,35} \quad r^2 = 0,80 \quad (1)$$

Como $CV = s/P_m$; entonces reemplazando en la ecuación (1)

$$s = 3,55 P_m^{0,65} \quad (2)$$

$s =$ desviación estándar de la precipitación mensual.

La ecuación (2) se puede expresar para cada mes en función del promedio de precipitación anual, recurriendo al conjunto de ecuaciones del Cuadro 2.

En el Cuadro 3 se presentan las ecuaciones para estimar la desviación estándar de la lluvia mensual, como función de la precipitación promedio anual.

Aplicación

Se simuló la precipitación media anual, la precipitación media mensual y la desviación estándar de la precipitación mensual de 10 estaciones, no consideradas en el desarrollo de la relación, y se compararon con los registros observados. Los resultados obtenidos

son los que se muestran en los cuadros 4 y 5. Se puede inferir que la representación del promedio de lluvia media anual (estimada con la relación regional) y el conjunto de ecuaciones de regresión son adecuados, especialmente en aquellos meses de mayor pluviometría. El verano, que corresponde a los meses de menor precipitación, coincide con un coeficiente de correlación relativamente bajo; ésto se debe a la alta variabilidad que se presenta en estos meses, magnificada por la ausencia de precipitación en algunos años.

Un análisis de este tipo, entrega un método de estimación para lugares sin datos observados, pero con una coherente información circundante. El resultado es útil en el diseño de redes hidrológicas, mapas de isoyetas, precipitación media sobre una hoya, como también en simulación de caudales. Su valor como técnica de diseño y planificación es de especial importancia en regiones con información escasa.

La aplicación de esta metodología para otras regiones, debe considerar que la relación desarrollada es local y aplicable en la zona central de Chile, entre los paralelos 35°40' y 38°00' de lat. S. No existen evidencias que puedan ser utilizada en otras áreas.

CUADRO 3. RELACION ENTRE LA DESVIACION ESTANDAR DE LA PRECIPITACION MENSUAL (s) Y EL PROMEDIO DE PRECIPITACION ANUAL (P_a)

Mes	Ecuación
Enero	$s = 0,104 P_a 0,78$
Febrero	$s = 0,054 P_a 0,85$
Marzo	$s = 0,178 P_a 0,73$
Abril	$s = 0,506 P_a 0,66$
Mayo	$s = 1,658 P_a 0,59$
Junio	$s = 2,051 P_a 0,58$
Julio	$s = 1,552 P_a 0,61$
Agosto	$s = 0,795 P_a 0,68$
Septiembre	$s = 0,742 P_a 0,64$
Octubre	$s = 0,178 P_a 0,77$
Noviembre	$s = 0,091 P_a 0,86$
Diciembre	$s = 0,066 P_a 0,87$

CUADRO 4. COMPARACION DE LA PRECIPITACION MEDIA ANUAL ESTIMADA Y OBSERVADA EN MILIMETROS

Estación	Observado	Estimado	Diferencia	% Error
Antuco	1.348,6	1.772,2	- 423,6	31,4
Atacalco	2.344,5	2.423,3	- 78,8	3,4
Co. Caracol	1.041,9	1.050,2	- 8,3	0,8
El Vergel	881,6	861,6	- 20,0	2,3
Fdo. Humán	1.187,0	1.215,2	- 28,2	2,4
Hualqui	1.418,2	1.224,1	194,1	13,7
Longaví	932,7	940,0	- 7,3	0,8
Los Quillalles	1.098,2	1.071,0	27,2	2,5
Nacimiento	1.310,7	1.250,2	60,5	4,6
San Luis de Malven	1.247,4	1.312,8	- 65,4	5,2

CUADRO 5. PROMEDIO Y DESVIACION ESTANDAR DE LA PRECIPITACION MENSUAL OBSERVADA Y DE LA PRECIPITACION MENSUAL ESTIMADA (MILIMETROS)

		Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	Mayo	Jun.	Jul.	Ag.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
		Estación Antuco											
Prom	Obs.	41,1	30,9	46,3	93,1	200,6	208,2	211,5	197,5	142,1	64,1	61,6	51,6
	Est.	34,6	29,0	46,9	102,9	280,2	334,7	316,8	257,6	148,0	68,1	69,7	49,6
Desv. Est.	Obs.	49,3	32,8	53,2	116,4	134,4	112,4	126,9	128,4	83,8	43,6	61,6	59,3
	Est.	35,6	31,2	41,9	70,5	136,8	157,1	148,8	128,6	89,0	56,5	56,6	44,2

		Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	Mayo	Jun.	Jul.	Ag.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Estación Atacalco													
Prom	Obs.	43,3	48,5	61,4	147,1	375,8	408,0	387,5	371,8	189,6	127,0	98,7	85,8
	Est.	50,4	43,7	66,7	141,6	372,5	442,2	425,1	357,8	201,7	98,5	105,3	75,4
Desv. Est.	Obs.	61,1	55,8	65,1	98,6	214,2	204,0	193,8	182,2	98,6	87,6	79,9	128,7
	Est.	45,4	40,7	52,6	86,7	164,6	188,3	180,0	159,1	108,7	71,8	74,1	58,1
Estación Cerro Caracol													
Prom	Obs.	19,6	16,7	28,0	70,4	180,5	203,2	182,4	154,2	74,0	51,2	32,4	29,3
	Est.	18,5	14,6	25,9	60,3	174,1	210,1	193,7	148,7	88,2	36,7	34,9	24,6
Desv. Est.	Obs.	25,3	21,7	24,4	57,0	101,1	109,7	96,7	83,3	41,4	34,8	28,2	32,8
	Est.	23,6	20,0	28,6	49,9	100,5	116,0	108,1	90,1	63,7	37,7	36,1	28,1
Estación El Vergel													
Prom	Obs.	16,3	12,9	28,0	47,2	153,9	197,8	157,5	116,3	65,6	39,0	26,4	20,7
	Est.	14,6	11,3	20,7	49,3	145,4	176,2	160,8	120,8	72,5	29,1	26,9	18,9
Desv. Est.	Obs.	24,6	13,4	34,7	41,1	81,6	106,8	88,2	74,4	53,8	34,7	24,3	22,4
	Est.	20,3	16,9	24,7	43,8	89,4	103,4	95,8	78,8	56,1	32,4	30,4	23,6
Estación Fdo. Humán													
Prom	Obs.	33,5	24,8	48,9	84,0	190,8	216,0	184,1	167,0	101,3	58,3	46,0	32,3
	Est.	22,0	17,7	30,6	70,0	198,8	239,2	222,2	173,3	101,9	43,6	42,3	29,9
Desv. Est.	Obs.	40,2	27,8	53,8	79,8	103,0	92,9	106,8	98,5	54,7	44,9	47,4	47,2
	Est.	26,5	22,6	31,8	55,0	109,5	126,2	118,2	99,5	69,9	42,2	40,9	31,9
Estación Hualqui													
Prom	Obs.	23,1	17,4	40,4	85,2	229,2	297,9	259,4	215,6	115,3	60,4	41,8	32,5
	Est.	22,2	17,9	30,8	70,6	200,1	240,8	223,7	174,7	102,6	44,0	42,8	30,2
Desv. Est.	Obs.	33,5	21,4	45,7	72,4	135,2	137,0	129,7	127,2	98,0	44,1	46,4	41,9
	Est.	26,6	22,8	32,0	55,2	110,0	126,7	118,7	100,0	70,2	42,5	41,2	32,1
Estación Longaví													
Prom	Obs.	20,4	13,8	26,3	71,5	153,7	179,8	175,6	138,3	76,0	38,3	20,3	18,7
	Est.	16,2	12,6	22,9	53,9	157,4	190,3	174,5	132,4	79,0	32,2	30,2	21,2
Desv. Est.	Obs.	29,2	26,6	42,1	80,8	96,8	107,9	112,4	83,0	68,4	28,0	24,6	26,4
	Est.	21,7	18,2	26,4	46,4	94,1	108,7	101,0	83,6	59,3	34,7	32,8	25,5
Estación Los Quillalles													
Prom	Obs.	20,9	17,2	32,4	71,2	166,9	227,0	196,0	157,5	89,4	49,5	38,1	32,1
	Est.	18,9	15,0	26,5	61,6	177,2	213,8	197,3	151,8	89,9	37,6	35,8	25,3
Desv. Est.	Obs.	30,7	21,5	40,8	62,7	98,5	140,7	119,6	94,5	83,1	40,1	36,2	38,8
	Est.	24,0	20,3	29,0	50,6	101,7	117,3	109,4	91,3	64,5	38,3	36,7	28,5
Estación Nacimiento													
Prom	Obs.	23,3	18,2	37,4	86,9	229,6	271,1	223,9	193,4	103,2	54,8	41,5	27,4
	Est.	22,8	18,4	31,6	72,1	204,0	245,3	228,2	178,6	104,8	45,1	44,0	31,1
Desv. Est.	Obs.	31,2	20,9	39,3	89,5	158,4	138,3	136,6	114,1	89,8	40,6	47,7	31,0
	Est.	27,1	23,2	32,5	56,0	111,4	128,3	120,2	101,5	71,2	43,2	41,9	32,7
Estación San Luis de Malven													
Prom	Obs.	26,0	24,1	34,1	75,5	214,1	230,0	216,3	181,1	104,8	58,3	48,3	34,8
	Est.	24,2	19,6	33,4	75,8	213,3	256,3	238,9	188,0	110,0	47,8	46,9	33,2
Desv. Est.	Obs.	34,3	26,3	37,5	71,0	122,0	138,0	114,6	112,3	81,7	41,4	59,9	48,4
	Est.	28,1	24,1	33,6	57,8	114,6	132,0	123,9	104,9	73,5	44,8	43,7	34,1

Se desarrolló un método, basado en índices geográficos, para estimar la precipitación media anual, media mensual y desviación estándar, en lugares sin información o con información incompleta.

Se consideró un área de 43.000 km², de la zona central de Chile, entre los paralelos 35°40' y 38°00' de lat. S. Se eligieron 40 estaciones pluviométricas, 30 de

las cuales se usaron para desarrollar el modelo de estimación y 10 para comprobar dicho modelo.

Los resultados indican que la representación de la precipitación media anual, media mensual y desviación estándar de la precipitación mensual, basada en factores geográficos, presenta un buen ajuste en relación a los valores observados.

SUMMARY

Rainfall estimation with scarce local data

A method to estimate the mean annual and monthly rainfall and standard deviation, based on geographical indexes, was developed for localities without or with incomplete weather information.

The area of this study is located in Central Chile, between 35°40' and 38°00' latitude south. Forty

weather stations were selected; thirty were used for the development of the model, and the remainder ten were used to evaluate the model.

The proposed model gave good estimates of the mean annual and monthly rainfall and of the standard deviation for the latter, as compared with the observed values.

LITERATURA CITADA

- BAMBERG, S.A. AND FRIESEN, N.N. 1972. A precipitation estimation technique for developing isohyets in an arid area using vegetation and topographic parameters. *Water Resources Bull. Am. Water Res. Ass.* 8(6): 1108—1119.
- GRAFTON, C.R. AND DICKERSON, W.H. 1969. Influence of topography on rainfall in West Virginia. *Bull. 1, Water Res. Inst., West Virginia Univ., s/p.*
- LINSLEY, R.K., KOHLER, M.A. Y PAULHUS, J.L. 1967. *Hidrología para ingenieros, Primera edición.* Madrid, España, Ediciones Castilla S.A. 350 p.
- SHAW, E. AND LYNN, P.P. 1972. Areal rainfall evaluation using two surface fitting techniques. *Bull. Internac. Ass. of Hydrological Sciences* 17(4): 419—433.
- SCHERMERHORN, V.P. 1967. Topography and annual precipitation. *Water Resour. Res.* 3(3): 707—711.
- SPREEN, W.C. 1947. A determination of the effect of topography on precipitation. *Trans. Am. Geophysical Union* 28: 285—290.
- UNWIN, D.J. 1969. The areal extension of rainfall records: An alternative model. *Journal of Hydrology* 17: 404—414.
- VARAS, E.A. AND LINSLEY, R.K. 1977. Rainfall synthesis with scanty data. *Journal of Hydrology* 34(3/4): 235—251.