

ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO PARA DESCRIBIR LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA PRECIPITACIÓN DE UNA CUENCA PATAGÓNICA

GEOSTATISTICAL ANALYSIS TO DESCRIBE THE SPATIAL DISTRIBUTION OF RAINFALL IN A PATAGONIAN BASIN

José Vargas B.¹, Luis De la Fuente C.¹, Alfonso Gutiérrez-López²,
José Luis Arumi¹

¹ Universidad de Concepción, Chile

² Universidad Autónoma de Querétaro, México

Resumen

En el presente trabajo se analiza el patrón de distribución de las precipitaciones para un periodo hidrológico desde 1980/1981 al 2000/2001 en la cuenca del río Simpson (subcuenca del río Aysén), ubicada en la X Región de Aysén, Patagonia Chilena. Dada las pocas estaciones meteorológicas y la gran variabilidad orográfica de la región, el empleo de las metodologías tradicionales para la estimación de la precipitación por área es poco confiable. Por lo anterior, este trabajo propone utilizar un análisis geoestadístico considerando como variable auxiliar en la estimación de la precipitación: el relieve topográfico de la cuenca. Un Modelo Digital de Terreno (DEM), se combina con el procedimiento geoestadístico del cokriging para modelar la distribución espacial de la precipitación. El procedimiento de regionalización comprende la delimitación de regiones hidrológicamente homogéneas empleando índices de proximidad, algoritmos de agregación y técnicas hiperjerárquicas para la visualización de la clasificación final. Como resultado del análisis se obtuvieron mapas de isoyetas mensuales que siguen en buena forma características del relieve, y a su vez, representan los avances y retrocesos que presentan los sistemas climáticos frontales en el Pacífico Sur de Chile.

Palabras clave: Precipitación, Geoestadística, Kriging, Componentes Principales.

Abstract

In the present paper the distribution of precipitation is analyzed for a hydrological period since 1980/1981 to 2000/2001 in the basin of the Simpson river (sub-basin of the Aysén river), located in the X region of Aysén, at the Chilean Patagonia. Given the few meteorological stations and the great orograph variability of the region, the use of the traditional methodologies for the estimate of the precipitation for this area are not very reliable. For that reason, this work intends to use a geoestatistic analysis considering as auxiliary variable in the estimate of the precipitation: the topographical relief of the basin. A Digital Elevation Model (DEM) is combined with the geoestatistic procedure of the cokriging for modeling the space distribution of the precipitation. The regionalization procedure understands the delimitation of hydrologically homogeneous regions using vicinity indexes, aggregation algorithms and technical hiperhierarchial for the visualization of the final classification. As a result of the analysis, monthly isohyets maps were obtained that follow in good form the characteristic of the relief, besides, they represent the advances and setbacks that present the frontal systems in the South Pacific of Chile.

Keyword: Rainfall, Geostatistics, Kriging, Principal Components

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de la disponibilidad de agua permite el desarrollo de una adecuada gestión y administración de cuencas, tan importante en situaciones de estrés y superávit hídrico, por lo que, se hace necesario estudios de balance hídrico a toda escala: cuenca, región, país o continente, para poder determinar cuánta y cómo se presenta el agua en algún lugar. La gran necesidad de cuantificar adecuadamente el recurso hídrico tiene asociada, a su vez la importancia de determinar la mejor representación de la distribución de la precipitación.

La estimación de la precipitación constituye el componente principal de entrada en el cálculo de disponibilidad hídrica de una región (Aparicio *et al.*, 2006), y es así, que se están desarrollando investigaciones interesantes sobre los recursos de agua de la Patagonia (Vargas y Herrera, 2006). En

América Latina y en especial en regiones en donde no existe una amplia red de estaciones climatológicas o que existen grandes variaciones orográficas; sin duda el cálculo detallado de la precipitación es vital para conformar los componentes de la ecuación de balance hídrico. Este trabajo tiene por objeto estimar la precipitación de una región, considerando como variable auxiliar el relieve topográfico de la cuenca, bajo un marco geoestadístico.

2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.

La cuenca hidrográfica del río Aysén, área de estudio, se sitúa en el sector de contacto entre la zona templada fría chilena y el dominio de la estepa patagónica; entre los 44°45' – 46°15' de latitud Sur y los 71°-73' de longitud Oeste (ilustración 1), inmediatamente al Norte de los Campos de Hielo Norte. Abarca una superficie de 11,456 km² y acoge

más del 70% de la población de la XI región de Aysén, (Chile). La topografía del sector presenta una gran variabilidad de Oeste a Este debido a la presencia de la cordillera de los Andes, pasando desde la costa a la zona central del área de estudio a cotas de aproximadamente 2000 msnm para llegar a zona más oriental de la cuenca con elevaciones aproximadas de 700 msnm. Condiciones similares de variación orográfica se presentan en la costa mexicana del Pacífico o en la región del Sahel africano. En estas regiones la precipitación como fenómeno global, se presenta mediante sistemas frontales que abarcan grandes superficies que avanzan en dirección desde

el océano Pacífico hacia el continente. Además, a una escala local se presenta una variación de la precipitación directamente correlacionada con el relieve topográfico de la zona (Le Barbé y Lebel, 1997; Gutiérrez-López y Onibon, 2005). Si bien, en este estudio los resultados están encaminados a cuantificar detalladamente el balance hídrico en la región; la posibilidad de explicar la distribución espacial de la precipitación en regiones en donde la diferencia de elevaciones es significativa en tan sólo unos kilómetros de separación horizontal, constituye un tema innovador de investigación.

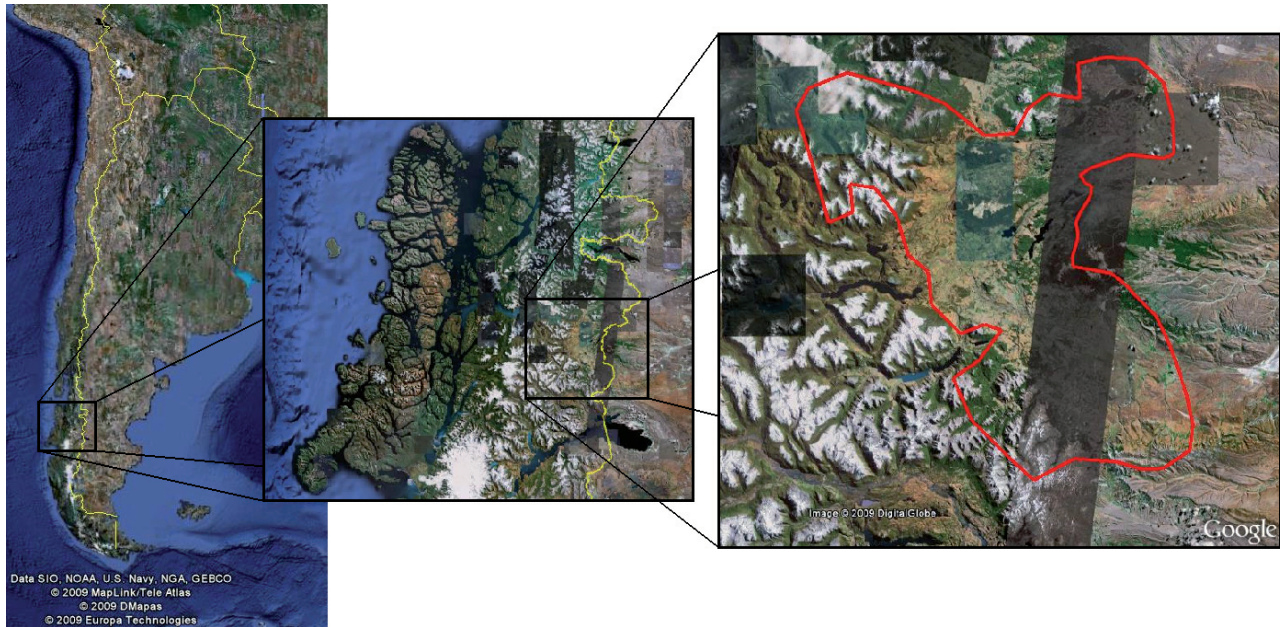


Ilustración 1. Ubicación geográfica de la cuenca en estudio
Fuente: Google Earth

3. METODOLOGÍA

A continuación se presenta la metodología utilizada en este estudio, la cual puede resumirse en los siguientes pasos: (1) relleno y análisis de consistencia de los datos; (2) análisis de componentes principales para la determinación de sectores homogéneos pluviométricamente y un (3) análisis geoestadístico de la precipitación. Una parte importante en este proceso es sin duda el análisis de la calidad de la información. En este aspecto, cuando se requiera, se propone el relleno de los datos faltantes utilizando la información de las estaciones cercanas mediante cocientes normales (CAZALAC, 2004). Se propone este procedimiento, ya que el relieve topográfico es una variable de importancia en esta región. Así la expresión utilizada es la siguiente:

$$P_D = \frac{\bar{P}_D}{3} \cdot \left(\frac{P_A}{\bar{P}_A} + \frac{P_B}{\bar{P}_B} + \frac{P_C}{\bar{P}_C} \right) \quad (1)$$

donde:

$\bar{P}_A, \bar{P}_B, \bar{P}_C, \bar{P}_D$ son los valores normales o promedio de las precipitaciones anuales registradas en los sitios A, B, C, y D durante un período común. P_A, P_B, P_C Precipitaciones en las estaciones A, B y C durante el período que falta en D.

En este proceso puede que se cometan errores al considerar implícitamente que los comportamientos de las estaciones corresponden a sectores homogéneos y a su vez es posible que errores de consistencia en una estación se trasladen hacia las vecinas. Por lo anterior, es importante que una vez que se rellenan los años incompletos, se realice un análisis de consistencia y una verificación de zonas homogéneas.

La metodología para verificar consistencia entre estaciones corresponde al análisis de Doble Masa Acumulada (DMA). Una vez conseguida la serie de datos consistentes y completos, se procede a verificar que las estaciones utilizadas en estos procesos sean las correctas desde el punto de vista de existir una correlación entre ellas, esto es posible de analizar

a través de un análisis de agrupación (*cluster analysis*) que permite definir zonas homogéneas de precipitación. Los procesos de agrupación usados con mayor frecuencia son las agrupaciones jerarquizadas y la agrupación con respecto a los valores medios (*K means*). La primera se puede visualizar como un “árbol de agrupación” en cual la distancia de una hoja (elemento para agrupar) hasta una hoja ramificación del árbol es la iteración donde se fusionan dos grupos. En la agrupación por medias, el resultado es una separación de los elementos en grupos de tal manera que las distancias entre los grupos se maximizan, pero las distancias dentro de los grupos se minimizan (Gutiérrez-López *et al.*, 2004; Ramos y Pelczar, 2006). Dentro de estos procedimientos se requiere una distancia de referencia, la cual se denomina “índice de proximidad”. Una vez definida esta distancia se debe seleccionar bajo que criterio se dirimirá que los objetos están lo suficientemente cerca como para pertenecer a un grupo (regla de agregación).

Utilizando el método de Ward (Ward, 1963) es posible visualizar los grupos generados a través de diagramas jerárquicos. Esta representación permite visualizar claramente el procedimiento desarrollado para la creación de los grupos; en el eje de las abscisas se ven los objetos y en las ordenadas los índices de agrupación. Para una cierta distancia de agregación es posible visualizar la cantidad de grupos formados prolongando horizontalmente esta distancia, el número de grupos es dado por la cantidad de veces que es intersectada esta proyección (Gutiérrez-López *et al.*, 2004).

Si todas las verificaciones anteriores se cumplen es posible asumir que la serie de datos es confiable para la generación de la precipitación distribuida en toda la zona en estudio. Los métodos comúnmente utilizados para esta estimación consisten en ponderar la precipitación de cada estación sobre la cuenca, es decir, por ejemplo al utilizar polígonos de Thiessen se pondera la precipitación de cada estación por un área de influencia, en el caso de inverso de la distancia al cuadrado el factor de ponderación es precisamente este, en el caso de las isoyetas existen superficies de igual precipitación que dan claramente la distribución de la precipitación, sin embargo todos estos métodos presentan más o menos falencias al momento de existir fuertes variaciones de la topografía (Chow *et al.*, 1994; Pizarro, *et al.* 2003), en el mejor de los casos al momento de la generación de las isoyetas manualmente se posee un perfil pluviométrico representativo de la zona el cual generalmente no tiene ninguna validación al respecto. Estas y otras razones llevan al empleo de teorías que permitan representar explícitamente y validadamente el efecto de alguna variable sobre las precipitaciones. La geoestadística, permite salvar estos problemas bajo el uso de algunos supuestos aplicando la teoría de funciones aleatorias al reconocimiento y estimación

de fenómenos naturales (Journel y Huijbregts, 1978; Goovaerts, 1999).

La idea es asociar a cada punto $X(x,y)$ del espacio, una variable aleatoria; para dos puntos diferentes se tendrán dos variables aleatorias $Z(X)$ y $Z(Y)$ diferentes pero no independientes y es precisamente su grado de correlación el encargado de reflejar la continuidad del fenómeno, de modo que el éxito de esta técnica es la determinación de la función de correlación espacial de los datos (Zhang, *et al.*, 1992; Gutiérrez-López y Preciado, 2005). El procedimiento utilizado para correlacionar cada variable con las aledañas es mediante la utilización de un semivariograma experimental y su posterior modelación teórica. El variograma se define como la media aritmética de todos los cuadrados de las diferencias entre pares de valores experimentales separados una distancia h (Journel y Huijbregts, 1978; Lebel y Laborde 1988; Isaaks y Srivastava, 1989; Holawe y Dutter, 1999 y Goovaerts, 2000). La expresión del semivariograma

$$\gamma(h) = \frac{1}{2Np(h)} \sum_{i=1}^{Np(h)} [Z(X_i) - Z(X_i + h)]^2 \quad (2)$$

donde:

- h es el incremento en el espacio del punto X_i
- $Np(h)$ es el número de pares de observaciones a la distancia h
- $Z(X_i)$ son los valores experimentales
- X_i sitio o punto de medición de los valores $Z(X_i)$

Es importante destacar que existen algunos supuestos en el uso de esta técnica como son la estacionaridad y que la variable en estudio presente un comportamiento adecuado de modelar, es decir, que de una observación a otra exista un comportamiento o componente estructural, no debiéndose su variación sólo a efectos aleatorios.

Los datos representan sólo una realización de la función aleatoria, por lo que la estimación del Semivariograma Experimental (SVE) y cruzado no es posible a menos que ciertas simplificaciones sean hechas. Una simplificación asumida es que la esperanza matemática de Z_i y Z_j son estacionarias, esto es: que $E[Z_i(X)] = m_i$ y $E[Z_j(Y)] = m_j$ donde m_i y m_j son constantes en una vecindad circular de puntos a ser estimados. También se asume que los SVE definidos por (2) son estacionarios. Estas dos suposiciones constituyen las hipótesis intrínsecas y que permiten calcular los SVE que pueden ser usados para estimar el semivariograma directo y cruzado para la precipitación y elevación (Hevesi, *et al.*, 1992).

Otro supuesto que debe cumplirse es que los semivariogramas teóricos sean definidos positivos, es decir, que se cumpla la desigualdad de Cauchy-

Schwarz, sin embargo, para satisfacer esta condición es sólo necesario el uso de modelos tradicionales que ya satisfacen esta condición (Journel y Huijbregts, 1978).

Si se consideran válidos los supuestos anteriores, entonces, es posible generar semivariogramas experimentales y su consiguiente modelación matemática. Los modelos matemáticos presentan algunos elementos característicos como son: Efecto pepita (*nugget effect*) que se produce cuando el semivariograma no comienza del origen, la meseta (*sill*) que el valor mayor que alcanza el semivariograma y el alcance (*range*) que corresponde a la distancia a la cual se obtiene la nula variación del semivariograma. Los modelos comúnmente utilizados son: modelo lineal, esférico, exponencial y gaussiano (Isaaks y Srivastava, 1989).

Una vez definido el mejor semivariograma teórico de ajuste, según error cuadrático medio y el coeficiente de correlación cuadrático R^2 , se procede a resolver un sistema de ecuaciones lineales que tiene por fin minimizar la varianza entre valores medidos y estimados cercanos a la estación, y que se posea un sistema insesgado, es decir, que la diferencia entre los puntos medidos y estimados sobre la estación sea exactamente cero. Lo anterior permite interpolar los datos espacialmente, siempre y cuando se posea una adecuada cantidad de datos en el área de estudio, en el caso contrario surgen otros métodos como el kriging con derivada externa o el cokriging que permiten el uso de alguna variable auxiliar para la generación de semivariogramas y/o distribución espacial.

El kriging con derivada externa impone directamente que existe una relación lineal entre la variable en estudio y la variable auxiliar, $Z(w) = m \cdot w + n$ lo cual no necesariamente se da en todos los casos, por esto el cokriging posee una mayor docilidad de correlación, ya que se procede a la generación un semivariograma propio de la variable auxiliar y a un semivariograma cruzado que permite que la relación entre ambas variables pueda ser también relacionada geoestadísticamente. Otro hecho importante a destacar es la posibilidad de que la variación de una medición no sea igual en todas las direcciones, para lo cual los mismos modelos experimentales antes expuestos permiten considerar la posibilidad de dirección de máximo y mínimo cambio, es decir, es posible definir semivariogramas anisotrópicos que consideren direcciones de cambio no necesariamente similares a los ejes cartográficos utilizados (Haberlandt, 2007).

4. RESULTADOS

4.1 Datos: los datos utilizados corresponden a 11 estaciones pluviométricas con información muy dispar en calidad y cantidad de información, lo cual se aprecia en el cuadro 1. El patrón más importante que presenta el sector es su variedad de climas y características topográficas que intervienen fuertemente en la distribución de la precipitación, ilustración 2. La información de topografía fue obtenida de modelos digitales de terreno (DEM) con resolución de una observación cada 1000 metros aproximadamente, sin embargo, por la cantidad de área involucrada (aproximadamente 18,500 km²) se optó por utilizar sólo una muestra de 8000 puntos distribuidos uniformemente en la superficie.

4.2 Preparación de datos: se comenzó por la definición tentativa de dos zonas homogéneas (ilustración 3) para la adecuada complementación de las series de datos. Estas primeras zonas estuvieron compuestas por las siguientes estaciones: Zona 1: Coyhaique Escuela Agrícola, Coyhaique Alto, Ñirehuao, Villa Ortega y Balmaceda; Zona 2: Villa Mañihuales, El Balseo, Puerto Aysén, Puerto Chacabuco, Desagüe Lago Caro y Estero Perdido. El criterio inicial estuvo dado por la disminución abrupta de las máximas alturas en la vertiente oriental de la Cordillera de los Andes. Sin embargo, luego del relleno, análisis de consistencia y posterior verificación de zonas homogéneas, se obtuvo que la estación de Villa Mañihuales no pertenecía a la zona 2, por lo cual fue necesario corregir todo el relleno de las series de datos. Las variables externas a la precipitación utilizadas para la clasificación de zonas homogéneas se muestran en el cuadro 2.

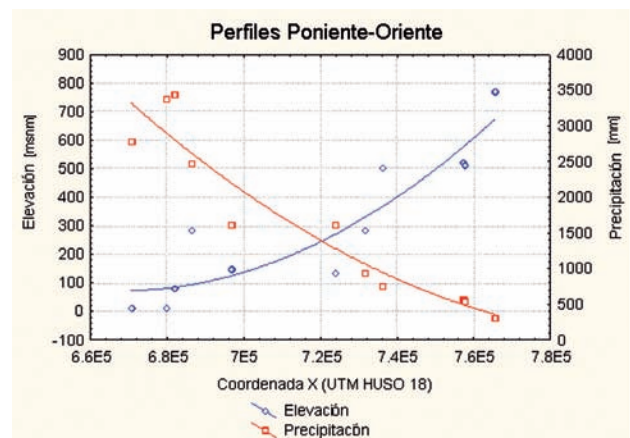


Ilustración 2. Perfiles transversales de precipitación y elevaciones de las estaciones

Cuadro 1. Característica de la información utilizada

Nombre estación Pluviométrica	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00
Coyhaique Escuela Agrícola																					
Coyhaique alto																					
Ñirehuao																					
Villa Ortega																					
Balmaceda																					
Villa Mañihuales																					
El Balseo																					
Pto. Aysén																					
Puerto Chacabuco																					
Lago Caro - Desagüe																					
Estero Perdido																					

Fuente: Dirección General de Aguas (DGA) y ENDESA S.A.

Años completos
 Años incompletos

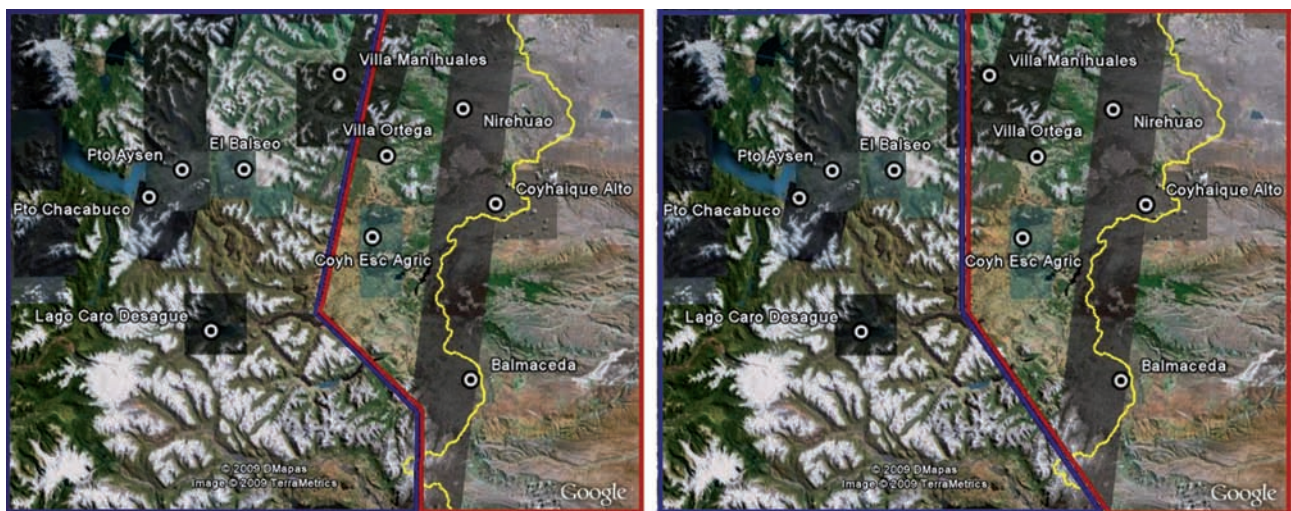


Ilustración 3. Definición preliminar las zonas homogéneas.

Izquierda: zonas tentativas (azul: zona 2, rojo: zona 1) - Derecha: zonas homogéneas definitivas.

Los patrones de cada zona homogénea corresponden a: zona 1: Coyhaique Escuela Agrícola y Villa Ortega. Zona 2: Puerto Chacabuco y El Balseo. Asimismo, se realizó el relleno y análisis de consistencias con las correspondientes correcciones obteniéndose la información resumida en el cuadro 3. La verificación

de las zonas homogéneas se realizó considerando como método de agregación Ward y como índice de proximidad los recomendados por la literatura (Jain y Dubes, 1987), obteniéndose siempre la misma clasificación, por lo que se consideró consistente.

Cuadro 2. Variables externas a la precipitación utilizadas para la clasificación de zonas homogéneas

Abreviación	Descripción de la variable
x	Coordenada x de la estación (Huso 18, metros)
y	Coordenada y de la estación (Huso 18, metros)
COTA	Altura sobre el nivel del mar de la estación (msnm)
SD_PP	Desviación estándar de la precipitación anual (mm)
CV_PP	Coeficiente de variación de la precipitación anual (adim.)
CA_PP	Coeficiente de asimetría de la precipitación anual (adim.)
CU_PP	Curtosis de la precipitación anual (adim.)
HMED	Altura media (área de influencia de 15 Km. x 15 Km., msnm)
DS_HM	Desviación estándar de la elevación (msnm)
CV_HM	Coeficiente de variación de la elevación (adim.)
HREL1D	Altura relativa ponderada del 1 cuadrante (adim.)
HREL2D	Altura relativa ponderada del 2 cuadrante (adim.)
HREL3D	Altura relativa ponderada del 3 cuadrante (adim.)
HREL4D	Altura relativa ponderada del 4 cuadrante (adim.)

De la ilustración 4 es posible observar que existen dos sectores claramente definidos para distancias de agregación superiores a 90,000 y que para distancias un poco menores, la estación de Balmaceda podría ser considerada en otra zona, sin embargo, por la escasa información disponible para la realización de 3 grupos se optó por agrupar en sólo 2. Posterior al relleno y análisis de consistencia se realizó la modelación de isoyetas, para las cuales se utilizó la teoría geoestadística con cokriging considerando como variable auxiliar la elevación obtenida desde el modelo digital de elevación (DEM). El fundamento para ello se basa en el análisis de componentes principales y la correlación que se obtiene entre la precipitación y elevación.

Del análisis de componentes principales (ilustración 5), considerando las mismas variables anteriores, se obtuvo que con el uso de 3 variables es posible conseguir sobre un 85% de la predicción acumulada en los eigenvalores. Las variables seleccionadas corresponden a las más cercanas a los ejes cartesianos, que particularmente son la coordenadas x e y, lo cual demuestra que la ortogonalidad del sistema cartesiano UTM es representativo de las

principales variables en estudio. Además, ambas variables se encuentran cercanas a la cota y al coeficiente de asimetría, respectivamente, lo cual reafirma la directa correlación existente entre la cota y la coordenada x de las estaciones, producto de la no adecuada ubicación de las estaciones pluviométricas para los fines de este trabajo. La asociación del coeficiente de asimetría con la coordenada y, indica que al desplazarse de norte a sur las precipitaciones se encuentran más uniformemente distribuidas hacia el sur. Las alturas relativas que podrían entregar información de alguna dirección preferencial en las precipitaciones de algunos meses, no aportan mayor información de los patrones de precipitación. Para el uso del cokriging se observa la existencia de dos posibles variables auxiliares: la cota y el coeficiente de variación de la altura media en una vecindad dada. En el caso de la primera existe una excelente correlación inversa con la precipitación, además la correlación entre elevación y precipitación es común en la literatura, por lo que se considera, en primera instancia, como el mejor estimador por sobre el coeficiente de variación de la elevación a pesar de su cercanía a las precipitaciones.

Cuadro 3: Resumen de Precipitación Media Mensual por estación y ubicación [mm/año].

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	PP anual	Lat. S	Long. W	Cota [msnm.]
Estero Perdido	335.4	377.7	361.1	310.9	341.8	255.7	237.8	287.2	244.4	284.8	185.3	238.3	3460.4	45 32 30	72 40 00	80
Pto Chacabuco	312.2	365.7	343.8	346.5	304.1	261.9	253.3	245.2	253.3	257.4	207.5	234.0	3385.1	45 28 00	72 49 00	10
Pto Aysén	260.4	323.7	284.3	262.0	241.2	208.0	205.1	205.0	248.2	213.6	154.9	180.1	2786.6	45 24 00	72 42 00	10
Desagüe Lago Caro	283.7	279.5	233.9	236.8	251.9	195.5	161.1	181.6	160.6	176.5	131.7	180.6	2473.5	45 47 45	72 36 07	285
El Balseo	146.5	181.7	190.9	166.4	153.3	130.7	113.1	107.9	125.4	106.9	96.5	101.8	1621.1	45 24 00	72 29 00	150
Villa Mañihuales	150.8	198.7	185.2	180.3	175.4	129.3	97.7	92.3	121.4	90.1	69.2	113.0	1603.2	45 10 00	72 09 00	150
Coyh Esc Agric.	84.5	112.8	126.4	115.8	101.5	68.4	61.2	45.9	61.8	51.0	38.0	70.2	937.5	45 34 00	72 02 00	343
Villa Ortega	68.9	97.9	87.7	84.4	77.0	59.9	55.0	50.1	55.5	40.8	33.1	55.7	766.0	45 22 00	71 59 00	550
Balmaceda	55.4	68.2	59.6	60.5	66.5	42.2	45.9	38.7	41.2	25.0	16.3	44.6	564.0	45 55 00	71 41 00	520
Ñirehuao	51.7	68.7	53.5	63.7	59.5	43.5	30.4	18.3	38.9	35.9	29.2	58.2	551.4	45 15 00	71 43 00	535
Coyhaique Alto	41.9	39.3	26.4	44.3	36.9	16.5	17.6	15.1	23.2	13.3	15.2	29.0	318.8	45 29 00	71 36 00	730

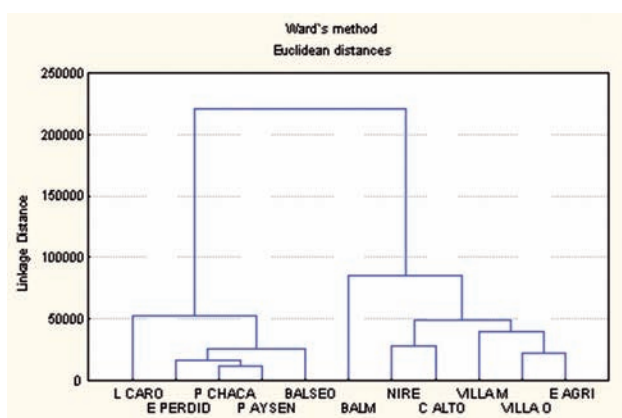


Ilustración.4: Dendrograma de zonas homogéneas

4.3 Análisis Geoestadístico: Dado el análisis realizado sobre zonas homogéneas, el paso lógico sería considerar estas zonas en la distribución de precipitación, sin embargo, a pesar de realizar un cokriging para salvar el problema de escasez de datos, es imperioso considerar todos los datos agrupados para realizar la modelación geoestadística, ya que con 5 o 6 estaciones por sector se impide un adecuado ajuste de los semivariogramas teórico y su consiguiente gran discrepancia o inseguridad al momento de realizar la validación. Por lo cual la información obtenida, se obtuvo considerando semivariogramas isotrópicos privilegiando la cantidad de información.

La normalización utilizada para la variable en estudio (Z) corresponde en todos los casos a transformaciones logarítmicas en base a la expresión (3). El criterio utilizado sobre la constante fue conseguir que la asimetría fuese cero.

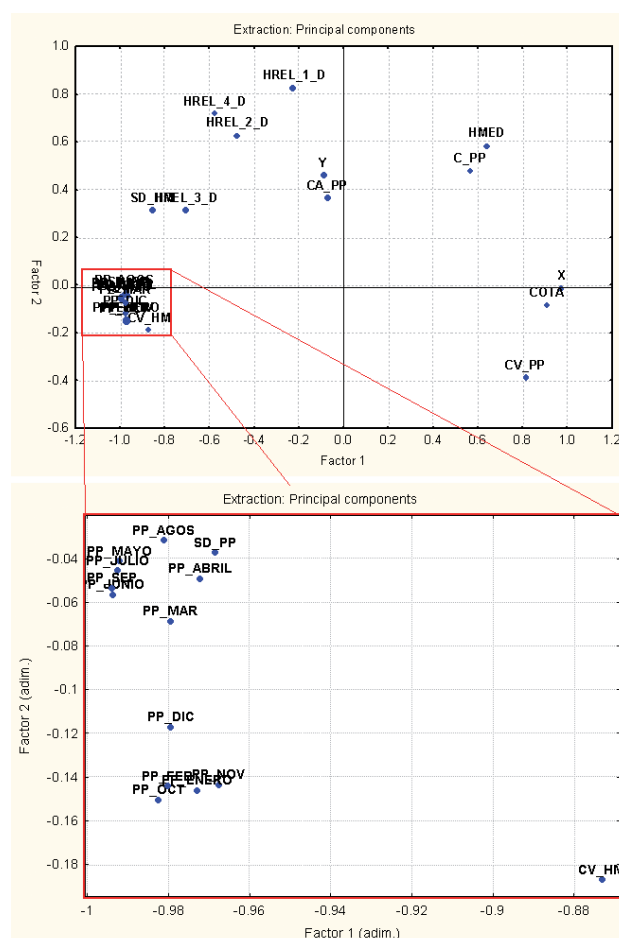


Ilustración 5. Gráfica de componentes principales

$$Z_i = \log(PP_i - a_i) \quad (3)$$

donde:

Z_i variable estandarizada para el mes i.

PP_i precipitación de la estación para el mes i.

a constante del mes i

Para la variable auxiliar la única estandarización realizada corresponde a asignar al valor máximo a uno y al mínimo a cero, solo se utilizó esta, ya que los datos ya presentaban simetría. También en esta etapa se registró el coeficiente de correlación cuadrático (R^2) para cada mes entre la precipitación media y la elevación de cada estación, que en el peor de los casos no es menor a 0.776 en el mes de abril (cuadro 4). Se elaboraron los semivariogramas experimentales (SVE) y sus ajustes para cada variable, en las precipitaciones todos los SVE corresponden a modelos gaussianos con correlaciones sobre 0.88 (ilustración 6).

El ajuste del SVE de la elevación corresponde a un modelo isotrópico exponencial de correlación superior a 0.99 (ilustración 7) y el SVE cruzado también corresponde a un modelo isotrópico gaussiano para todos los meses (ilustración 8), además, es coherente con la correlación inversa encontrada en el análisis de componentes principales.

Posterior al cokriging es necesario realizar una validación cruzada para encontrar la mejor configuración de opciones que minimicen el error. Los criterios utilizados corresponden al de maximizar el R^2 , que la pendiente de la recta entre valores simulados y reales fuera lo más cercana a uno y que el valor de intersección de esta recta fuera lo más cercana a cero. Toda esta información es representada en los gráficos característicos de la validación cruzada (ilustración 9) y se encuentra resumida en el cuadro 4. Además el SVE de elevación no se consideró anisotrópico, porque al suponer que la elevación presentaba una anisotropía, ésta era transmitida a las precipitaciones. Esta transmisión no se consideró adecuada, ya que la anisotropía de la precipitación, de existir, no tiene porque ser concordante con la elevación, más aún en esta zona, dado que la anisotropía presente en la elevación tiene orígenes en periodos glaciares, que no tienen ninguna relación con la dirección de los sistemas frontales.

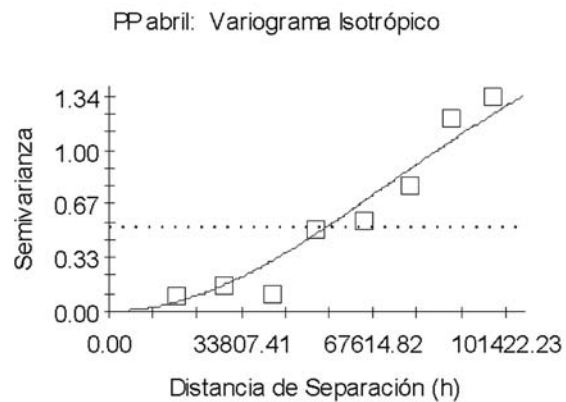


Ilustración 6. Semivariograma del mes de abril.

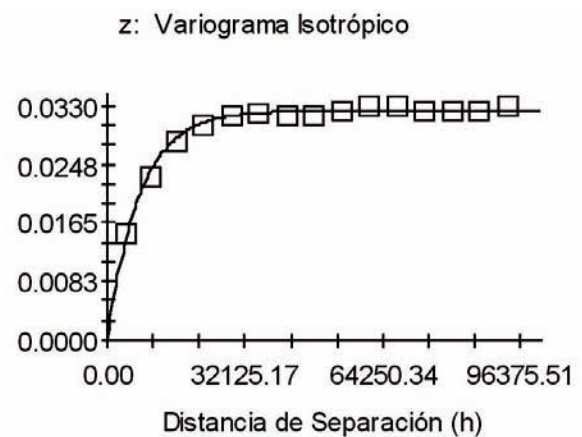


Ilustración 7. Semivariograma de elevación.

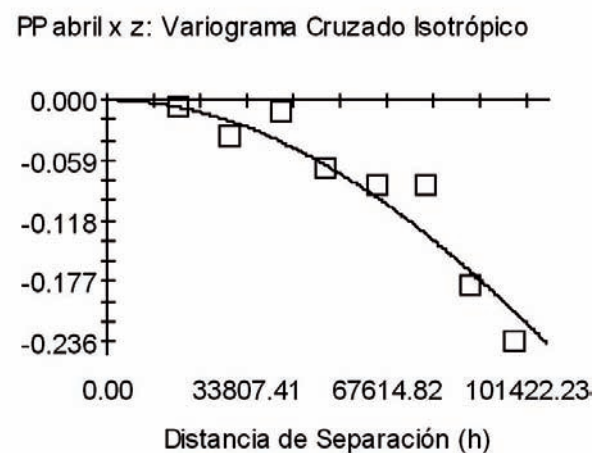


Ilustración 8. Semivariograma cruzado del mes de abril.

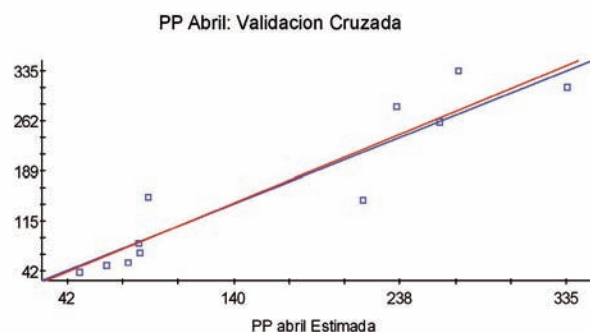


Ilustración 9. Validación cruzada de 1 mes de abril. (mm/mes)

5. DISCUSIÓN

Por la escasez de datos meteorológicos en una zona tan variada como la Patagonia, se observa claramente que se debe realizar un esfuerzo en el análisis de los pocos datos disponibles para conseguir resultados satisfactorios, por ello se realizaron numerosas pruebas (análisis de consistencia, zonas homogéneas por dendogramas y K-media, y análisis de componentes principales) que permitieron poder realizar la distribución espacial de la precipitación.

Del análisis realizado se tiene que los gradientes pluviométricos de la cuenca del río Aysén presentan un comportamiento distinto del esperado, lo tradicional en el Pacífico Sur es que frente a un aumento de cota la precipitación aumente, sin embargo, en esta zona este fenómeno no es el más importante en la pluviometría, como se aprecia en la ilustración 10, la precipitación tiende a disminuir al aumentar la cota de la estación, lo cual es capturado por las isoyetas generadas. Este fenómeno se debe a la forma como se desarrolla la precipitación en el Pacífico Sur, los cuales ingresan en una dirección aproximada de Oeste a Este.

En la zona de la Patagonia chilena, los frentes descargan gran parte de su volumen de agua precipitable antes de llegar a las zonas de máxima elevación, lo que se refleja en la ilustración 10.

A su vez, como las estaciones se ubican en zonas bajas (urbanas) de cada sector, las cotas de estas reflejan principalmente un aumento paulatino de Oeste a Este, lo que unido a lo antes expuesto, se complementan para generar el perfil de la ilustración 10. Sin embargo, de la misma ilustración, se aprecia una dispersión considerable, lo que se atribuye a un aumento de precipitación con la elevación pero a una escala más local, efecto sombra por la gran cantidad de cañones que presenta la topografía, direcciones

preferenciales del ingreso de los sistemas frontales, entre otros. A pesar de lo anterior, el análisis geoestadístico representa adecuadamente la precipitación global en esta zona (ilustración 11).

Al analizar las isoyetas obtenidas se aprecia una concordancia con lo esperado, existe una zona con precipitaciones muy concentradas durante todo el año que corresponde a la zona de Puerto Aysén y Puerto Chacabuco (Oeste), en la zona donde comienza la zona estepárica (Este) Coyhaique Alto y Balmaceda, las precipitaciones no superan los 50 mm/mes durante todo el año. En los meses más lluviosos se aprecia que existe una incursión de la precipitación de Oeste a Este, con la consiguiente mayor irregularidad de ésta en la zona intermedia. También se aprecia que la isoyetas en la mayoría de los meses sigue la topografía del sector, acercándose al Este en la parte superior e inferior.

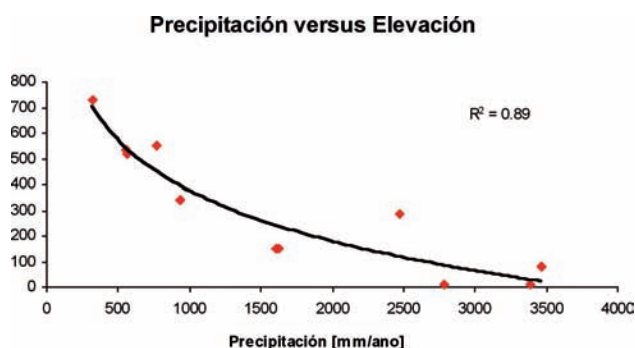


Ilustración 10. Perfil pluviométrico anual en la zona en estudio.

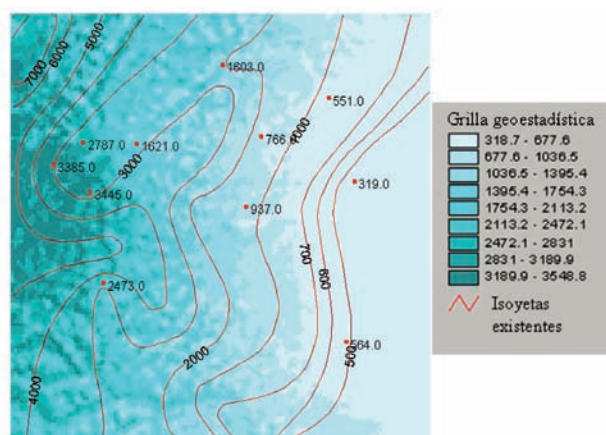


Ilustración 11. Comparación entre grilla de análisis geoestadístico e isoyetas existentes (mm/año).

Cuadro 4. Resumen de variables y estadígrafos del proceso de modelación geostatístico.

	ABRIL	MAY0	JUNIO	JULIO	AGOS	SEPT	OCT	NOV	DIC	ENERO	FEB	MARZO	
Constante de desfase (PP)	9	107	227	86	69	100	36	25	32	18	16	19	
Valores entre 0-1 (Z)	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si	
R ² PP v/s Z2	0.776	0.875	0.886	0.822	0.807	0.8	0.799	0.768	0.873	0.815	0.805	0.813	
Tipo	Gauss	Gauss	Gauss	Gauss	Gauss	Gauss	Gauss	Gauss	Gauss	Gauss	Gauss	Gauss	SVE PP
Incremento <i>h</i> (m)	11758	11758	11758	11758	11758	11758	11758	11758	11758	11758	11758	11759	
Nugget Effect (m)	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	
Sill (mm ²)	2.011	2.011	2.011	2.011	1.997	2.011	2.011	2.011	2.011	2.011	2.011	2.011	
Range (m)	174937	324413	491902	324759	302589	352299	230362	175976	203862	153286	166450	230535	
Residual SS	0.101	0.0145	0.00255	0.0183	0.0168	0.0108	0.0423	0.088	0.0991	0.406	0.331	0.0887	
R ²	0.948	0.94	0.949	0.931	0.937	0.94	0.947	0.945	0.922	0.88	0.892	0.892	
Tipo	Iso-Exp	Iso-Exp	Iso-Exp	Iso-Exp	Iso-Exp	Iso-Exp	Iso-Exp	Iso-Exp	Iso-Exp	Iso-Exp	Iso-Exp	Iso-Exp	SVE Elevación
Incremento <i>h</i> (m)	6425	6425	6425	6425	6425	6425	6425	6425	6425	6425	6425	6425	
Nugget Effect (m)	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	
Sill (mm ²)	0.0324	0.0324	0.0324	0.0324	0.0324	0.0324	0.0324	0.0324	0.0324	0.0324	0.0324	0.0324	
Range (m)	24300	24300	22800	22800	22800	22800	22800	22800	22800	22800	22800	22800	
Residual SS	9.3E-07	9.3E-07	4.1E-06	4.1E-06	4.1E-06	4.1E-06	4.1E-06	4.1E-06	4.1E-06	4.1E-06	4.1E-06	4.1E-06	
R ²	0.993	0.993	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	
Tipo	Gauss	Gauss	Gauss	Gauss	Gauss	Gauss	Gauss	Gauss	Gauss	Gauss	Gauss	Gauss	SVE Cruzado
Incremento <i>h</i> (m)	11758	11758	11759	11759	11759	11759	11760	11760	11760	11760	11760	11760	
Nugget Effect (m)	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	
Sill (mm ²)	-1.335	-0.886	-0.601	-0.922	-0.838	-0.826	-1.11	-1.197	-1.262	-1.683	-2.011	-1.287	
Range (m)	415518	434051	433185	443450	410149	435610	417770	394041	421234	440806	500562	452931	
Residual SS	4.5E-03	2.0E-03	8.5E-04	2.5E-03	2.1E-03	1.8E-03	3.2E-03	3.4E-03	4.1E-03	7.6E-03	6.9E-03	4.8E-03	
R ²	0.91	0.896	0.899	0.887	0.895	0.89	0.904	0.929	0.899	0.885	0.888	0.865	
Neighborhood	9	9	10	8	9	9	10	11	9	9	10	9	Co-kg.
Radio (m)	101422	101422	101422	101422	101422	101422	101422	101422	101422	101422	101422	101422	
Coefficiente Regresión	1.032	0.982	0.93	0.966	0.942	0.955	0.999	0.972	1.026	1.009	1.039	1.003	Validación Cruzada
Error Estándar SE	0.13	0.113	0.111	0.099	0.125	0.083	0.09	0.134	0.11	0.124	0.069	0.123	
R ²	0.875	0.893	0.886	0.914	0.863	0.937	0.932	0.853	0.906	0.881	0.962	0.882	
Intercepción eje (mm)	-2.79	-5.71	-3.69	-5.73	1.11	-5.08	-3.77	0.47	-4.08	-1.54	-4.32	-2.71	

PP: Precipitación. Z: Elevación

Al realizar el contraste con las isoyetas existentes (DGA, 1987), se aprecia concordancia en la orientación en algunas zonas periféricas, sin embargo, en la zona central de la ilustración 11 no existe información que avale la curvatura en las isoyetas existentes, por lo cual, la grilla obtenida distribuye la precipitación siguiendo los patrones de las zonas aledañas. Además, las isolíneas de precipitación se encuentran fuertemente influenciadas por la ubicación de las estaciones meteorológicas que fuerzan el trazado de las isoyetas. El aporte de precipitación a cada zona homogénea se encuentra en el cuadro 5, donde se aprecia una diferencia relevante en los aportes de agua para cada periodo en estudio. Las posibles razones de tales diferencias son: la sobreestimación de las isoyetas de 1960 - 1980 producto de la calidad y cantidad de los datos y de las técnicas de estimación existentes a la fecha, la subestimación de las grillas a causa de la no incorporación de la variabilidad local, posibles cambios climáticos que hayan disminuido las precipitaciones entre los dos periodos o una composición de las anteriores.

Cuadro 5. Precipitación media anual por zona homogénea y por periodo (mm/año).

	DGA (1960- 1980)	Grilla (1980-2000)	% Área
Zona 1	3512	2151	49.2%
Zona 2	1051	693	50.8%
Total	2262	1414	100.0%

6. CONCLUSIÓN

Las isoyetas obtenidas representan de mejor forma la pluviometría de la zona, Ilustración 11, por sobre antiguas isoyetas (DGA, 1987) que se obtuvieron prácticamente interpolando linealmente entre estaciones y se ajustaron de tal forma que el balance hídrico cerrara completamente, sin considerar que al realizar esto, se está asumiendo que no existe un error de cierre y que la evapotranspiración, la variable más incierta del balance, se ha obtenido adecuadamente.

En cuanto al análisis geoestadístico, se concluye que es una poderosa herramienta de distribución espacial, sin embargo, como cualquier otra depende de la calidad y cantidad de la información, ya que dada las pocas estaciones utilizadas, las grillas de precipitación sólo capturan la precipitación global de la zona, es decir, el principal efecto que se aprecia en estas, es la disminución de las precipitaciones de Oeste a Este, reduciendo el efecto de la elevación sobre las grillas. El efecto práctico de tal situación es que estas no son capaces de representar la precipitación local, punto a punto, es decir, frente a

un aumento abrupto de elevación en dirección norte sur, la modelación geoestadística tiende a disminuir la precipitación y no a aumentarla, producto de que contrario a las precipitaciones, las elevaciones de las estaciones pluviométricas presentan un aumento paulatino de Oeste a Este, no siendo coincidente con la tendencia de las elevaciones del terreno, fruto de que ellas siempre se ubican en sectores bajos y cercanos a centros urbanos. Esta falencia de la modelación de la precipitación puede ser solucionada con la incorporación de más estaciones en las zonas altas de la cordillera de los Andes o considerando alguna otra variable auxiliar que no presente una correlación tan directa con la coordenada x de cada estación. A pesar de todo lo anterior, las grillas si representan la precipitación global y por lo tanto, son más adecuadas que las existentes para la mejor estimación de un balance hídrico. En conclusión, el gradiente pluviométrico en esta zona se comporta inverso a la elevación, que se comprueba al observar los resultados del análisis de componentes principales.

La modificación en el patrón de las isoyetas representa en términos de volumen de agua, para efectos del balance hídrico un 74.8% en la zona 1 y un 24.9% en la zona 2, con una productividad de precipitación de 3 a 1, similar a lo obtenido considerando las isoyetas de 1987, por lo que la distribución no influye sustancialmente en la precipitación, producto que el principal patrón está dado por el gradiente de Oeste a Este y no por la influencia de la topografía. La principal situación que se aprecia (cuadro 5), es la disminución de la cantidad de agua en toda la zona.

Los variogramas de precipitación que resultan de este análisis indican que existe una tendencia a abordar solo una parte del fenómeno de precipitación, debido a que los parámetros del variograma gaussiano muestran un alcance (cuadro 4) de éste muy superior a la longitud del área en estudio. Más aún, este parámetro aumenta en los meses de mayor precipitación, producto de la mayor magnitud de los sistemas frontales. En conclusión, la no estabilización de los variogramas indica que estos solo tienen una validez local y se hace necesario la utilización de mayor cantidad de datos y una mucha mayor área en estudio para obtener un conocimiento completo de los patrones de precipitación.

Una futura aplicación disponible corresponde a análisis geoestadístico de la evapotranspiración, para lo cual sería necesario contar con una cantidad satisfactoria de datos de evaporación de bandeja o estaciones de meteorológicas que permitan estimar la evaporación potencial. Bajo la estimación de esta última forma es clara la posibilidad de realizar una distribución utilizando como variable auxiliar la elevación, no obstante es necesario tener presente que su aplicación es recomendada en situaciones en que la evaporación predominante se deba producto de la radiación y no al efecto del viento.

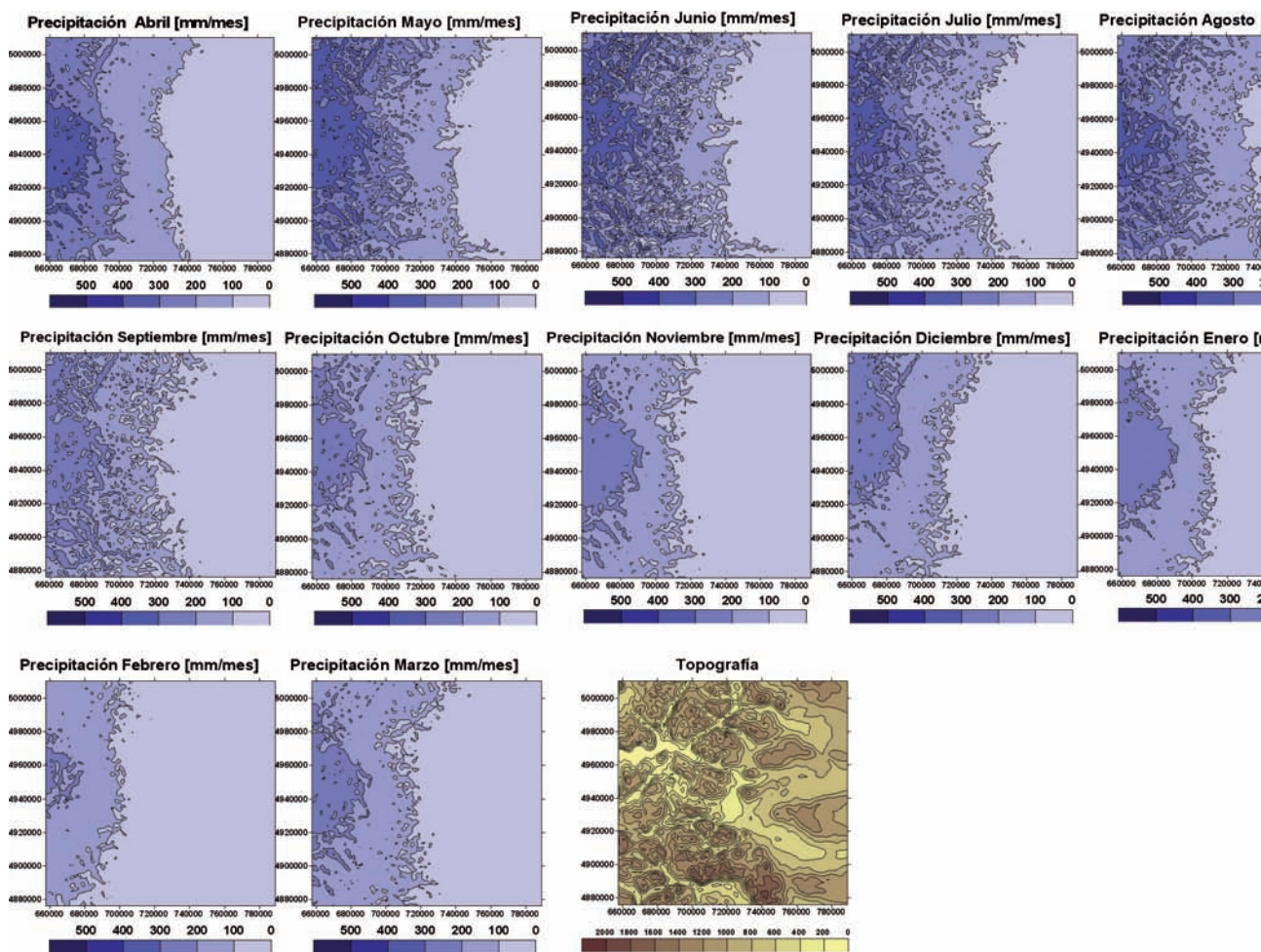


Ilustración 12. Isoyetas mensuales de la zona de estudio, estimadas por un procedimiento geoestadístico

En conclusión, el perfeccionamiento de los métodos que cuantifican los recursos hídricos permitirán gestionar adecuadamente la toma de decisiones y por consiguiente tener un mejor uso de este recurso.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la participación en el proyecto Fondecyt (Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico) N° 1050576 "Efectos geológicos y ambientales de la dinámica geomorfológica e hidrológica de la hoya del río Aysén". También es importante agradecer a la fuente de información, Dirección General de Agua, Chile (DGA).

REFERENCIAS

Aparicio J., Lafragua J., Gutiérrez-López A., Mejía R. y Aguilar E. (2006) "Evaluación de los recursos hídricos. Elaboración del balance hídrico integrado por cuencas hidrográficas". Programa Hidrológico Internacional (PHI)-LAC Documento técnico del PHI-LAC, No.4

CAZALAC (2004) "Guía Metodológicas para la elaboración del mapa de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas de América Latina y el Caribe".

Chow, V., D. Maidment y Mays, L. (1994). "Hidrología Aplicada". Editorial Mc Graw-Hill. Bogotá, Colombia.

DGA, (1987) Balance Hídrico de Chile. Dirección General de Aguas. Ministerio de Obras Públicas. Chile.

Goovaerts, P., (2000) Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall, Journal of Hydrology, Vol. 228 (1-2) pp. 113-129.

Goovaerts, P., (1999). "Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives". Geoderma 89, pp. 1-45.

Gutiérrez-López A. y Onibon H., (2005) "Comparative hydrological drought-flood risk modeling at Northern Mexico and West African Sahel Region" International Seminar. Climatic and Anthropogenic Impacts on the Variability of Water Resources. UMR HydroSciences Montpellier / UNESCO / OMM Montpellier, France

Gutiérrez-López A., Lebel, T., y Descroix, L., (2004) "Reflexiones sobre el concepto de cuencas

hidrológicamente homogéneas” International Association for Hydraulic Research (IAHR) XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica. São Pedro, Brasil

Gutiérrez-López A., y Preciado M. (2005) A geostatistical approach for rainfall patterns, using proximity indices. En Renard Ph., Demougeot-Renard H., and Froidevaux R. *Geostatistics for environmental applications* Springer, Editions Berlin-Heidelberg-New York.

Haberlandt U., (2007) Geostatistical interpolation of hourly precipitation from rain gauges and radar for a large-scale extreme rainfall event. *Journal of Hydrology*, Vol. 332, pp. 144-157

Hevesi, J.A., Flint, A.L., Istok, J.D., (1992). “Precipitation estimation in mountainous terrain using multivariate geostatistics. Part II: Isohyetal maps”. *J. Appl. Meteor.* 31, pp. 677–688.

Holawe, F. y Dutter, R., (1999) Geostatistical study of precipitation series in Austria: time and space, *Journal of Hydrology*, Vol. 219 (1-2) pp. 70-82.

Isaaks, E., H., y Srivastava, R. Mohan (1989) *An introduction to Applied Geostatistics*, Oxford University Press, New York, 561p

Jain, A. K. y Dubes, R. C. (1987) *Algorithms for clustering data*, Prentice Hall.

Journel, A. G. y Huijbregts, C. J., (1978), “Mining Geostatistics”, Academic Press, New York, 600 p.

Le Barbé, L. y Lebel, T., (1997) Rainfall climatology of the HAPEX-Sahel region during the years 1950-1990, *Journal of Hydrology*, Vol.s 188-189, (1-4) pp. 43-73.

Lebel, T. y Laborde, J. (1988) A geostatistical approach for areal rainfall statistics assessment. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*. 2, pp. 245-261.

Pizarro, R.; Ramírez C y Flores J. (2003) “Análisis comparativo de cinco métodos para la estimación de precipitaciones areales anuales en períodos extremos”. *BOSQUE* 24(3): pp 31-38.

Ramos, J y Pelczar I, (2006). I. “Aplicación del análisis de agrupaciones por K-medias en una cuenca hidrológica para generar zonas climatológicamente homogéneas”. XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. International Association for Hydraulic Research (IAHR), Guayana, Venezuela.

Vargas, J y Herrera C. (2006). “Balance hídrico de cuenca nivo-glacial-pluvial en la Patagonia. Aplicación a cuenca del río Blanco – Chile”. XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. International Association for Hydraulic Research (IAHR), Guayana, Venezuela.

Ward, J. H. (1963). “Hierarchical grouping to optimize an objective function”. *Journal of the American Statistical Association*, 58, pp. 236.

Zhang, R., Myers, D. E. y Warrick, A. W., (1992), “Estimation of the Spatial Distribution of Soil Chemical Using Pseudo Cross-Variograms” , *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 56, No. 5, pp.1444-1452.

DIRECCIÓN INSTITUCIONAL DE LOS AUTORES

José Vargas B.

Profesor Asociado,
Departamento de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de Concepción, Chile
Barrio Universitario
Concepción, Chile
Tel +56 (41) 2204320
jvargas@udec.cl

Luis De la Fuente C.

Ingeniero Civil
Universidad de Concepción, Chile
Encomenderos 200 Depto. 912
Santiago, Las Condes, Chile.
Tel. +56 (2) 8810681
ldelafuente@gmail.com

Alfonso Gutiérrez-López

Profesor-Investigador,
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua,
IMTA, México
Subcoordinación de Hidrología y Mecánica de Ríos
Paseo Cuauhnáhuac 8532; C.P. 62550
Jiutepec, Morelos, México.
Tel. +52 (777) 329 3600 ext. 857
agutierrez@tlaloc.mta.mx

José Luis Arumi

Profesor Asociado,
Departamento de Recursos Hídricos
Facultad de Ingeniería Agrícola
Universidad de Concepción, Chile
Avda. Vicente Mendez 595
Chillán, Chile
Tel. +56 (42) 208804
jarumi@udec.cl