



UNIVERSIDAD DE TALCA
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE MODELOS PARA
LA ESTIMACIÓN DE PRECIPITACIONES
AREALES ANUALES EN PERÍODOS EXTREMOS.**



CLAUDIO A. RAMÍREZ BRAVO.

**Tesis para optar al grado de
LICENCIADO EN CIENCIAS FORESTALES**

**Profesor Guía: Dr. Ing. Roberto Pizarro Tapia.
Profesor Colaborador: Patricio González Colville.**

**TALCA - CHILE
1998.**

UNIVERSIDAD DE TALCA
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

EVALUACIÓN

El alumno Sr. CLAUDIO ANTONIO RAMÍREZ BRAVO, ha realizado la Tesis "ANÁLISIS COMPARATIVO DE MODELOS PARA LA ESTIMACIÓN DE PRECIPITACIONES AREALES ANUALES EN PERÍODOS EXTREMOS", como uno de los requisitos para optar al Grado de Licenciado en Ciencias Forestales, con el Profesor Sr. Roberto Pizarro Tapia como Profesor Guía.

La Comisión Calificadora constituida por los Profesores Sres: Roberto Pizarro Tapia, Oscar Santiago Vallejos Barra y Francisco Zamudio Arancibia, la evaluó con un 6,5 Seis Coma Cinco.



OSCAR SANTIAGO VALLEJOS BARRA

UNIVERSIDAD DE TALCA
DIRECTOR
ESCUELA DE INGENIERIA FORESTAL

TALCA, CHILE
1998

HOJA DE DEDICATORIA

La presente tesis está dedicada a las tres mujeres más importantes de mi vida, mi hija Paulina, mi esposa Alicia y mi madre Sonia.

HOJA DE AGRADECIMIENTOS

Los más sinceros agradecimientos van dirigidos a todas aquellas personas e instituciones que prestaron su apoyo desinteresado en la realización de esta investigación académica, especialmente a:

- El profesor guía Dr. Roberto Pizarro T., quien fue un verdadero orientador al mostrar el camino correcto a seguir, en función de su experiencia y a través de sus consejos.
- Al personal técnico y administrativo de la Dirección General de Aguas (D.G.A.) VII Región, representados en el Director de este organismo Sr. Pedro Bravo y el Jefe del Departamento de Estudios Sr. Juan Bastías.
- A la Universidad de Talca que se hizo partícipe en esta investigación a través de su Beca "Eduardo Zapater"
- A los profesores de la Universidad de Talca, que expresaron su aporte por medio de información y facilitación de materiales, especialmente en el área de climatología, cartografía y estadísticas.

Además de agradecer, a todos quienes colaboraron con sus valiosos conocimientos y consejos en el desarrollo del presente estudio y cuyos nombres se han omitido involuntariamente.

RESUMEN.

El conocimiento del monto de las precipitaciones, sobre una zona geográfica específica, es el punto de partida en la mayoría de las investigaciones relacionadas con el uso de los recursos hídricos. En este contexto, esta tesis aborda la problemática de la estimación de precipitaciones areales medias en tres sectores longitudinales de la VII Región administrativa del país, los cuales son Cordillera de los Andes, Depresión Intermedia y Cordillera de la Costa. Las estimaciones se efectuaron a través de los modelos Media Aritmética (MA), Polígonos de Thiessen (Th), Isoyetas (Iso), Thiessen Modificado (ThM) e Inverso de la Distancia al Cuadrado (IDC). A su vez, éstos fueron aplicados en dos series extremas de datos pluviales, años secos (A.S.) y años húmedos (A.H.).

El análisis y comparación de los modelos presentó lo siguiente:

- En el Valle Central los cinco modelos no presentaron grandes diferencias porcentuales entre sus medias y el promedio de éstas. Así, ninguna de las diferencias sobrepasó el 5,0%, presentando en la mayoría de los casos valores inferiores al 1,0%. Las pruebas de hipótesis y test aplicados a los modelos MA, Th, ThM y IDC, definieron la no existencia de diferencias significativas.
- En la Cordillera de la Costa, las diferencias porcentuales frente al promedio de los modelos fueron inferiores al 5,0% a excepción del modelo ThM con variaciones cercanas al -10%, tanto para A.S. como A.H. Las pruebas de hipótesis y el test Duncan corroboran las diferencias anteriores entre los pares de medias.
- Para la Cordillera de los Andes las diferencias porcentuales entre las medias y su promedio son levemente superiores a las situaciones anteriores, encontrándose de todas formas, en su mayoría, inferiores al 7,0% y presentando sólo IDC diferencias superiores de, aproximadamente, -15%. El test de hipótesis sobre los efectos de los modelos sí encontró diferencias. Al comparar estadísticamente las medias de a pares se individualizan las diferencias de IDC con las demás medias.

Finalmente, se aconseja la aplicación de cualquiera de los modelos para el Valle Central, considerando de antemano la simplicidad y facilidad de aplicación que manifiesta la Media Aritmética (MA). En la Cordillera de la Costa la situación es similar a la del Valle Central, a excepción de Thiessen Modificado (ThM). Para el caso de la Cordillera de los Andes, el único de los modelos estimadores que no se aconseja emplear es el Inverso de la Distancia al Cuadrado (IDC).

SUMMARY.

The knowledge concerning rainfall amounts, on a specific geographical zone, is the starting point in most of the investigations related to the hidric resources. In this context, this thesis approaches the problems of mean areal rainfall estimation in three longitudinal sectors in the VII Region of Chile: the Andes Mountain Range, Intermediate Depression and the Coast Mountain Range. The approaches were taken through of the Mean Arithmetic (MA), Thiessen's Polygons (Th), Isoyetas (Iso), Modified Thiessen (ThM) and Inverse Squared Distance (IDC) models. On the other hand, these models were applied in two extreme series of pluvial data, dry years (A.S.) and rainy years (A.H.).

The analysis and comparison of the models presented the following results:

- In the Central Valley the five models did not present large percentual differences between the means and their corresponding average. Therefore, none of the differences surpassed the 5,0%, presenting in most of the cases inferior values to 1,0%. The hypothesis tests and others applied to the models MA, Th, ThM and IDC, defined that there weren't significant differences.
- In the Coast Mountain Range, the percentual differences respected to the average of models were lower to 5,0%, excepted the ThM model, with variations near to the -10%, so much for A.S. as well as A.H. The hypothesis and Duncan tests confirmed the previous differences between the means pars in comparison with ThM.
- In the Andes Mountain Range the percentual differences between the means and their average are mildly higher to the previous situations, and anyway in the most cases, they were lower or inferior to the 7,0%, presenting only IDC higher differences, approximately to -15%. The differences were found on the hypothesis test on the models effects. Comparing statistically the means pars, the differences of IDC are individualized in relation with the other means.

Finally, it is recommended the application of any of the five models for the Central Valley, considering in advance the simplicity and facility of the application presented by the Arithmetic Mean (MA). In the Coast Mountain Range the situation is similar to Central Valley, excepted the Modified Thiessen (ThM). In the case of the Andes Mountain Chain the only model not advisable or recommended to employ is the Inverse Squared Distance (IDC).

ÍNDICE.

	Página
1.- INTRODUCCIÓN	1
2.- OBJETIVOS	3
2.1.- Descripción de los Objetivos.....	3
2.2.- Hipótesis de Trabajo.....	3
3.- ANTECEDENTES GENERALES	4
4.- REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	8
4.1.- Precipitación.....	8
4.2.- Tipos de Precipitaciones.....	9
4.3.- Medida de la Precipitación.....	10
4.4.- Error en la Medida Puntual.....	12
4.5.- Medida Areal o Espacial.....	13
4.6.- Métodos de Estimación de Precipitaciones Areales.....	15
5.- METODOLOGÍA	17
5.1.- Marco General.....	17
5.2.- Materiales y Equipos.....	18
5.3.- Fases Metodológicas.....	18
5.3.1.- Revisión Bibliográfica.....	19
5.3.2.- Selección de las estaciones pluviométricas.....	19
5.3.3.- Recolección de la información pluviométrica.....	20
5.3.4.- Procesamiento de la Información.....	20

5.3.4.1.- Corrección y Completación de Datos.....	21
a.- Corrección o análisis de consistencia.....	21
b.- Completación.....	22
5.3.4.2.- Determinación del área de estudio para cada zona geográfica.....	23
5.3.4.3.- Número óptimo de estaciones y densidad actual.....	25
5.3.4.4.- Diferenciación en Años Secos y Húmedos.....	27
5.3.5.- Cálculos de las precipitaciones medias areales.....	27
i) Media Aritmética.....	27
ii) Método de los Polígonos de Thiessen.....	28
iii) Método de las Isoyetas.....	28
iv) Método de Thiessen Modificado.....	30
v) Método del Inverso de la Distancia al cuadrado.....	31
5.3.6.- Análisis estadístico matemático de las medias areales.....	32
5.3.6.1.- Comparación Porcentual.....	32
5.3.6.2.- Comparación Gráfica.....	32
5.3.6.3.- Pruebas y Test Estadísticos.....	33
a.- Test de Hipótesis de efectos de los modelos (ANDEVA).....	34
b.- Pruebas de Hipótesis de Diferencias entre Pares de Medias.....	34
c.- Test de Rangos Múltiples de Duncan.....	35
5.3.7.- Análisis, comparación y discusión de los resultados.....	37
5.3.8.- Conclusiones y Recomendaciones.....	37
6.- PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	38
6.1.- Áreas de Estudio y Series de Datos.....	38
6.2.- Precipitaciones Areales Anuales.....	39
6.3.- Precipitaciones Medias Areales.....	42
6.4.- Diferencias Porcentuales.....	43
6.5.- Pruebas y Tests Estadísticos.....	44
6.5.1.- Test de Hipótesis de Efectos de los modelos (ANDEVA).....	44
6.5.2.- Test de Hipótesis de Diferencias entre Pares de Medias.....	45
6.5.3.- Test de Rangos Múltiples de Duncan.....	46

7.- ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	47
7.1.- Las Precipitaciones Areales Medias estimadas.....	47
7.2.- Los Resultados Estadísticos - Matemáticos.....	52
7.2.1.- Análisis de diferencias porcentuales en relación al promedio general de cada situación.....	53
7.2.2.- Análisis de los Resultados de las Pruebas Estadísticas.....	55
7.2.2.1.- Test de Hipótesis de Efectos de los modelos (ANDEVA).....	55
7.2.2.2.- Test de Hipótesis de Diferencias entre pares de medias.....	56
7.2.2.3.- Test de Rangos Múltiples de Duncan.....	59
7.3.- Las Estaciones Meteorológicas o puntos de medición.....	60
7.4.- La Información Pluviométrica (cantidad y calidad).....	61
7.5.- Las Zonas Geográficas de estudio.....	61
7.5.1.- Valle Central.....	61
7.5.2.- Cordillera de la Costa.....	61
7.5.3.- Cordillera de los Andes.....	62
7.6.- Las Series de Datos (A.S. y A.H.).....	63
7.7.- Los Modelos y su ejecución.....	63
7.7.1.- Media Aritmética.....	63
7.7.2.- Polígonos de Thiessen.....	64
7.7.3.- Isoyetas.....	64
7.7.4.- Thiessen Modificado.....	65
7.7.5.- Inverso de la Distancia al Cuadrado.....	66
7.7.6.- Los Cinco Modelos.....	67
7.8.- La Comparación de los Modelos.....	67
8.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	69
8.1.- Conclusiones.....	69
8.2.- Recomendaciones.....	71

9.- BIBLIOGRAFÍA..... 73**APÉNDICES**

- I.- Ubicación Geográfica y Precipitaciones Normales de las Estaciones Pluviométricas y Croquis con la Posición de las 17 Estaciones Seleccionadas.**
- II.- Gráficas de Consistencia entre estaciones vecinas (Curvas Doble Acumuladas).**
- III.- Superficies de las Zonas longitudinales y de los Polígonos de Thiessen; Densidades y Distancias; Red Pluviométrica óptima y Error asociado a la Red Actual, según Llamas (1993), y Croquis de las Áreas de Estudio.**
- IV.- Series de Años Secos y Húmedos.**
- V.- Gráficos de Probabilidad Normal Acumulada.**
- VI.- Modelos Precipitación - Altitud, para las Precipitaciones Normales y por Serie extrema de Datos, sin considerar zonas planas. Perfil Pluviométrico empleado en Isoyetas.**
- VII.- Precipitaciones Areales Anuales.**
- VIII.- Isoyetas Medias, Superficies entre Isoyetas sucesivas y Precipitación Media Areal obtenida con las Isoyetas.**
- IX.- Resultados de las Pruebas Estadísticas.**

ANEXOS

- I.- Definiciones.**
- II.- Mapa con las Estaciones Meteorológicas existentes en la VII Región.**
- III.- Mapa de Isoyetas VII Región "Balance Hídrico de Chile - 1987".**

ÍNDICE DE TABLAS.

	Página
1. Tabla de Análisis de Varianza para el efectos de los modelos.....	34
2. Orden de comparación que deben seguir las medias para obtener los rangos observados en Test Duncan.....	36
3. Cantidad de estaciones seleccionadas por área, estaciones utilizadas en el cálculo de las medias areales y superficie por zona geográfica longitudinal.....	38
4. Cantidad de Años Húmedos, Secos y Totales por zona.....	38
5. Precipitaciones Areales por modelo y año correspondientes a la Cordillera de la Costa.....	39
6. Precipitaciones Areales por modelo y año correspondientes al Valle Central.....	40
7. Precipitaciones Areales por modelo y año correspondientes a la Cordillera de los Andes.....	41
8. Precipitaciones Areales Anuales Medias.....	42
9. Rangos en que varían las Precipitaciones Areales Medias.....	43
10. Diferencias Porcentuales entre el modelo de las Isoyetas y el resto de los modelos.....	43
11. Diferencias Porcentuales entre los cinco modelos y su promedio.....	44
12. Aceptación o rechazo de hipótesis nula, para α de 10%, y Valores de p para el Test de efectos de los modelos.....	45
13. Valores de p para el Test de Diferencias entre pares de medias.....	45
14. Diferencias significativas para el Test de Duncan en la Cordillera de la Costa y valor de α de 0,05.....	46
15. Diferencias significativas para el Test de Duncan en la Cordillera delos Andes y valor de α de 0,01.....	46

ÍNDICE DE FIGURAS.

	Página
1. Esquema de Delimitación de las Áreas de Estudio para la aplicación de los modelos.....	24
2. Gráfico de Precipitaciones Medias Areales Anuales por Modelo, para Años Húmedos.....	48
3. Gráfico de Precipitaciones Medias Areales Anuales por Modelo, para Años Secos.....	49
4. Diferencias entre Valores Extremos (Máximo y Mínimo) de las Medias Areales.....	50
5. Diferencias Porcentuales de las Medias de los Modelos con respecto a la Media de Isoyetas.....	52
6. Diferencias Porcentuales de las Medias de los Modelos con respecto al Promedio General.....	53
7. Gráfica representativa del Valor p del Test de diferencias entre las medias de los modelos.....	56
8. Valor p de la Prueba de Hipótesis de Diferencias entre Pares de Medias para Años Húmedos.....	58
9. Valor p de la Prueba de Hipótesis de Diferencias entre Pares de Medias para Años Secos.....	59

1.- INTRODUCCIÓN.

La relevancia del clima como factor regulador de la conformación del medio natural y su incidencia sobre el ser humano, tanto de manera poblacional como sobre sus actividades, es innegable.

La precipitación, al igual que la temperatura, es uno de los elementos climáticos que influye más directamente sobre la naturaleza y su configuración. Su distribución temporal y espacial condiciona los ciclos agrícolas y forestales, así como el desarrollo de las principales especies vegetales y animales (Fernández, 1995). Estas variables también influyen, notoriamente, sobre otros rubros de la economía y la correspondiente producción de bienes y servicios, en sectores como la producción de agua potable para el suministro de centros urbanos, la generación de energía hidroeléctrica, el turismo, etc., y especialmente cuando dichas precipitaciones son escasas.

El excesivo crecimiento demográfico y, unido a esto, el aumento de servicios de agua potable y alcantarillado con tasas incluso superiores al propio crecimiento poblacional, la incorporación de nuevas áreas de regadío, la creciente industrialización y otros usos esenciales, crea nuevas y mayores demandas de agua, no fáciles de suministrar, debido principalmente a la gran variabilidad espacial y temporal que presenta este recurso. (UNESCO, ROSTLAC, 1982). Así por ejemplo, UNESCO estima que la disponibilidad anual per capita de agua dulce descenderá de 7.300 m³, en 1995, a 4.800 m³, en el 2025. Además, se debe considerar que la oferta de agua es constante, es decir, los recursos de agua dulce con que hoy se cuenta, son los mismos con que ha contado la humanidad por varios siglos.

Del mismo modo y según otras estimaciones de UNESCO, América del Sur es el continente que ocupa el segundo lugar, después de Asia en la cuantía de sus recursos hídricos. Sin embargo, el problema de proporcionar agua a América del Sur es de igual forma bastante agudo, lo que es explicado, principalmente, por la distribución extremadamente irregular que presentan sus recursos hídricos.

En este marco, donde la problemática del conocimiento de los montos precipitados sobre una determinada área son primordiales, las estimaciones de las precipitaciones y sus análisis espaciales, tratan de establecer las relaciones existentes entre los valores puntuales, registrados en las diferentes estaciones, y los factores que los determinan. Esto se lleva a efecto a través de modelos de distribución espacial. Así, dichos modelos deben permitir extrapolar la información puntual de una estación meteorológica a un espacio más extenso, con el fin de poder obtener la precipitación de aquella superficie.

Por otra parte, los modelos para estimar las precipitaciones medias en diferentes áreas geográficas, constituyen una herramienta básica para resolver los problemas hídricos, tanto de tipo teórico como práctico. Además, basándose en ellos, es posible efectuar una evaluación cuantitativa, en el espacio y en el tiempo, de los recursos hídricos de una zona.

Los modelos para la estimación de precipitaciones medias areales son variados y van, principalmente, desde los más simples y que requieren menos recursos para su aplicación como lo son el método de la Media Aritmética y los Polígonos de Thiessen, pasando por otros de gran laboriosidad y prestigio a nivel internacional como el método de las Isoyetas, hasta los de conocimiento y uso más reciente como Thiessen Modificado y el Inverso de la Distancia al Cuadrado. En este contexto, esta tesis los compara y evalúa en 3 zonas geográficas de la cuenca del Río Maule, ubicada en la VII región del país. Dichas comparaciones se efectúan para períodos anuales secos y húmedos tratando, a la vez, de dar algunas consideraciones para su posterior aplicación en otros estudios que los requieran.

2.- OBJETIVOS.

2.1.- Descripción de los objetivos.

2.1.1.- Objetivo General:

- Contribuir al conocimiento y desarrollo aplicado de la hidrología regional a través del análisis y evaluación de distintos modelos para la estimación de precipitaciones areales medias.

2.1.2.- Objetivos Específicos:

- Comparar los principales modelos estimadores de precipitaciones medias en 3 áreas geográficas distintas de la Región del Maule (Cordillera de los Andes, Valle Central y Cordillera de la Costa), para períodos de años secos y húmedos.
- Establecer recomendaciones acerca del uso y aplicación de los métodos analizados, a través de la determinación de las ventajas y desventajas propias de cada modelo, en el contexto de las condiciones asociadas a estas áreas geográficas específicas.

2.2.- Hipótesis de Trabajo:

Existen diferencias significativas entre algunos de los distintos métodos de estimación de precipitaciones areales medias anuales, según el lugar o área de estudio en que se apliquen y la serie de datos meteorológicos, períodos de años secos o años húmedos, de que se disponga.

3.- ANTECEDENTES GENERALES.

El área de aplicación de los modelos se encuentra en la VII Región administrativa del país o Región del Maule. La Región posee una población de 834.053 habitantes (censo 1992) y una superficie de 3,05 millones de ha (Aprox. 30 mil km²).

Como datos generales, se puede mencionar que en esta región los principales recursos productivos son generados por el sector silvoagropecuario, el que aportó en la década de los 80, aproximadamente, un 30% al PIB.

Una rápida visión económica de la región destaca que el sector silvoagrícola es una importante fuente de materias primas para las industrias vitivinícolas, molinera, azucarera, aceitera, maderera y celulósica. Los cultivos tradicionales han dejado paso a otros de tipo más industrial. La producción frutícola, incluyendo viñas, se ha visto favorecida por las condiciones climáticas, de suelo y de recursos hídricos. El sector forestal ha destinado mayoritariamente su producción a la exportación, la minería regional está enfocada hacia productos no metálicos y el sector pesquero es básicamente artesanal.

La ocupación humana en la región, ha tenido preferencia por la depresión central, producto de su potencial agropecuario y de la atracción que ejerce la infraestructura de comunicaciones, en función de la carretera longitudinal y el ferrocarril central. Por esta razón los centros de mayor jerarquía se localizan en torno a ese eje principal.

El relieve de la zona se caracteriza porque la Cordillera Andina tiene un sector anterior o precordillera, abrupto, en donde los recursos de agua corren encajonados, denominado la montaña. En general, en esta región, los Andes están disminuídos en altitud. En lo que respecta al Valle Central, también denominado Depresión Intermedia, éste ofrece amplias áreas planas y con suaves ondulaciones. A su vez, la Cordillera de la Costa va perdiendo altura y está muy cortada por los valles fluviales. La Planicie Costera se encuentra muy poco extendida, cayendo en ella de forma abrupta la Cordillera de la Costa.

En relación al clima, en la zona central del país, desde los 31° 30' hacia el sur, Aconcagua al Bío-Bío, éste es de tipo Mediterráneo. Las temperaturas disminuyen de norte a sur y varían de la costa al interior. La temperatura media es, por ejemplo, de 13,9° en Constitución. En lo relacionado a las precipitaciones hay un notorio aumento en los promedios anuales de norte a sur, siendo este valor en Talca de 699,2 mm.

El clima, hasta antes del río Maule, presenta una marcada sequía atmosférica. En este sector la estación seca dura 8 meses, concentrándose las precipitaciones en los meses invernales (Mayo a Septiembre, siendo los de mayor pluviosidad Junio y Julio); en cambio, al sur del río Maule, hay estaciones semejantes, seis meses secos y seis meses pluviosos.

En lo que concierne a la vegetación natural predominante, el tipo climático presente en la VII Región es propicio para la formación vegetal llamada espinal o estepa con *Acacia caven*, además de la presencia característica en la zona del bosque esclerófilo.

En lo que a recursos hídricos compete, se puede mencionar que la zona hidrográfica correspondiente a la parte central del país, también conocida como zona subhúmeda, está caracterizada por la presencia de ríos en torrente de régimen mixto, título que a la vez sintetiza sus características hidrológicas.

En la falda occidental de la Cordillera de los Andes es donde emplazan sus cabeceras los principales ríos y donde se generan los mayores recursos hidrológicos. El hecho que los Andes se presenten altos y macizos, determina una abundante precipitación nival en invierno. Asimismo, los grandes ríos de origen andino en la región, como el Mataquito y el Maule, se caracterizan por su escurrimiento torrencial y régimen mixto, con crecidas pluviales en invierno y nivales en primavera y comienzos del verano.

Por otro lado, (el uso intensivo de los recursos hídricos como consecuencia del desarrollo nacional hace necesaria su continua medición y evaluación. A nivel nacional, debido a características climáticas, esta necesidad se ha manifestado con fuerza desde principios de siglo. (MOP, DGA, 1988). #

En lo que a valores se refiere, se estima que la disponibilidad de Agua desde Santiago al norte es inferior a 1.000 m³/hab/año, valor que indica

que los recursos hídricos constituyen un freno al desarrollo. Inclusive en algunas zonas es menor a $500 \text{ m}^3/\text{hab}/\text{año}$. De igual forma, si se consideran los distintos tipos de aprovechamiento de agua, en Chile el uso del agua por habitante es el más alto de América Latina. Así por ejemplo, en promedio en el país es necesario aprovechar 15.000 litros diarios de agua por habitante, de los cuales el 68,0% se usa en la generación eléctrica, el 27,1% para uso agrícola, el 2,1% para uso industrial, el 1,5% para uso minero y el 1,4% (210 litros) para uso doméstico.

De esta manera se visualiza la gran relevancia que presenta el agua y, a la vez, se infiere la importancia de conocer la forma como ella llega al suelo y a los seres humanos a través de las precipitaciones. Así, en casi la totalidad de los estudios relacionados a condiciones hídricas y en la investigación de recursos naturales o relacionados con el medio ambiente, el punto de partida es la estimación de las precipitaciones. Por ejemplo, al realizar el balance hídrico de una determinada cuenca, la entrada primaria del sistema lo constituye el conocimiento de los valores pluviales. Es en este tipo de casos, donde una adecuada estimación de la precipitación que cae sobre una determinada zona geográfica cobra real importancia.

En el país la generación de las precipitaciones varía de norte a sur. En el norte del país, éstas son de origen más convectivo, asociado al régimen de circulación de baja térmica. En la zona central y hacia el sur las precipitaciones se van incrementando y son producto de una mayor actividad frontal, lo que se debe a la menor presencia del anticiclón del pacífico y al progresivo predominio de los vientos del oeste.

Además, según la D.G.A., al conocer los perfiles pluviométricos (variación de la precipitación en función de la altura) de la zona central del país, queda de manifiesto la importancia que presenta la Cord. de los Andes como fuente de recursos hídricos, dada su alta pluviosidad.

De acuerdo al Balance Hídrico de Chile y sus estimaciones (estadísticas periodo 1951-1980), la VII Región tiene una precipitación anual de 1.377 mm, de los cuales escurren y se evaporan, aproximadamente, 784 mm (56,9%) y 587 mm (42,6%), respectivamente.

En el caso de la Cuenca del Maule ($20,9 \text{ mil km}^2$), ésta tiene una precipitación media de 1.471 mm/año de los que escurren 860 mm (58,5%).

En la actualidad los métodos más usualmente empleados y recomendados en la estimación de precipitaciones areales son los Polígonos de Thiessen y el método de las Isoyetas, seguidos en menor escala por una serie de otros modelos que presentan mayor o menor grado de complejidad tanto en la información de entrada requerida, como en el tiempo y materiales necesarios para su aplicación.

La no existencia de diferencias entre algunos de estos métodos, para una determinada zona y tipo de datos, llevaría a utilizar, para esas condiciones en particular, el modelo más simple o aquel que implique el menor gasto de recursos, ya sean de tiempo o económicos. Al contrario, en el caso de presentar diferencias significativas sólo uno de los modelos en estudio en relación a los demás, la aplicación de éste, en determinadas situaciones, podría no ser aconsejable, ya que presentaría valores medios con algún grado de sobre o subestimación en relación a las estimaciones que puedan presentar el resto de los modelos.

4.- REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

4.1.- Precipitación.

La Precipitación es definida por UNESCO, ROSTLAC (1982), como el agua que proviene de la humedad atmosférica y que cae a la superficie terrestre, principalmente en estado líquido (lluvia) o sólido (nieve o granizo). Además, menciona que esta variable puede ser considerada como la más importante dentro de las que intervienen en el balance hídrico.

Del mismo modo, el Ministerio de Obras Públicas y Transportes español (MOPT, CEDEX, 1992), se refiere a la precipitación como el vector primario de entrada al sistema de balance hídrico, siendo sus formas habituales la lluvia, la nieve y variaciones de éstas.

Para Llamas (1993), la precipitación constituye un fenómeno físico que describe la transferencia de agua, en su fase líquida (lluvia) o sólida (nieve y granizo), entre la atmósfera y el suelo. Además, hace referencia que las precipitaciones sobre los continentes, representan el elemento más importante del ciclo hidrológico.

Fernández (1995) dice de la precipitación, que es la cantidad de agua que llega al suelo, procedente de las nubes, en forma líquida o sólida.

Las precipitaciones según González y García (1995), en forma de lluvia, nieve, granizo, etc., son la principal entrada de agua en una cuenca, aportando caudal a los cauces y recarga a los acuíferos. Su importancia radica en ser la forma de suministro natural de agua a los ecosistemas, condicionando la vida de los organismos y el desarrollo de las actividades humanas.

Por consiguiente, en general todos los autores mencionados coinciden, aproximadamente, en su caracterización de lo que es la precipitación, tanto en sus formas de manifestarse como en la importancia radical sobre el ciclo hidrológico y todo lo que esto conlleva sobre el medio natural, ya sea vegetacional o animal, incluyendo al ser humano.

4.2.- Tipos de Precipitaciones.

Linsley et al (1988), dicen que la precipitación, a menudo, lleva el nombre del factor atmosférico responsable del levantamiento de aire que produce el enfriamiento en gran escala, el cual a su vez, es necesario para producir cantidades significativas de precipitaciones. Según esto se presentan los siguientes tipos de precipitaciones:

- **Ciclónica:** resulta del levantamiento de aire que converge en un área de baja presión o ciclón. Éstas a su vez, se pueden subdividir en frontal, relacionada a frentes cálidos y frentes fríos, y no frontal.
- **Convectiva:** es causada por el ascenso de aire cálido más liviano que el aire frío de los alrededores. La precipitación convectiva es puntual.
- **Orográfica:** resulta del ascenso mecánico sobre una cadena de montañas.

Además, Linsley et al (1988) hacen referencia a que en la naturaleza los efectos de los variados tipos de enfriamiento, que producen precipitación, están interrelacionados y, por ello, la precipitación resultante no puede identificarse como perteneciente a un sólo tipo.

Llamas (1993), clasifica las precipitaciones atmosféricas en tres tipos diferentes, ya mencionados con anterioridad por Linsley et al (1988), pero les agrega nuevas características a cada una de dichas divisiones.

- **Ciclónicas:** están asociadas a las superficies de contacto entre masas de aire de diferente temperatura y humedad. El fenómeno ciclónico produce precipitaciones importantes y prolongadas.
- **Convectivas:** se deben al calentamiento por radiación solar del aire próximo al suelo, el cual asciende enfriándose adiabáticamente hasta alcanzar la condensación. Éstas son precipitaciones de corta duración y gran intensidad.
- **Orográficas:** son producto de aires húmedos, generalmente procedentes de océanos, que se encuentran con zonas montañosas, las cuales los obligan a elevarse produciéndoles un enfriamiento adiabático.

Fernández (1995) clasifica las precipitaciones según el criterio del mecanismo de ascenso que determina la condensación por enfriamiento adiabático y posterior precipitación, en los siguientes tipos:

- **Frontales:** asociadas a borrascas.

- Convectivas: provocadas por el ascenso del aire en contacto con una superficie cálida.
- Termodinámicas: asociadas a la presencia de vaguadas o gotas frías en altura.
- Orográficas: cuya causa es el ascenso forzado por la presencia de relieves importantes.

Según lo anteriormente citado y resumiendo, los tipos de precipitaciones se dividen básicamente según la forma como se produce el levantamiento y enfriamiento de las masas de aire húmedo que posteriormente condensan y precipitan.

La relevancia de esta información radica en que al conocer las macro características de una región, ya sean la topografía o la existencia de cadenas montañosas, la cercanía a grandes masas de aguas (océanos), la tipología de los frentes climáticos (cálidos o fríos) asociados, a la vez, a los centros de alta o baja presión, así como otras características similares; se pueden identificar los tipos de precipitaciones más predominantes en la zona y, con ello, determinar una duración y distribución espacial aproximada de los fenómenos pluviales que caen en dicha área. Todo esto ayuda a tener una visión más amplia de como varían las precipitaciones, más allá de lo que podría ser la diferencia propia que presentan éstas con la altura (perfil pluviométrico) y, al mismo tiempo, complementa las interpolaciones entre puntos con mediciones o estaciones, al no sólo considerar un simple factor de ponderación lineal.

4.3.- Medida de la Precipitación.

Según UNESCO, ROSTLAC (1982), a pesar de la importancia que presenta la precipitación dentro del balance hídrico, ésta no puede ser estimada con alto grado de exactitud, ya que su evaluación se ve afectada por dos tipos de errores:

- error en la medida puntual (entre los que destacan errores propios al funcionamiento del instrumento), y
- error en la evaluación espacial de la precipitación caída sobre una gran superficie, a partir de valores puntuales (lo que está relacionado, a la vez, a la red de observación).

Huft (1984), asevera que existen numerosos problemas los cuales impiden la comparación de la medida de la precipitación efectuada en varios países, dado esto porque la lluvia es un fenómeno muy irregular en el tiempo y en el espacio. Además, este autor hace referencia a que las precipitaciones son tanto más irregulares en el tiempo, cuando el total mensual o anual es más pequeño y, por ello, es necesario disponer de largas series de observaciones para poder obtener un valor "normal".

Para obtener información de las diferentes fases de la precipitación, según Linsley *et al* (1988), se han desarrollado una serie de instrumentos, siendo los más importantes los que miden la cantidad e intensidad del fenómeno. Los mismos autores señalan, a la vez, que todas las formas de precipitación se miden sobre la base de una columna vertical de agua que se acumularía sobre una superficie a nivel, midiéndose en el sistema métrico en milímetros.

Por otra parte, el Ministerio de Obras Públicas y Transporte español (MOPT, CEDEX, 1992), indica que la precipitación, vector de entrada al sistema hídrico, varía espacial y estacionalmente de forma importante. Se debe tener en consideración, al mismo tiempo, que para evaluar cuantitativamente los recursos hídricos (precipitaciones), lo ideal es disponer de medidas representativas de ellos, entendiéndose por tales medidas, que sean continuas en el tiempo y durante un período extenso que incluya la variabilidad hidrológica del fenómeno en observación. La variabilidad espacial se contempla al disponer de tales medidas en distintos puntos de interés.

Del mismo modo, según el MOPT, CEDEX (1992), para el caso de la aportación a la red fluvial, si bien existen datos en variados puntos, éstos presentan series cortas, discontinuas o no tienen la calidad requerida; además de ser muy común que, en muchos puntos de interés, no existan observaciones.

La importancia de dividir la inexactitud de la estimación de la precipitación en estos dos grandes ítems de errores, puntuales y espaciales, consiste en que al tenerlos diferenciados (particionar el error) es posible tratar de mitigarlos individualmente. La mitigación se puede realizar a través de la consideración de series de datos correspondientes a un número suficientemente largo de mediciones y al máximo de estaciones meteorológicas posibles para una determinada región. Junto con lo anterior, también se pueden disminuir estos errores a través de una adecuada selección de los métodos para estimar dicho valor de precipitación.

4.4.- Error en la Medida Puntual.

Según UNESCO, ROSTLAC (1982), la precipitación medida con pluviómetros o nivómetros es, casi sin excepción, menor que la que realmente cae debido, principalmente, a una perturbación aerodinámica que crea el pluviómetro, modificando el campo de precipitación en sus inmediaciones y creando turbulencias que afectan la cantidad de lluvia o nieve a captar.

UNESCO, ROSTLAC también acota que la principal causa de error en la medida de la precipitación es el viento, registrando valores con un error por defecto que es tanto mayor cuando más grande es la velocidad del viento y menor la velocidad de caída de la gota de agua. Según datos europeos este error varía entre 20% y 50% para velocidades desde 16 km/h a 80 km/h.

De acuerdo a Hufty (1984), el error diario de un pluviógrafo aislado sobrepasa el 10%.

Para Linsley *et al* (1988), cualquier recipiente abierto, cuyos lados sean verticales, puede utilizarse para medir la lluvia; sin embargo, debido a los efectos del viento y el salpicado, las mediciones no son comparables a menos que sean en recipientes del mismo tamaño y forma, y estén expuestos de modo similar. Además, hacen referencia a que entre los errores que existen, el más serio es el producido por el efecto del viento. La aceleración vertical del aire producida por el pluviómetro, es transmitida a las gotas que están por entrar, lo que produce una recogida deficiente.

Para Fernández (1995), la medición de las precipitaciones presenta una serie de inconvenientes, que se traducen en errores de medidas que pueden alcanzar el 14% (Vera, 1994 y Saa, 1991; En Fernández, 1995), siendo las causas más comunes, las perturbaciones aerodinámicas generadas por el pluviómetro, las pérdidas por humedecimiento de las paredes del instrumento y la evaporación del agua.

El error puntual está muy relacionado a la constitución del instrumento en sí, la forma en que está dispuesto dentro de la estación y el observador que realiza dicha medición o mantenimiento, si corresponde (si es pluviómetro o pluviógrafo). Las dos primeras condiciones mencionadas, del instrumento y de ubicación, están en cierto modo compensadas de acuerdo a la normativa internacional existente, donde se describen las características que

debe poseer el aparato de medición, la estación meteorológica y el posicionamiento de los instrumentos. En lo referente al observador, se da por supuesto que es una persona calificada en la función que realiza, hecho no siempre cierto.

Además, es posible que exista o se presente algún error de tipo sistemático en las mediciones, el cual puede ser identificado y corregido a través de métodos matemáticos. Al tener en consideración y aplicación las condiciones descritas, ya se tiene en una primera parte mitigado el efecto del error en la medición puntual.

De este mismo modo, además de lo anteriormente señalado, en el error puntual es primordial la forma de manifestarse de la precipitación, asociado esto a las condiciones atmosféricas, ya que, como se ha descrito, la medición en situaciones con presencia de factores como lo es el viento, se ve notablemente distorsionada. Por lo mismo, aquí es donde la cantidad de datos cobra una notable importancia para tratar de minimizar esta variación en el tiempo.

4.5.- Medida Areal o Espacial.

Para UNESCO, ROSTLAC (1982), la exactitud de la evaluación espacial de la precipitación depende esencialmente, de la red y de la calidad de los instrumentos, instalaciones y observaciones. La densidad de la red y la calidad de los instrumentos dependen, a su vez, de la zona de estudio (origen de las precipitaciones y relieve) y del fin que se persigue.

Según Hufty (1984), las lluvias de frentes cálidos (lluvias finas) se distribuyen con bastante regularidad y aumentan con el relieve, mientras que la distribución de los chubascos (lluvias de tormenta), es mucho más aleatoria. La variabilidad regional de las precipitaciones depende, entonces y al mismo tiempo, de la topografía y de las frecuencias de los tipos de perturbaciones que afectan una región.

Por otra parte, Linsley *et al* (1988) señalan que, en general, la precipitación es mayor cerca del Ecuador y disminuye al aumentar la latitud. Sin embargo, la irregularidad y orientación de las isoyetas en los mapas de precipitación media anual del mundo y de los Estados Unidos en particular,

indican que la distribución geográfica de la precipitación depende de factores más relevantes que la distancia desde el Ecuador, como son, las evaporaciones desde grandes masas de agua, las masas de aire, la orografía, etc.

A su vez, el MOPT, CEDEX de España (1992), expresa que si en un sistema existen zonas que presentan fuertes gradientes topográficos, el proceso de estimación de la precipitación areal se complica. Estos gradientes suelen ir asociados a otros análogos en la lluvia, lo que hace necesario prestar una atención especial al modelo de distribución espacial de la precipitación y, consecuentemente, a los métodos de cálculo.

Pizarro (1993), dice que en el análisis de variables hidrológicas realizado con fines de investigación y/o ejecución de obras técnicas, en distintas disciplinas ligadas a la ingeniería, la biología y las ciencias de la tierra, posee una marcada importancia la estimación de precipitaciones medias para un área geográfica determinada. /

Para Fernández (1995) la variabilidad de las precipitaciones es el rasgo que mejor define a este elemento climático y adquiere especial relevancia en climas de transición, como es el mediterráneo. La variabilidad tanto espacial como temporal está relacionada con la dinámica general atmosférica, de la que dependen el régimen pluviométrico anual y las oscilaciones interanuales que, junto con la topografía y el relieve, introducen desequilibrios muy marcados en la distribución espacial de las precipitaciones.

González y García (1995) mencionan que tanto la forma de producirse la precipitación (lluvia, nieve, granizo, etc.) como su cuantía, dependen del clima y región considerada. Asimismo, señala que en último término son las condiciones del clima (precipitaciones, temperaturas) y las características geológicas (topografía, litología, suelos), sobre las que se asientan una determinada vegetación y usos del suelo, los que determinan el comportamiento hidrológico de cada cuenca.

Stowhas (1998), constata que las características hidrológicas de una cuenca o región no dependen sólo de las características del clima, el cual determina la magnitud, intensidad y distribución de las precipitaciones y la evaporación, sino también de algunas características internas de las cuencas, asociadas a su forma y constitución geológica.

Por lo tanto, en general se puede decir que las precipitaciones no son constantes dentro de una misma zona, sino que dependen en su distribución espacial de factores tan diversos como son el relieve, las características del factor que produjo la precipitación, la posición geográfica del área a la que se le necesita realizar la estimación, incluyendo aquí la cercanía que presenta con respecto a los océanos o mares, etc. Descrita tal situación, queda de manifiesto lo ideal que es disponer de estaciones con una adecuada distribución espacial y densidad en relación a dichos factores. Asimismo, ello es vital que sea considerado en el modelo de estimación de la media areal a utilizar.

4.6.- Métodos de Estimación de Precipitaciones Areales.

La UNESCO, ROSTLAC (1982) dice que para evaluar la precipitación espacial se utilizan entre otros, los métodos del promedio aritmético, Thiessen, isoyetas y radar, recomendando para el balance hídrico de América del Sur el método de las isoyetas. Isoyetas posee ventajas en la estimación paulatina de la precipitación en el espacio, aún en zonas montañosas, facilita el trazado de la evaporación real, permite evaluar la precipitación caída en una cuenca posibilitando su comparación con la esorrentía registrada, entre otras.

De igual forma, Linsley *et al* (1988) hacen referencia a que en muchos tipos de problemas hidrológicos es necesario determinar la precipitación promedio sobre un área específica, siendo el método más simple el promedio aritmético, dando buenos resultados en áreas planas, con pluviómetros distribuidos uniformemente y cuando los valores captados no difieren mucho de la media.

Además señalan, que el método de Thiessen, en general, es más exacto que el del promedio aritmético, pero que aún presenta deficiencias frente al de las isoyetas. Si las isoyetas son bien construídas, se puede representar un patrón mucho más real de la precipitación que aquel que utiliza únicamente cantidades medidas.

Por otro lado, el MOPT, CEDEX español (1992) declara que los métodos de estimación de lluvias areales deben ser capaces de representar la distribución espacial de la precipitación sobre la cuenca. En la práctica la

precipitación areal es desconocida y puede aproximarse a partir de valores puntuales. Además, asegura que los diferentes métodos difieren únicamente en la asignación del peso o ponderación (distancia, correlación espacial, precipitación normal, etc.) sobre la precipitación de cada estación, siendo los más destacados la Media aritmética, los Polígonos de Thiessen, el Recíproco de la distancia al cuadrado, Kriging, Isoyetas y Thiessen modificado.

Sheng (1992) dice que los datos de precipitaciones son probablemente el factor más importante en cuanto a recursos hídricos, producción de cultivos, escorrentía y erosión, utilizándose normalmente tres métodos para calcular las precipitaciones medias que caen sobre una cuenca hidrográfica, los cuales son: la media aritmética, el polígono de Thiessen y el método de las isoyetas.

Llamas (1993) menciona que los métodos más utilizados para medir las precipitaciones medias regionales son: el método de Horton, la Media aritmética, las Isoyetas, Thiessen, el método de los Dos ejes y el de Elementos finitos.

Según Fernández (1995), el análisis espacial de las precipitaciones tiene como objetivo establecer las relaciones existentes entre los valores puntuales, registrados en los diferentes observatorios, y los factores que los determinan. Tradicionalmente se han usado dos métodos, los mapas de isoyetas y los polígonos de Thiessen. Otros métodos posibles de utilizar son la regresión múltiple, donde se utilizan variables como la distancia al mar o altitud, y con perspectivas a futuro la variable regionalizada o análisis geoestadístico (variograma; Anexo I).

Se puede apreciar que aproximadamente todos los autores destacan diversos modelos estimadores de precipitaciones areales, siendo los más comunes y, a la vez, más utilizados en el pasado y en la actualidad la Media Aritmética, Thiessen e Isoyetas. Sin dejar de considerar la importancia de estos modelos nombrados, se visualiza también la proliferación que están teniendo otros métodos más recientes como son Thiessen Modificado, Inverso de la Distancia al Cuadrado (en Europa) y Kriging (en Norte América), además de una serie de nuevos modelos, aplicados principalmente en países con organismos públicos que poseen instrumental tecnológico más avanzado, como es el método del radar, o donde las características ambientales de sus territorios son conocidas con un nivel de detalle importante.

5.- METODOLOGÍA.

5.1.- Marco General.

La presente investigación estudió, de manera comparativa, 5 modelos para la estimación de precipitaciones areales, los que corresponden a Media Aritmética, Polígonos de Thiessen, Isoyetas, Thiessen Modificado e Inverso de la Distancia al Cuadrado. A su vez, éstos se aplicaron en 3 áreas geográficas longitudinales dentro de la VII Región del país, estas áreas son: Precordillera de los Andes, Depresión Intermedia o Valle Central y Cordillera de la Costa.

Para cada una de las zonas nombradas, se consideró una serie de estaciones pluviométricas localizadas principalmente, en la cuenca del Río Maule. Esta cuenca, a su vez, se ubica en la VII región administrativa del país (zona subhúmeda de Chile) perteneciente a la 3ª región o zona hidrológica y está caracterizada por ríos en torrentes de régimen mixto.

Se seleccionó el área comprendida en esta cuenca, debido a que es una de las principales de la zona central y, además, está clasificada con la primera prioridad regional según la Universidad Austral en 1988 (Francke, 1996). Unido a esto, ella es la que presenta el mayor número de estaciones meteorológicas y, al mismo tiempo, son las estaciones que poseen datos de más antigüedad dentro de la región, sin dejar de considerar también que la superficie que drena este cauce fluvial (aproximadamente 20.965 km²) es la de mayor magnitud e influencia hidrológica en la región, seguida en segundo lugar por la del Río Mataquito.

Los datos obtenidos se clasificaron en dos clases extremas, según la cantidad de precipitaciones anuales frente al promedio normal; éstas corresponden a una serie de valores de precipitación para años secos y una serie para años húmedos.

En este contexto, la comparación de algunos modelos estimadores de precipitaciones areales, para las tres áreas longitudinales de la Región y para las dos series de datos en estudio, busca encontrar la posible existencia de diferencias entre los valores medios arrojados por los modelos. Lo anterior, con

el fin de que al efectuar una investigación, donde sea requisito conocer las características hidrológicas de alguna cuenca o sector, se disponga de una base confiable con la cual seleccionar el método más adecuado para la estimación de las precipitaciones que caen en dicha superficie.

5.2.- Materiales y Equipos.

En el desarrollo de este estudio se utilizaron, básicamente, los siguientes materiales y equipos:

- a) Datos pluviométricos de distintas estaciones meteorológicas ubicadas en las diferentes áreas longitudinales de la cuenca del Río Maule,
- b) Cartografía de la zona (VII Región), I.G.M., escala 1:50.000.
- c) Mapas de Isoyetas medias anuales de Chile central (M.O.P., D.G.A., 1988), escala 1:500.000.
- d) Equipos computacionales (P.C. e impresoras).
- e) Programas computacionales para el manejo de los datos, cálculos, análisis estadístico, desarrollo escrito del estudio y presentación de resultados:
 - Planilla electrónica: Excel 5.0 y 7.0.
 - Procesador de palabras: Word 6.0,
 - Paquetes estadísticos: Statgraphics Plus V.1.4 y MiniTab,
 - Sistema de Información Geográfica (SIG): ArcView GIS, v.3.0.
- f) Papel milimetrado.
- g) Escalímetro.

5.3.- Fases Metodológicas.

Esta tesis trabajó primordialmente con información de precipitaciones, además de los requisitos particulares que demandó cada uno de los modelos en estudio.

La metodología de esta investigación comprende, principalmente, las etapas que se describen a continuación:

5.3.1.- Revisión Bibliográfica.

Este ítem contempló la obtención de información sobre la precipitación y sus formas de manifestarse (líquidas y sólidas), los tipos de precipitaciones, los errores asociados a su medición, así como de cada uno de los modelos estimadores de precipitación espaciales en estudio. Además, se tomó conocimiento de investigaciones que se han efectuado, tanto a nivel nacional como internacional, similares o relacionadas a los objetivos de este trabajo. También se incursionó sobre las características de aplicabilidad de los distintos métodos y del alcance que pretenden sus resultados.

5.3.2.- Selección de las estaciones pluviométricas.

Entre las estaciones que presenta la región, se seleccionaron las necesarias para el estudio de acuerdo a los siguientes criterios:

- i) las que poseen una mejor ubicación o se encuentran más diferenciadas para cada una de las zonas geográficas longitudinales a trabajar.
- ii) las que, en conjunto, presenten una mayor densidad para cada una de las áreas.
- iii) las que presenten un mayor número de años con registros y sean, al mismo tiempo, datos más confiables, es decir, más completas a nivel mensual, privilegiando en lo posible las que poseían la mayor cantidad de datos más recientes, considerando que éstos deberían ser más exactos por el avance que conllevaría la hipotética utilización de instrumental tecnológicamente más moderno.

Es un requisito importante en una preselección de estaciones, el que éstas tengan un registro de datos considerable (a lo menos 20 años). Por ello, del total de estaciones meteorológicas estatales que existen en la Región del Maule, alrededor de 40 según la Dirección General de Aguas, D.G.A. (organismo público que las tiene a su cargo), menos de 25 de ellas tienen una antigüedad o registro de datos superior a 20 años. En esta etapa se seleccionaron 17. Dicha selección se basó, principalmente, en función de su ubicación geográfica, y en los criterios antes descritos. Posteriormente, las que en realidad fueron empleadas en el cálculo de las precipitaciones areales medias, después de haber delimitado las áreas de estudio, fueron 14 estaciones, las que se dividen en 6 estaciones en la Cordillera de los Andes (Precordillera), 5 en el Valle Central y 3 en la Cordillera de la Costa. (Ver Apéndice I).

5.3.3.- Recolección de la información pluviométrica.

Cuando los datos de las estaciones lo permitieron, se consideraron las precipitaciones medias anuales de más de 30 años, o en su defecto la mayor cantidad de valores posibles. Esta información fue obtenida en la sección de hidrología correspondiente de la D. G. A. Regional.

Este organismo público también facilitó, para el presente estudio, información oral de parte de su equipo técnico, referente a situaciones particulares que han acontecido sobre alguna estación o registro de datos, al manejo que se le da a las mediciones y el curso administrativo que siguen éstas antes de estar a disposición en la respectiva base de datos. Del mismo modo, también se tuvo a disposición material cartográfico con las correspondiente isoyetas medias anuales (líneas que unen puntos de igual precipitación) de la zona central del país.

5.3.4.- Procesamiento de la Información.

Los datos obtenidos corresponden a una serie de valores de precipitaciones mensuales (ordenados cronológicamente por año), con su correspondiente total anual, para cada una de las estaciones pluviométricas, además de contener la respectiva ubicación geográfica (latitud, longitud y altitud) de la misma.

A los datos pluviales conseguidos se les efectuó un manejo preliminar. Dicha actividad se realizó para el mayor número de estaciones posibles (17 estaciones), debido a que aunque la información presentada por alguna de estas estaciones no fuera considerada posteriormente en el cálculo de las precipitaciones medias areales, ésta sí se empleó en las fases de completación y corrección de datos de las estaciones adyacentes o más próximas que sí habían sido consideradas.

La consideración de una estación sólo en las fases de completación y corrección de datos no siempre se debió a que su información no tuviera la calidad necesaria, sino que a otros aspectos como la existencia de series cortas o una ubicación no adecuada, como lo sería el presentar un distanciamiento excesivo entre la estación en cuestión y el resto de las estaciones seleccionadas dentro de una misma área longitudinal.

Además, en las estaciones utilizadas en la aplicación de los modelos se eliminaron los datos que a simple vista no cumplían con ciertos requisitos mínimos, como la existencia de años demasiados incompletos (que carecieran de información en más de 6 meses, situación que se manifiesta en general en los primeros años de registros de algunas estaciones), valores que se escapan en exceso de la realidad que presentan los demás datos o estaciones (por ejemplo, que existan montos elevados de precipitaciones en los meses estivales en una determinada estación y no los manifiesten las estaciones adyacentes), u otras deficiencias similares, y que, a la vez, puedan ser asociados a algún tipo de error de medición fácilmente detectable.

Asimismo, una condición necesaria para establecer comparaciones, entre los distintos modelos y/o series de datos, es la simultaneidad de las observaciones. Por lo cual, si algunas estaciones o series pluviales no presentaban registros para el mismo período de años en una determinada área geográfica, ya sea por un menor número de años con mediciones o por la existencia de grandes lagunas con carencia de información, fue obligatorio reducir las series a un intervalo común de mediciones. Es decir, dentro de una determinada zona, se consideran los mismos años para cada una de las estaciones.

5.3.4.1.- Corrección y Completación de Datos.

a.- Corrección o análisis de consistencia.

Para visualizar si era necesaria la corrección de los datos, se graficaron las precipitaciones anuales acumuladas correspondientes a pares de estaciones vecinas o cercanas. En dichos gráficos se buscó la existencia de posibles quiebres o diferencias de pendientes en las curvas resultantes. Este método de corrección de datos se conoce como Curvas Doble Acumuladas o Doble Masa (UNESCO, ROSTLAC, 1982; Linsley *et al*, 1988; Pizarro, 1993) y se utiliza para detectar la existencia de errores sistemáticos en los registros de datos.

El método anteriormente descrito asume que, para un lapso constante, se manifiesta una relación estable de proporcionalidad entre los valores que registran un par de estaciones cercanas, es decir, la relación de incremento entre las precipitaciones se debería mantener relativamente

constante de no existir algún error sistemático. De existir un quiebre en algunas de las rectas ésta debería ser corregida por un factor obtenido con el cociente entre las pendientes de los tramos.

En el caso de esta situación, debido a que no se conoce de antemano qué estación o grupo de estaciones presentaban los registros más fidedignos, para ser utilizadas como patrón de comparación, se realizaron las gráficas respectivas para cada una de las estaciones contra el mayor número posible de estaciones que se encontraban en sus cercanías.

En el caso del presente estudio, no fue necesaria la corrección de los datos pluviales, esto se debe a que la D.G.A, a nivel central, efectúa dicha actividad de corrección. Por lo tanto, la aplicación del método descrito sólo fue realizado con fines de comprobar que dicha actividad haya sido ejecutada correctamente. La confirmación de la corrección de la información pluvial por parte de este organismo público quedó de manifiesto con la realización, en la presente investigación, de las correspondientes gráficas (Ver Apéndice II), donde se puede observar la no existencia de variaciones notables en las respectivas pendientes.

b.- Completación.

Para la completación de datos faltantes, diversos autores señalan que es más confiable y preciso realizar una completación a nivel mensual, para luego obtener la precipitación total anual, antes que realizar directamente la completación anual, si los datos lo permiten. (Pizarro, 1996; Lucero, 1997).

Entre los diversos métodos de completación de datos existentes los más frecuentemente utilizados, para periodos menores a un año, son la completación por Razones de Distancia, la completación por Promedios Vecinales y la completación por Razones Promedio.

El primero de los métodos de completación mencionados, las Razones de Distancia, se aconseja que se utilice en zonas planas no montañosas.

Para zonas montañosas, se debería emplear el segundo de los métodos nombrados, los Promedios Vecinales, siempre y cuando las precipitaciones normales de las distintas estaciones no difieran en más de un

10%. De no cumplirse lo descrito por el método anterior, es decir las precipitaciones normales entre las estaciones difieran en más de un 10%, se aplicaría el tercero de los métodos, denominado como las Razones Promedio. (Linsley et al, 1988; UNESCO, ROSTLAC, 1992; Llamas, 1993; Pizarro, 1993).

En esta investigación se utilizó el último de los métodos mencionados, debido a que dos de las zonas en estudio no son planas, ambas cordilleras, y la que sí lo es, Valle Central, presenta diferencias entre las precipitaciones normales de las estaciones, en algunos casos, superiores al 10%.

Para la serie de datos de las distintas estaciones se calcularon las precipitaciones normales (promedio de los últimos 30 años o en su defecto del mayor número de años posibles) y sus diferencias porcentuales, resultando que, en la mayoría de los casos, el método de completación a utilizar debería ser la completación por Razones Promedio. Éste método se empleó cuando se presentaron datos anuales faltantes producto de la carencia de mediciones en uno o algunos pocos meses, es decir, no se completaron registros anuales que carecieran de información más allá de 5 o 6 meses.

En la aplicación de las Razones Promedio, lo que se efectuó fue completar los valores pluviales a nivel mensual. Esto se llevó a cabo con las correspondientes precipitaciones pertenecientes a las estaciones vecinas en el mismo período y ponderadas con sus respectivos promedios normales. Posteriormente se llegó a obtener el valor o dato total anual con la suma de los meses carentes de información, ya completados, y el resto de los registros mensuales.

5.3.4.2.- Determinación del área de estudio para cada zona geográfica.

En esta etapa, para la obtención de cada una de las áreas en las cuales se aplicarían los modelos estimadores de precipitaciones medias areales, lo que se efectuó fue asignarles radios de influencia a la precipitación medida en forma puntual. En otras palabras se le consideraron diferentes superficies de validez al valor de precipitación o dato pluviométrico puntual correspondiente a una determinada estación.

En lo referente a la determinación de las distintas áreas geográficas, específicamente, se llevó a cabo la asignación de radios que variaron entre 5 km y 8 km (áreas hasta 200 km²), a cada una de las estaciones seleccionadas, para así posteriormente obtener una superficie circundante. Esto se efectuó con el fin de no extrapolar los valores de precipitaciones (hacia los exteriores de las áreas a delimitar) en puntos que no estén rodeados o circundados a lo menos por un par de estaciones más allá de cierto rango mínimo. (Ver Fig. 1).

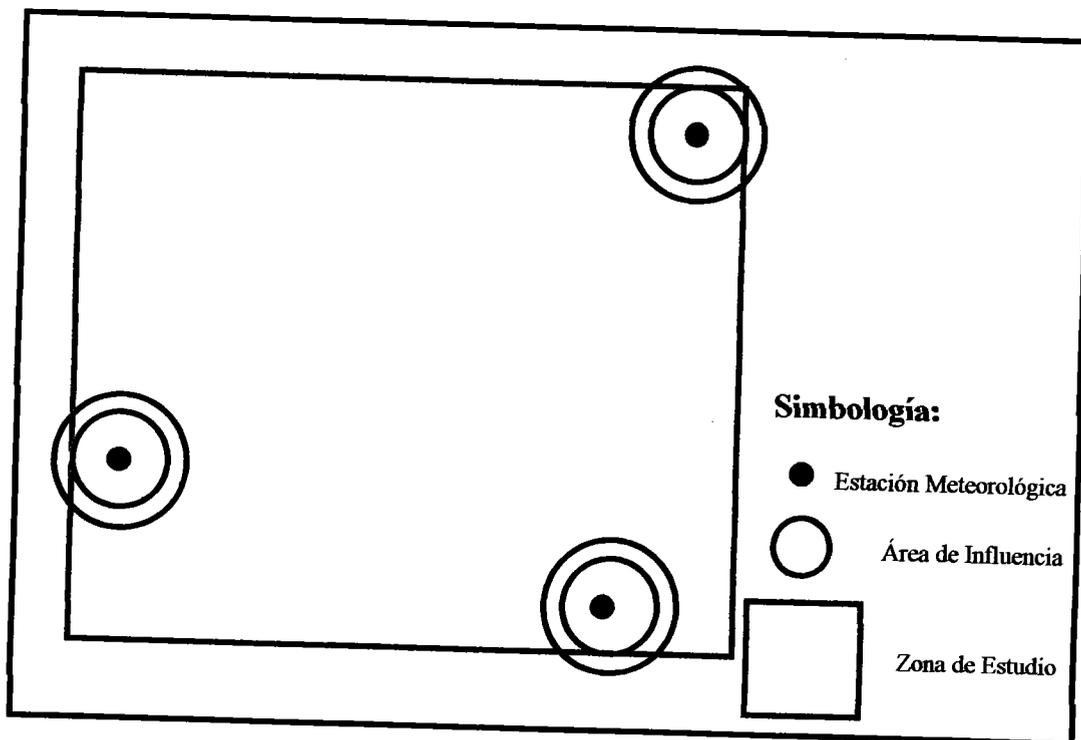


Fig. 1: Esquema de Delimitación de las Áreas de Estudio para la aplicación de los modelos.

Posteriormente, para la delimitación geométrica de las áreas correspondientes a la Cordillera de los Andes, Depresión Intermedia y Cordillera de la Costa, se probaron distintas figuras o formas planas, llegando a utilizar, finalmente, la que presentaba la menor superficie que contuviera en su interior todas las estaciones anteriormente seleccionadas para cada zona. Esto a su vez implicaría que, para un número constante de estaciones existentes en esa área, se tiene la mayor densidad de pluviómetros o puntos con medidas de precipitación por unidad de superficie.

El procedimiento anteriormente descrito, se realizó sobre papel milimetrado, representando las estaciones en un croquis escala 1:200.000. La UNESCO, ROSTLAC (1982) recomienda la utilización de una escala de 1:1.000.000 a nivel país y a nivel regional sugiere mapas con escala entre 1:500.000 y 1:250.000, lo cual corrobora que la escala utilizada es la adecuada.

Las áreas geográficas resultantes, en esta etapa, fueron de forma rectangular, con una superficie aproximada de 2.000 km² para la Cordillera de los Andes, 2.250 km² para el Valle Central o Depresión Intermedia y 3.000 km² para la Cordillera de la Costa. Cabe destacar que la Cordillera de la Costa posee una mayor superficie debido a que esta zona presenta un menor número de estaciones y, a la vez, se ubican más distantes entre sí, lo cual imposibilita emplear un área de estudio menor.

5.3.4.3.- Número óptimo de Estaciones y densidad actual.

Según la Organización Meteorológica Mundial (O.M.M.) se aconseja que, para la existencia de una buena red pluviométrica o pluviográfica, debiera existir en terrenos montañosos a lo menos un pluviómetro o pluviógrafo cada 25 km² y en terrenos planos estos deberían encontrarse cada 50 km² (Pizarro, 1993).

Lo anterior es aplicable a países de gran desarrollo, al comparar lo señalado por la O.M.M. con la situación nacional, más específicamente la VII Región. Si se considera la existencia de una superficie regional de aproximadamente 30.000 km² y que el número de estaciones estatales existentes en dicha área es un valor cercano a 40, da un resultado o densidad de alrededor de una estación pluvial cada 750 km². La densidad obtenida manifiesta una gran diferencia en relación a los valores propuestos, es decir, la región se encuentra bastante lejos de lo aconsejado por este organismo internacional.

Otro punto de interés a considerar en la distribución de las estaciones pluviométricas es el origen de las precipitaciones. Aquí se aconseja que si éstas son de origen frontal no es necesario una alta densidad de estaciones; al contrario, si el origen de las precipitaciones es orográfico, la densidad debería ser más elevada. En lo referente a las características orográficas, a nivel regional, en la zona de estudio correspondiente a la Cordillera de los Andes, sí se da una alta densidad de puntos de medición por

unidad de superficie, pero no así en la zona respectiva a la Cordillera de la Costa.

Por otra parte, Linsley *et al* (1988) recomiendan para zonas tropicales, mediterráneas o templadas, las siguientes densidades mínimas:

- En regiones planas debería haber una estación cada 600 a 900 km², y
- En regiones montañosas debería existir una estación cada 100 a 250 km².

En comparación a lo que manifiestan estos autores, como ya se mencionó, la región presenta una estación de medición cada aproximadamente 750 km², lo cual sólo estaría dentro de los rangos de terrenos relativamente planos. Sin embargo, si sólo consideramos las zonas específicas en estudio, las que de por sí presentan mayor número de puntos de medición por unidad de superficie, la densidad promedio sube a una estación cada 520 km². (Ver Apéndice III).

Llamas (1993), en cambio, menciona cuatro métodos para diseñar la red óptima en una región, según los siguientes criterios:

- La experiencia internacional.
- Los objetivos principales de precisión deseada.
- Las características meteorológicas dominantes en la región.
- La información específica que contiene cada una de las estaciones.

Según el 2º criterio, mencionado por Llamas (1993), el número óptimo de estaciones es un problema estadístico, donde, si la precipitación se calcula por una simple media aritmética, entonces este valor es:

$$N = (Cv / p)^2$$

donde, N: número de estaciones (con pluviógrafos o pluviómetros).
 Cv: coeficiente de variación, $Cv = 100 * S / \bar{x}$, (en %).
 p: error admisible, generalmente 10 %.

Aplicando este criterio, la cantidad de estaciones existentes (N) en las zonas longitudinales, definidas por esta investigación, sería la adecuada para la Cordillera de la Costa y Depresión Intermedia con un error admisible (p) del 10%. Análogamente, esto no es así para la Cordillera de los Andes donde este número debería ser mayor para un error del 10%, o inversamente, se

puede mencionar que el error presentado para la situación o N actual de puntos de medición, es de casi un 15%. (Ver Apéndice III).

5.3.4.4.- Diferenciación en Años Secos y Húmedos.

Para separar los datos, en estas dos series extremas, se consideró el Promedio Normal de las precipitaciones (Anexo I) para cada área geográfica, diferenciando como años secos aquellos que se encontraban con valores totales anuales bajo la precipitación normal y años húmedos los que presentaban valores superiores a ésta. Aunque generalmente los datos de precipitación son clasificados en dos, tres o más subdivisiones (no únicamente en secos y húmedos), en el caso de este estudio sólo se consideraron dos subgrupos, debido a que, sin dejar de ser considerables las series o número de años con registros, éstas no son lo suficientemente largas como para realizar tales diferenciaciones.

Las series de datos, para años húmedos y secos respectivamente, quedaron compuestas con las siguientes cantidades de registros anuales: 13 y 15 años para la Cordillera de los Andes, 9 y 12 años el Valle Central y 8 y 12 años para la Cordillera de la Costa. (Ver Apéndice IV).

5.3.5.- Cálculos de las precipitaciones medias areales.

Una vez delimitada el área de influencia para cada serie de estaciones, dentro de las tres zonas geográficas de la región, y diferenciados previamente los valores de precipitación en años secos y húmedos, se aplicó cada uno de los modelos en estudio. Los resultados obtenidos fueron tabulados y promediados por zona para su posterior análisis.

Los modelos o métodos para la estimación de precipitaciones areales medias utilizados fueron los siguientes:

- ^{no} i) **Media Aritmética (MA):** Consiste en la media aritmética o promedio de los datos pluviométricos puntuales de las distintas estaciones ubicadas en un área geográfica determinada. (Linsley *et al*, 1988; MOPT, CEDEX, 1992; Sheng, 1992; Llamas, 1993; Pizarro, 1993; Chow *et al*, 1994).

$$P_{mj} = \sum_{i=1}^n P_{ij} / n$$

- P_{mj} = Precipitación media del área de estudio en el tiempo j. [mm]
 P_{ij} = Precipitación de la estación i en el tiempo j. [mm]
 n = Número de estaciones de precipitación en análisis.

ii) **Método de los Polígonos de Thiessen (Th):** En este método a cada estación se le asigna una superficie, la cual es obtenida representando las estaciones en un plano, las que luego se unen a través de rectas. A estas rectas posteriormente se les trazan sus mediatrices hasta que se intersecten entre sí. Con los límites del área geográfica en estudio y el límite que definen las mediatrices, se obtiene la superficie de influencia asignada para cada estación. (Linsley et al, 1988; MOPT, CEDEX, 1992; Sheng, 1992; Llamas, 1993; Pizarro, 1993; Chow et al, 1994; Fernández, 1995; Lynch y Schulze, 1997).

$$P_{mj} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i * P_{ij}}{\sum_{i=1}^n S_i}$$

- P_{mj} = Precipitación media del área de estudio en el tiempo j. [mm]
 S_i = Superficie de influencia de la estación i. [km²]
 P_{ij} = Precipitación de la estación i en el tiempo j. [mm]

iii) **Método de las Isoyetas (Iso):** Las Isoyetas son definidas como curvas en el plano o mapa que unen puntos de igual precipitación. En este método, la localización de las estaciones y sus respectivas cantidades de lluvia se grafican en un mapa adecuado y sobre éste se dibujan las isoyetas. La precipitación promedio para el área se calcula ponderando la precipitación

de dos isoyetas sucesivas por el área comprendidas entre las isoyetas, totalizando estos productos y dividiendo por la sumatoria de las superficies o área total de la zona considerada. (Linsley *et al*, 1988; Sheng, 1992; Llamas, 1993; Pizarro, 1993; Chow *et al*, 1994; Fernández, 1995).

$$P_m = \frac{\sum_{i=1}^n ((P_{i+1} + P_i) / 2) * S_{i+1,i}}{S_t}$$

P_m	= Precipitación media del área de estudio.	[mm]
P_{i+1}	= Precipitación de la isoyeta $i+1$.	[mm]
P_i	= Precipitación de la isoyeta i .	[mm]
$S_{i+1,i}$	= Superficie comprendida entre dos isoyetas consecutivas.	[km ²]
S_t	= Superficie total.	[km ²]

Las Isoyetas se construyeron para los datos correspondientes a años húmedos y secos. En el Valle Central se construyeron por interpolación lineal. En el caso de ambas cordilleras fueron obtenidas por interpolación, pero, a la vez, considerando el criterio de la variación de altura y apoyándose, al mismo tiempo, en el perfil pluviométrico, considerando el siguiente modelo:

$$P_p = a + b * H^z$$

donde,	P_p :	Precipitación	[mm]
	H :	Altitud	[m.s.n.m.]
	a, b, z :	Constantes de regresión	

Este modelo se seleccionó a través de ajustes realizados a diversas relaciones, presentando los mejores resultados (medidas de bondad de ajuste), para la relación Precipitación Normal (mm) vs Altitud (m.s.n.m.). (Ver Apéndice VI).

Posteriormente se separaron los datos normales en las series correspondientes a años secos y húmedos, para la zona del país comprendida entre los 35,4° y los 36,1° de Latitud Sur y considerando las siguientes características:

- valores de altura (altitud) en el rango entre los 130 y 500 m.s.n.m.,
- precipitaciones que variaron entre los 600 y 3.000 mm,

No se consideró el Valle Central, por ser terrenos relativamente planos, donde no es aconsejable la utilización de perfiles pluviométricos, debido a que incluso en algunos casos ocurre el efecto inverso al que se pretende analizar, es decir, al aumentar en altura las precipitaciones disminuyen.

Con esto se obtuvo los coeficientes y constantes respectivas (a_i , b_i y z_i) correspondientes a los mejores ajustes para la función anteriormente descrita.

Esta modelación de la precipitación en función de la altura representada matemáticamente (perfil pluviométrico), se emplea para obtener una estimación rápida de la precipitación que cae a una determinada altura dentro de una zona específica. Se debe tener en consideración la validez del modelo y sus limitaciones, así como que la precipitación, incluso dentro de una pequeña superficie geográfica, no sólo depende de la altura, sino de una serie de otros factores como pueden ser la dirección del viento, la exposición de la ladera, la topografía circundante, etc.

Debido al gran trabajo y tiempo necesario que implica el construir isoyetas, estas curvas sólo se realizaron una vez para cada una de las situaciones (por zona y serie de datos), es decir no se realizaron año a año, como el resto de los modelos.

iv) Método de Thiessen Modificado (ThM): Este método se basa en los dos métodos anteriormente descritos (ii y iii). Aquí se considera que existe cierta relación entre las variaciones de las precipitaciones dentro del área correspondiente a cada polígono (isoyetas) con las variaciones de las precipitaciones obtenidas en la estación en estudio. (MOPT, CEDEX, 1992; Pizarro, 1993).

Pizarro (1993) para facilitar la comprensión del modelo lo representa a través de ciertas constantes (K_i y R_i), quedando éste expresado de la siguiente forma:

$$K_i = P_m a_i / P_m e_i$$

$$K_i \geq 0$$

- K_i = Constante de proporcionalidad de precipitaciones de la estación i .
 $P_{m\ ai}$ = Precipitación media del área de influencia de la estación i , según Thiessen, obtenida por Isoyetas medias anuales. [mm]
 $P_{m\ ei}$ = Precipitación media de la estación i (Promedio aritmético). [mm]

Para la aplicación de este método, se utilizaron las isoyetas obtenidas por la Dirección General de Aguas, correspondientes al "Balance Hídrico de Chile - 1987", (MOP, DGA, 1988).

Asimismo, este método plantea que:

$$R_i = S_i / S \quad 0 \leq R_i \leq 1$$

- R_i = Constante de proporcionalidad de superficies.
 S_i = Superficie del área de influencia i . [km²]
 S = Superficie total del área en estudio. [km²]

Por ende, la precipitación media areal se obtendría:

$$P_{mj} = \sum_{i=1}^n K_i * P_{eaij} * R_i$$

- P_{mj} = Precipitación media del área de estudio, en el periodo j . [mm]
 P_{eaij} = Precipitación de la estación del área de influencia i , en el periodo j . [mm]

- v) **Método del Inverso de la Distancia al Cuadrado (IDC):** Este método divide la cuenca o área de estudio en celdas, considerando que la precipitación dentro de una celda sin medidas de alguna estación, es una función de la precipitación de las celdas próximas que poseen medidas y del inverso de la distancia que las separa elevada al cuadrado. (MOPT, CEDEX, 1992; Chow et al, 1994; Lynch y Schulze, 1997; Lynch, 1998).

$$P_{mj} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{ij} * (1 / D_i^2)}{\sum_{i=1}^n (1 / D_i^2)}$$

P_{mj}	= Precipitación media del área de estudio, en el periodo j.	[mm]
P_{ij}	= Precipitación de la estación i en el tiempo j.	[mm]
D_i	= Distancia entre la estación y la celda correspondiente.	[km]

Para este estudio se consideró la celda central o centro de masa de cada zona geográfica, el cual se encuentra ubicado en la intersección de las diagonales de las respectivas áreas geográficas rectangulares delimitadas para cada zona.

NO 5.3.6.- Análisis Estadístico - Matemático de las Medias Areales.

30 5.3.6.1.- Comparación Porcentual.

Los valores que entregaron los modelos de estimación se compararon numéricamente, analizando la implicancia e importancia de cada uno de los resultados obtenidos. Para ello, se efectuaron comparaciones porcentuales con respecto a la media general de los modelos y para cada una de las situaciones en particular. De igual forma, se llevaron a cabo comparaciones con respecto a la media obtenida por el modelo de las Isoyetas, el cual debería ser hipotéticamente el más preciso, ya que es el único que considera más directamente las condiciones de la zona de aplicación sobre la precipitación.

31 5.3.6.2.- Comparación Gráfica.

Paralelo a lo anterior, también se efectuó una comparación gráfica entre las medias areales obtenidas de los modelos y para todas las condiciones en análisis.

5.3.6.3.- Pruebas y Test Estadísticos.

De los cinco modelos en análisis, sólo cuatro de ellos se aplicaron a nivel anual (año a año) y sólo a ellos se les efectuó diferentes pruebas estadísticas. Estos modelos son MA, Th, ThM e IDC. El trabajo que conlleva la realización de las Isoyetas (Iso), no justifica hacerlas más allá de un período en particular, por lo cual realizar Isoyetas anualmente, por períodos de más de 20 años, para 3 zonas geográficas y diferenciados en dos series de datos (A. S. y A. H.), sería una tarea de magnitudes astronómicas tanto en el tiempo requerido, como en los materiales y equipos necesarios para realizarlas, lo cual no es concebible para un estudio de las características de éste, ni se justifica por la imposibilidad práctica de aplicación.

Chow et al (1994), estudiaron cada una de las siguientes distribuciones: Normal, Lognormal, Exponencial, Gamma, Pearson III (Gamma de 3 parámetros), Log-Pearson III, Valor Extremo (Gumbel, Frechet, Weibull), en el objetivo de analizar cuál se aplicaba mejor a diferentes tipos de observaciones de variables hidrológicas. Concluyó que para el caso de la precipitación anual, la que mejor la describía era la distribución normal. Lo anterior se debe a que, sin importar cuál es la función de probabilidad de una variable X (precipitaciones diarias), la distribución de la suma de estas variables aleatorias (valores anuales), tienden hacia la distribución normal. Es decir, la precipitación anual es calculada como la suma de los efectos de muchos eventos independientes, los que corresponderían a los valores u observaciones diarias.

Para corroborar la normalidad de los modelos Media Aritmética (MA), Thiessen (Th), Thiessen Modificado (ThM) e Inverso de la Distancia al Cuadrado (IDC), se les realizaron Gráficas de Probabilidad Normal. Si la distribución describe adecuadamente los datos, los puntos de la gráfica se ubican de manera aproximada a lo largo de una recta. Al dibujar la línea, debe hacerse mayor consideración a los puntos ubicados en la parte media de la gráfica que a los de los extremos de ésta. Una buena regla es dibujar la línea entre los percentiles 25 y 75. (Montgomery y Runger, 1996). Para el caso de esta investigación, dichas rectas se dibujaron en los datos de las probabilidades acumuladas ubicadas entre el 20% y 80%. (Ver Apéndice V).

Posteriormente, comprobando que las medias se ajustaban bastante bien a una distribución de probabilidad normal, se les aplicaron los siguientes test estadísticos:

a.- Análisis de Varianza o Prueba de Hipótesis de Diferencias entre Medias.

Se llevaron a cabo Pruebas de Hipótesis de efectos fijos de tratamientos (modelos) cuya hipótesis nula (H_0) indica que los efectos de los modelos sobre la media son iguales y, a la vez, toman el valor cero. La Hipótesis alternativa (H_1) expresa que estos efectos son distintos. Lo anterior se realiza a través de un ANDEVA (ANOVA) con una función de distribución F de Snedecor. Se rechaza H_0 si F calculado es mayor que F tabulado.

Tabla N°1: Análisis de Varianza para Prueba de efectos de los modelos.

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados (SS)	Grados de Libertad (g. l.)	Cuadrado Medio (MS)	F Calculado (Fo)
Tratamientos (trat)	SStrat.	a - 1	MStrat.	$\frac{MStrat.}{MSE}$
Error (E)	SSE	a (n - 1)	MSE	
Total (T)	SST	a n - 1		

donde, a: cantidad de modelos
 n: cantidad de años

b.- Pruebas de Hipótesis para Diferencias entre Pares de Medias.

También se desarrollaron Pruebas de Hipótesis de Diferencias entre un par de medias de distribuciones normales con varianza desconocida, para el caso de varianzas distintas. Con esta prueba estadística se compararon todos los posibles pares de medias, en cuya situación la hipótesis nula (H_0) indica que las medias no presentan diferencias significativas, es decir son iguales, contra la hipótesis alternativa (H_1) que dice que el par de medias en comparación no son iguales. El estadístico utilizado fue el siguiente:

$$T_0^* = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{(S_1^2/n_1 + S_2^2/n_2)^{0.5}}$$

con v grados de libertad (g. l.), donde v corresponde a:

$$v = \frac{[(S_1^2/n_1) + (S_2^2/n_2)]^{0,5}}{\frac{(S_1^2/n_1)^2}{n_1+1} + \frac{(S_2^2/n_2)^2}{n_2+1}} - 2$$

Si $to^* < t_{\alpha/2}$ o $to^* > -t_{\alpha/2}$, no se puede rechazar H_0 . (Montgomery y Runger, 1996).

α : nivel de significancia.

c.- Test de Rangos Múltiples de Duncan.

Además de las anteriores pruebas, se aplicó el Test de Rangos Múltiples de Duncan utilizado para encontrar diferencias entre una serie de valores de medias. Aquí se prueban todas las medias en una aplicación del test, es decir, se va probando la totalidad de agrupaciones posibles de realizar, al considerar pares de medias. Lo anterior se llevó a cabo para la serie de datos correspondientes a años secos y a húmedos, y a la vez, para cada zona geográfica en estudio de la región. Este test se aplicó con α de 0,05 y 0,01, los que dan un nivel de protección, para medias ordenadas ascendentemente, de 0,95 y 0,99 si el par de medias son adyacentes y de 0,857 y 0,97 si las medias pertenecen a un grupo de 4 medias, respectivamente.

$$\text{Nivel de Protección} = (1 - \alpha)^{p-1}$$

donde, α : nivel de significancia
 p : número de medias en comparación

En este test se realizan los siguientes pasos:

- Se ordenan las "a" medias ascendentemente.
- Se calcula el error estándar $S\bar{x}_i = (MSE / n)^{0,5}$
- Se buscan los rangos $r_\alpha(p,f)$ en la tabla correspondiente, donde,

$p = 2, 3, \dots, a.$

α : nivel de significancia.

f : grados de libertad (g. l.) del error, e.d., $f = a (n-1)$.

- Los rangos obtenidos se convierten en “a - 1” rangos menos significativos R_p , donde,

$$R_p = r_{\alpha} (p, f) * S \bar{x}_i$$

- Se calculan los rangos o diferencias entre medias.
- Se comparan los rangos, primero el correspondiente a la media mayor con la menor de todas, el que se compara con el rango menos significativo R_a . Luego se compara el rango de la misma media mayor con la segunda menor, él que se compara con el rango menos significativo R_{a-1} ; se continúa así hasta comparar el rango obtenido de la media mayor con la segunda mayor con su correspondiente rango de la tabla. Después de haber comparado todos los rangos formados con la media más alta, se sigue con el rango de la segunda más alta y la menor comparándola con R_{a-1} , y así sucesivamente.

Tabla N° 2: Orden de comparación de las medias para obtener los rangos observados en Test Duncan.

Rangos observados entre las medias				
	Media --	Media -	Media +	Media ++
Media ++	1°	2°	3°	
Media +	4°	5°		
Media -	6°			
Media --				

- Si un rango observado (entre medias) es mayor que el rango menos significativo respectivo, se concluye que los pares de medias son significativamente diferentes.
- * Obs.: para evitar contradicciones, ninguna diferencia entre pares de medias es significativa, si estas dos medias caen entre dos medias que no difieren significativamente.

5.3.7.- Análisis, Comparación y Discusión de los Resultados y Pruebas Estadísticas.

Se analizaron los resultados que presentaron los modelos estimadores de precipitaciones, atendiendo a las características de cada zona considerada, y se compararon entre sí para tratar de encontrar similitudes y diferencias entre los mismos. A la vez, se pretendió en esta fase comprender qué características de los datos iniciales, influyeron de forma principal en los valores presentados.

5.3.8.- Conclusiones y Recomendaciones.

En esta etapa se llevó a cabo la identificación de las principales ventajas y desventajas que presenta cada modelo de estimación, vislumbrando a su vez las características que influirían, principalmente, en la aplicación práctica de cada uno de ellos. Además y a partir de los resultados obtenidos, se derivaron conclusiones y recomendaciones acerca del uso de estos métodos.

6.- PRESENTACIÓN DE RESULTADOS. ✓

Los resultados obtenidos son los siguientes:

6.1.- Áreas de Estudio y Series de Datos. ✓

Del total de estaciones presentes en la Región, en una primera etapa se seleccionaron las necesarias para realizar la investigación, ya sea para completación de los datos de las estaciones vecinas como, a la vez, las utilizadas para el cálculo de las precipitaciones areales propiamente tal (Ver Apéndice I). En el siguiente cuadro se presentan los valores o cantidades de estaciones correspondientes a cada situación, así como, la superficie de cada zona longitudinal de trabajo.

Tabla N° 3: Cantidad de Estaciones Seleccionadas y Utilizadas en el cálculo de las medias areales y Superficie por zona geográfica.

Zona Geográfica	N° de Estaciones Seleccionadas	N° de Estaciones Utilizadas	Superficie (km ²)
C. de la Costa	4	3	3.000
Valle Central	7	5	2.250
C. de los Andes	6	6	2.000
Total	17	14	7.250

En relación a la diferenciación de los valores de precipitaciones anuales, las series extremas, Años Húmedos y Años Secos, quedaron representadas por zona de la siguiente manera:

Tabla N°4: Cantidad de Años Húmedos, Secos y Totales por zona.

Zona Geográfica	N° de Años Húmedos	N° de Años Secos	N° Total de Años
Cordillera de la Costa	8	12	20
Valle Central	9	12	21
Cordillera de los Andes	13	15	28

6.2.- Precipitaciones Areales Anuales. ✓

Las precipitaciones areales resultantes de la aplicación de los modelos estimadores, para cada año, tuvieron los resultados que se presentan a continuación. (Las valores de precipitación se presentan en mm/año).

Tabla N° 5: Precipitaciones Areales por modelo y año correspondientes a la Cordillera de la Costa.

PRECIPITACIONES AREALES POR AÑO								
Cordillera de la Costa					N° de estaciones: 3			
	Media Aritmética		Polígonos de Thiessen		Thiessen Modificado		Inverso de la Dist. al cuadrado	
	MA		Th		ThM		IDC	
AÑOS	A.H.	A.S.	A.H.	A.S.	A.H.	A.S.	A.H.	A.S.
1996		590,6		598,1		534,8		627,6
1995		695,3		699,5		627,1		721,8
1994		708,6		728,3		650,6		724,6
1993		763,4		768,6		688,3		805,3
1992	1174,6		1176,7		1059,2		1158,1	
1991	915,6		941,5		838,9		975,2	
1990		537,1		536,6		482,9		537,9
1989		563,2		576,0		512,9		618,1
1988		748,3		779,1		691,0		822,6
1987	1060,9		1094,7		973,3		1157,7	
1986	1157,6		1182,3		1054,8		1236,5	
1985		600,6		614,1		547,9		638,3
1984	1123,7		1133,7		1020,9		1071,0	
1983		706,8		719,8		644,9		709,7
1982	1265,0		1283,8		1151,4		1264,9	
1981		803,5		816,9		729,7		853,2
1980	1144,4		1159,4		1039,9		1150,9	
1979		728,9		737,6		661,8		732,7
1978		814,8		836,1		746,8		840,1
1977	1030,8		1050,2		937,5		1098,5	

NO

Tabla N° 6: Precipitaciones Areales por modelo y año correspondientes al Valle Central.

PRECIPITACIONES AREALES POR AÑO								
Valle Central					N° de estaciones: 5			
	Media Aritmética		Polígonos de Thiessen		Thiessen Modificado		Inverso de la Dist. al cuadrado	
	MA		Th		ThM		IDC	
AÑOS	A.H.	A.S.	A.H.	A.S.	A.H.	A.S.	A.H.	A.S.
1996		466,3		454,9		453,1		426,9
1995		780,9		762,3		758,0		707,0
1994		694,2		679,3		675,1		623,5
1993		755,5		732,8		728,3		679,0
1992	1177,3		1159,4		1155,6		1151,7	
1991	865,9		848,6		846,7		846,5	
1990		571,0		559,0		556,2		531,3
1989		529,9		521,9		520,5		511,3
1988		718,0		707,0		705,1		692,1
1987	916,6		902,0		901,5		919,6	
1986	1072,6		1076,3		1074,3		1074,2	
1985		678,8		661,9		657,8		610,8
1984	1195,1		1183,3		1179,7		1157,6	
1983		748,9		733,4		730,0		706,3
1982	1163,4		1157,6		1156,8		1158,4	
1981		771,0		760,4		755,7		714,1
1980	1056,3		1042,2		1041,5		1049,6	
1979		798,3		784,1		781,6		791,1
1978	870,2		860,0		860,0		847,9	
1977	937,5		925,8		924,2		923,5	
1976		566,9		561,3		560,2		572,1

Tabla N° 7: Precipitaciones Areales por modelo y año correspondientes a la Cordillera de los Andes.

PRECIPITACIONES AREALES POR AÑO								
Cordillera de los Andes					N° de estaciones: 6			
	Media Aritmética		Polígonos de Thiessen		Thiessen Modificado		Inverso de la Dist. al cuadrado	
	MA		Th		ThM		IDC	
AÑOS	A.H.	A.S.	A.H.	A.S.	A.H.	A.S.	A.H.	A.S.
1996		833,1		846,0		855,1		679,2
1995		1493,0		1510,2		1529,5		1250,4
1994		1444,1		1499,2		1551,7		1169,7
1993		1402,6		1440,5		1457,2		1129,8
1992	1726,2		1749,5		1810,3		1407,7	
1991	1956,0		1993,0		2006,5		1573,9	
1990		1043,4		1063,9		1087,5		854,8
1989		993,6		1009,7		1026,0		822,4
1988		1283,2		1312,4		1333,8		1060,1
1987	1872,6		1901,3		1912,2		1501,1	
1986	2053,7		2072,5		2110,0		1748,2	
1985		1297,8		1323,4		1342,2		1057,5
1984	2014,3		2040,1		2079,2		1717,3	
1983		1162,4		1177,8		1188,0		950,6
1982	2591,4		2640,7		2660,2		2117,2	
1981		1633,4		1667,4		1684,3		1340,6
1980	2221,5		2244,5		2260,7		1849,9	
1979	1775,0		1822,6		1832,3		1386,7	
1978	1998,2		2017,2		2027,7		1640,1	
1977	2040,4		2068,1		2074,8		1683,3	
1976		1331,9		1349,8		1367,6		1096,1
1975	1838,1		1891,7		1907,9		1499,3	
1974	1744,3		1775,0		1784,6		1446,1	
1973		1364,3		1385,1		1392,8		1086,9
1972	2779,7		2804,5		2807,7		2231,0	
1971		1379,3		1401,5		1421,6		1123,1
1970		1428,2		1448,6		1471,2		1195,5
1969		1458,2		1493,1		1484,6		1164,3

Para mayor detalle Ver Apéndice VII.

6.3.- Precipitaciones Areales Anuales Medias para los años considerados.

A continuación, en la Tabla N° 8, se pueden apreciar las precipitaciones areales medias anuales entregadas por los cuatro modelos, para las tres zonas de aplicación dentro de la región y para los correspondientes períodos de años húmedos y secos. Se incluye además, el resultado obtenido por el método de las isoyetas (Iso) para los datos medios anuales.

Tabla N° 8: Precipitaciones Areales Anuales Medias.

	Modelos:	MA	Th	Iso	ThM	IDC
		Media Aritmética	Polígonos de Thiessen	Isoyetas	Thiessen Modificado	Inverso Distancia Cuadrado
Zona	Años	(mm/año)	(mm/año)	(mm/año)	(mm/año)	(mm/año)
Cordillera de la Costa	Húmedos	1109,1	1127,8	1134,2	1009,5	1139,1
	Secos	688,4	700,9	708,7	626,6	719,3
Valle Central	Húmedos	1028,3	1017,3	1013,0	1015,6	1014,3
	Secos	673,3	659,9	673,0	656,8	630,5
Cordillera de los Andes	Húmedos	2047,0	2078,5	1940,1	2098,0	1677,1
	Secos	1303,2	1328,6	1273,5	1346,2	1065,4

Los rangos en que se presentan las medias areales, así como los valores extremos, se señalan a continuación:

Tabla N° 9: Rangos en que varían las Precipitaciones Areeles Medias.

		Considerando las cinco medias areales				Sin el Valor Extremo			
Zona	Años	Mayor	Menor	Diferencias		Mayor	Menor	Diferencias	
		mm/año	mm/año	mm	%	mm/año	mm/año	mm	%
Cordillera de la Costa	Húmedos	1139,1	1009,5	129,6	11,7	1139,1	1109,1	30,0	2,7
	Secos	719,3	626,6	92,8	13,5	719,3	688,4	30,9	4,5
Valle Central	Húmedos	1028,3	1013,0	15,3	1,5	1017,3	1013,0	4,3	0,4
	Secos	673,3	630,5	42,8	6,5	673,3	656,8	16,5	2,5
Cordillera de los Andes	Húmedos	2098,0	1677,1	420,9	21,4	2098,0	1940,1	158,0	8,0
	Secos	1346,2	1065,4	286,4	22,7	1346,2	1273,5	72,7	5,8
Los porcentajes están calculados sobre los promedios de cada situación.									
El color verde representa los menores porcentajes y el color azul los mayores.									

6.4.- Diferencias Porcentuales.

Las diferencias porcentuales de los diversos modelos estimadores de precipitaciones areales en relación al método de las Isoyetas, son las siguientes:

Tabla N° 10: Diferencias Porcentuales entre el modelo de las Isoyetas y el resto de los modelos.

COMPARACIÓN DE MEDIAS CON RESPECTO A ISOYETAS						
Zona	Años	Isoyetas	Diferencias Porcentuales:			
			MA	Th	ThM	IDC
Cordillera de la Costa	Húmedos	1134,2	-2,2	-0,6	-11,0	0,4
	Secos	708,7	-2,9	-1,1	-11,6	1,5
Valle Central	Húmedos	1013,0	1,5	0,4	0,3	0,1
	Secos	673,0	0,0	-2,0	-2,4	-6,3
Cordillera de los Andes	Húmedos	1940,1	5,5	7,1	8,1	-13,6
	Secos	1273,5	2,3	4,3	5,7	-16,3
En Rojo se presentan las diferencias porcentuales mayores (en valor absoluto) a 10%.						

Las diferencias porcentuales, con respecto a la media de los 5 modelos, son presentadas a continuación.

Tabla N° 11: Diferencias Porcentuales entre los cinco modelos y su promedio.

Zona	Años	Promedio General	Diferencias Porcentuales:				
			MA	Th	Iso	ThM	IDC
Cordillera de la Costa	Húmedos	1103,9	0,5	2,2	2,7	-8,6	3,2
	Secos	688,8	-0,1	1,8	2,9	-9,0	4,4
Valle Central	Húmedos	1017,7	1,0	0,0	-0,5	-0,2	-0,3
	Secos	658,7	2,2	0,2	2,2	-0,3	-4,3
Cordillera de los Andes	Húmedos	1968,1	4,0	5,6	-1,4	6,6	-14,8
	Secos	1263,4	3,2	5,2	0,8	6,6	-15,7
Las mayores diferencias se presentan en Azul (<10%) y Rojo (>10%).							

6.5.- Pruebas y Tests Estadísticos.

6.5.1.- Test de Hipótesis de Efectos de los modelos (Análisis de Varianza).

Las ocasiones en las que se rechazó la hipótesis nula y los valores de p del Test de Hipótesis de efectos de los modelos, para cada situación de estudio, se muestran a continuación:

Tabla N° 12: Aceptación o rechazo de hipótesis nula, para α de 10%, y Valores de p para el Test de efectos de los modelos.

Zona	Período	α 0,10	valor - p
C. Costa	A. H.	Sí	0,053
	A. S.	No	0,106
V. Central	A. H.	No	0,996
	A. S.	No	0,804
C. Andes	A. H.	Sí	0,002
	A. S.	Sí	0,001
No: No se puede rechazar la hipótesis de igualdad de las medias			
Sí: Se rechaza la hipótesis de igualdad de las medias			

6.5.2.- Test de Hipótesis de Diferencias entre Pares de Medias. ✓

Tratando de individualizar e identificar los modelos que difieren del resto, se llevó a cabo la aplicación de la prueba de hipótesis para diferencias entre pares de medias, pudiéndose resumir sus salidas en los siguientes valores del estadístico p. (Tabla 13 - 1 - 5 - 1).
valor.

Tabla N° 13: Valores p para el Test de Diferencias entre pares de medias.

Zona	Periodo	MA-Th	MA-ThM	MA-IDC	Th-ThM	Th-IDC	ThM-IDC
C. Costa	<i>P.T.</i> A. H.	0,723	0,063	0,553	0,028	0,818	0,058
	A. S.	0,753	0,107	0,441	0,061	0,651	0,018
V. Central	A. H.	0,863	0,843	0,825	0,979	0,963	0,979
	A. S.	0,768	0,716	0,341	0,945	0,506	0,431
C. Andes	A. H.	0,803	0,684	0,003	0,876	0,002	0,010
	A. S.	0,749	0,590	0,002	0,827	0,001	0,025
Simbología:		$p \leq 1\%$	$1\% < p \leq 5\%$	$5\% < p \leq 10\%$			
En Negro aparecen los valores p superiores a 10%.							

6.5.3.- Test de Rangos Múltiples de Duncan. *NO*

Tabla N° 14: Diferencias significativas para el Test de Duncan en la Cordillera de la Costa y valor de α de 0,05.

Cordillera de la Costa		$\alpha = 0,05$			
Periodos ↓	→	Años Húmedos			
	Modelos	MA	Th	ThM	IDC
Años Secos	MA	----			
	Th		----	Sí	
	ThM			---	Sí
	IDC			Sí	---
Sí: Sí existen diferencias significativas entre los pares de medias					

NO

Tabla N° 15: Diferencias significativas para el Test de Duncan en la Cordillera de los Andes y valor de α de 0,01.

Cordillera de los Andes		$\alpha = 0,01$			
Periodos ↓	→	Años Húmedos			
	Modelos	MA	Th	ThM	IDC
Años Secos	MA	----			Sí
	Th		----		Sí
	ThM			---	Sí
	IDC	Sí	Sí	Sí	---
Sí: Sí existen diferencias significativas entre los pares de medias					

NO

7.- ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS. ✓

7.1.- Las Precipitaciones Areales Medias estimadas. ✓

Gráficamente (Apéndice V), al acumular los valores medios anuales por modelo y estandarizarlos, se aprecia que los datos se ajustan relativamente bien a una distribución normal, ya que no se presentan grandes quiebres en las líneas respectivas, es decir, se asimilan bastante a una recta.

Además, en la comparación gráfica de las Medias Areales (Figs. 2 y 3) y en los mismos gráficos de probabilidad, ya mencionados (Apéndice V), es posible comenzar a visualizar las variaciones que presentan los modelos ThM, para el caso de la Cordillera de la Costa, e IDC, en el caso de la Cordillera de los Andes, con respecto al resto de las curvas (modelos). También se puede distinguir en las figuras correspondientes al Valle Central, que no existen grandes diferencias gráficas entre los valores presentados para esta zona, siendo notable la similitud que presentan todos los modelos para el caso de la serie de datos pertenecientes a años húmedos.

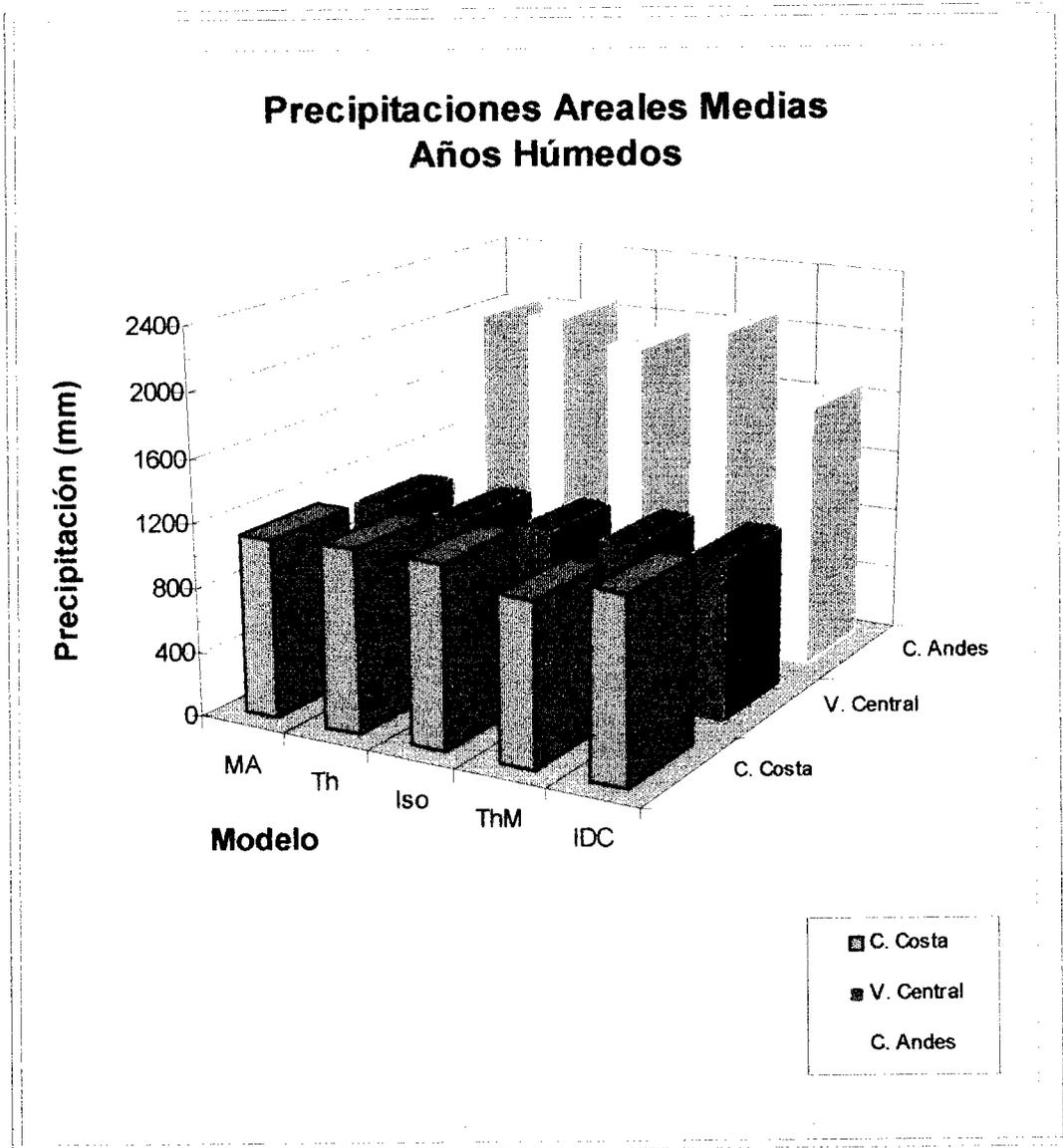


Fig. 2: Gráfico de Precipitaciones Medias Areales Anuales por Modelo, para Años Húmedos.

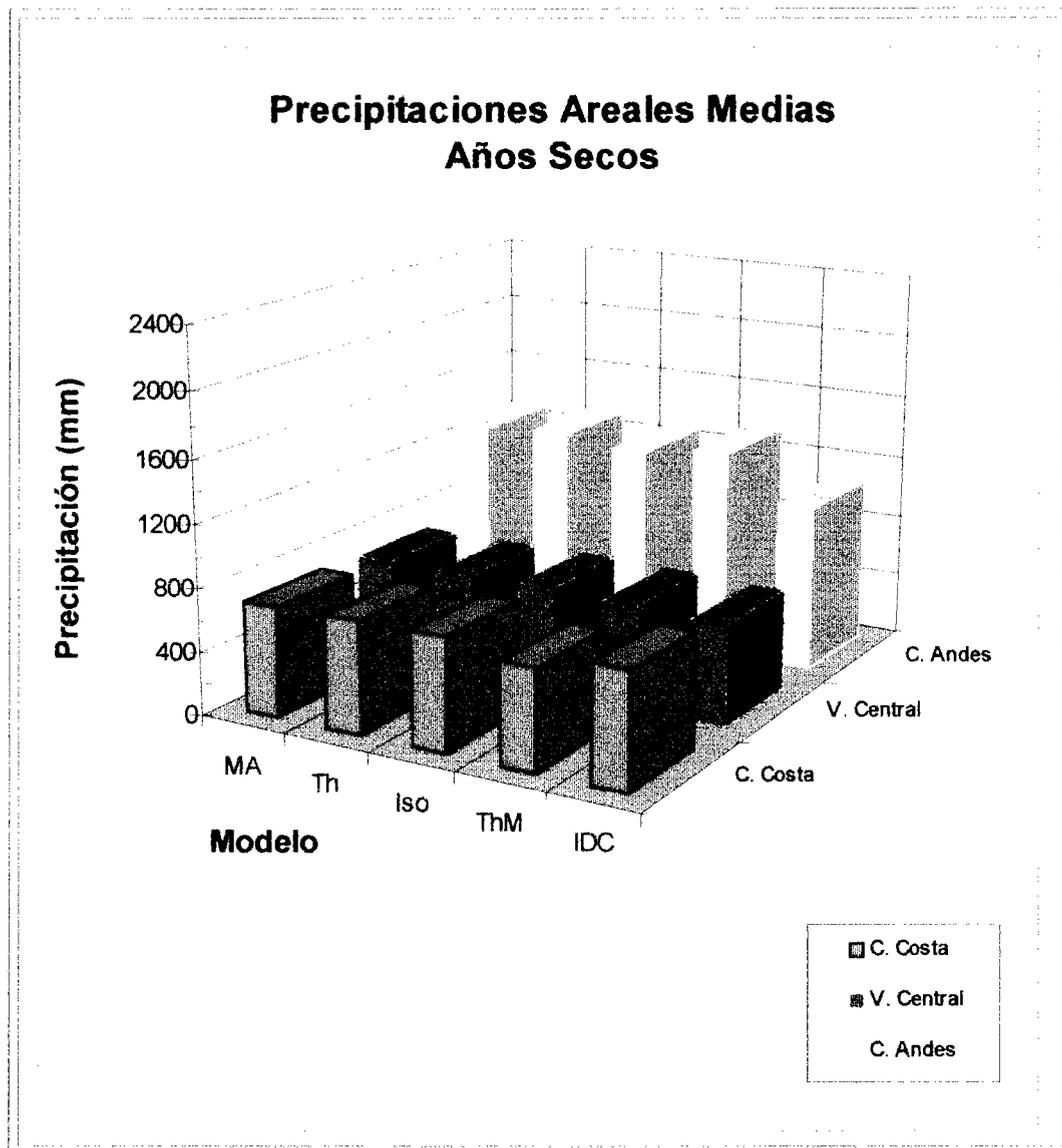


Fig. 3: Gráfico de Precipitaciones Medias Areales Anuales por Modelo, para Años Secos.

Con respecto a las medias arrojadas por los distintos modelos se aprecia que la menor diferencia entre ellas se encuentran en el caso del Valle Central para Años Húmedos (Fig. 5). Así, La diferencia entre los valores extremos de 1013,0 mm y 1028,3 mm, alcanza la magnitud de sólo 15,3 mm (1,5% del promedio), encontrándose los modelos de menor a mayor en el siguiente orden Iso, IDC, ThM, Th y MA.

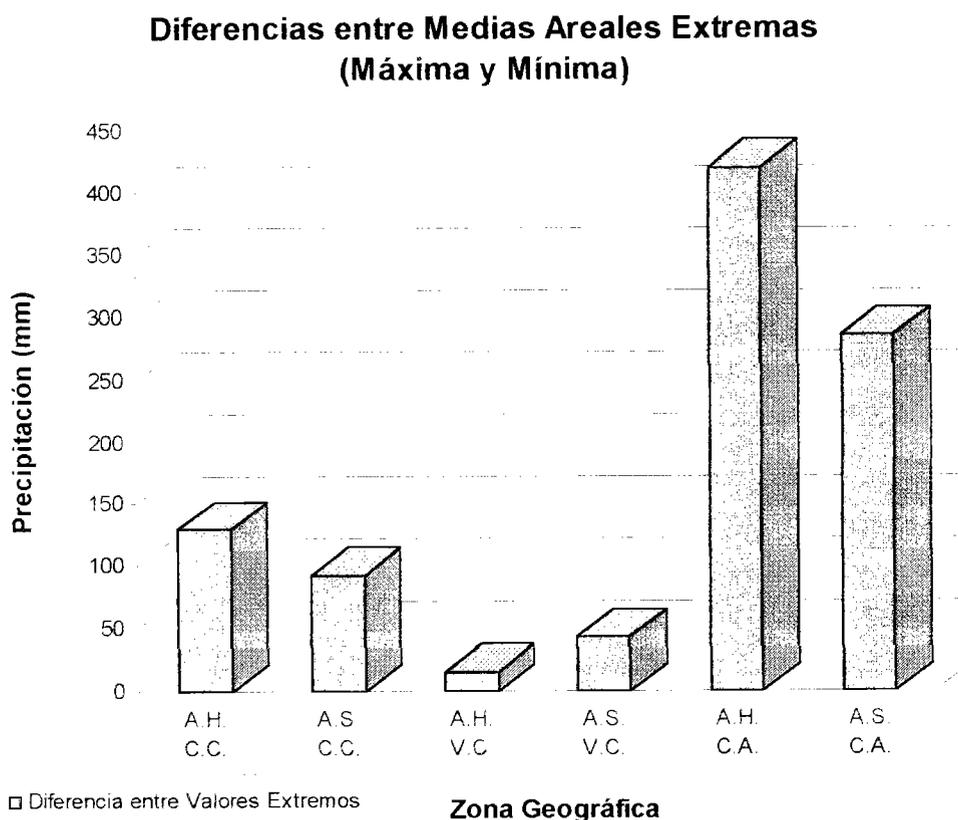


Fig. 4: Diferencias entre Valores Extremos (Máximo y Mínimo) de las Medias Areales.

Al contrario de lo acontecido en el Valle Central, las mayores diferencias entre las medias areales se presentaron en la Cordillera de los Andes, tanto en Años Húmedos (A.H.) como en Años Secos (A.S.). Dichas diferencias corresponden a 420,9 mm (21,4%) y 286,4 mm (22,7%), para A.H. y A.S. respectivamente. Al eliminar el valor obtenido con el modelo IDC, que correspondería al más extremo de todos, dichas diferencias bajarían a 158,0 mm (8,0%) en A.H. y 72,7 mm (5,8%) en A.S.

Si se considera la precipitación areal obtenida por isoyetas (Iso), partiendo de la base que este método debería ser el más exacto o más real, debido a lo manifestado por la mayoría de los autores consultados y, además, dado que este método es el único que considera de forma más directa las

características orográficas de la zona de aplicación, se encuentra que, al comparar los valores medios obtenidos con los que presentan el resto de los modelos investigados (Fig. 6) se tiene lo siguiente:

- * En la zona del **Valle Central** las diferencias porcentuales son en su mayoría cercanas o inferiores al 2%, a excepción de IDC que presenta un valor de -6,3% para A.S. Cabe destacar la situación para A.H. donde todos los modelos a excepción de MA, manifiestan valores porcentuales inferiores a 0,5%, ocurriendo lo inverso en A.S., donde MA no presenta diferencias porcentuales con Iso.
- * En el área correspondiente a la **Cordillera de la Costa**, los resultados porcentuales de las diferencias entre Iso y el resto de los modelos, en general, son inferiores al 3%, a excepción de ThM que presenta una variación negativa superior al 10%, lo anterior tanto para A.S. como para A.H.
- * En el caso de la **Cordillera de los Andes**, el rango de las diferencias porcentuales está aproximadamente entre 2% y 8% sobre la media de Iso, manifestando sólo IDC porcentajes mayores y negativos que corresponden a -13,6% y -16,3% para A.H. y A.S., respectivamente.

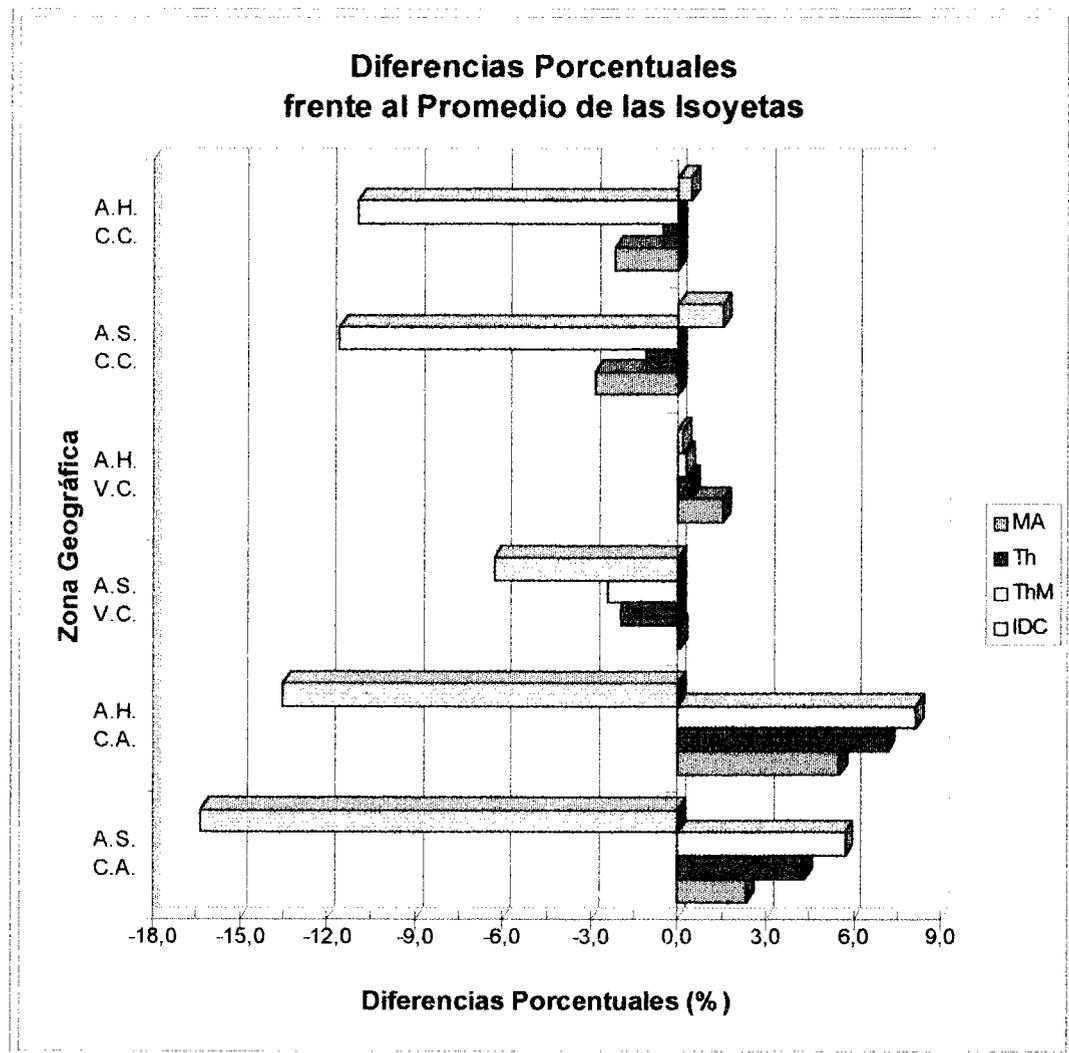


Fig. 5: Diferencias Porcentuales de las Medias de los Modelos con respecto a la Media de Isoyetas.

7.2.- Los Resultados Estadísticos - Matemáticos.

El análisis y comparación de los modelos: Media Aritmética (MA), Polígonos de Thiessen (Th), Isoyetas (Iso), Thiessen Modificado (ThM) e Inverso de la Distancia al cuadrado (IDC), presentó los siguientes resultados.

7.2.1.- Análisis de Diferencias Porcentuales en relación al promedio general de cada situación.

Promediando los resultados obtenidos por los modelos, por zona de estudio y serie de datos, y posteriormente comparando este valor con las medias areales individuales se obtiene que:

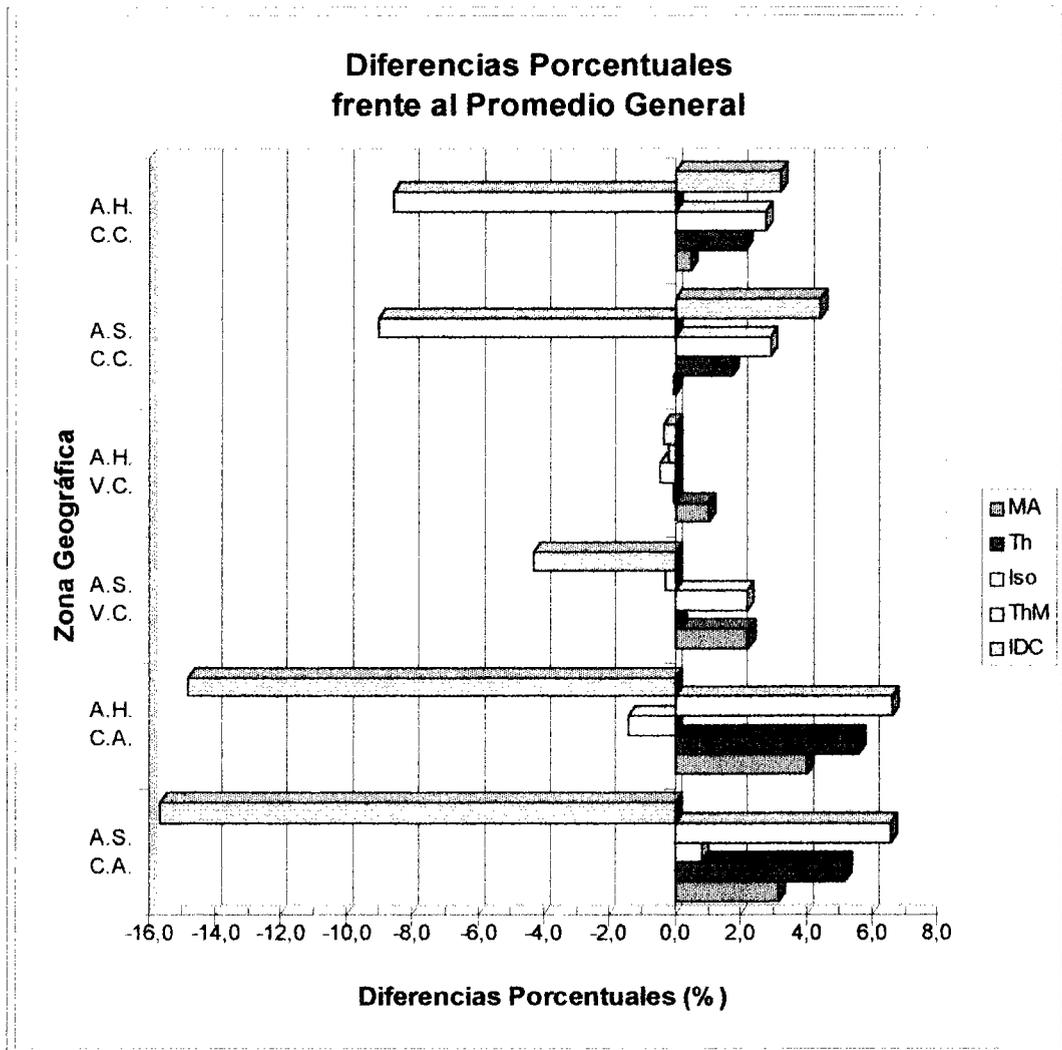


Fig. 6: Diferencias Porcentuales de las Medias de los Modelos con respecto al Promedio General.

*** Valle Central.**

En el Valle Central los cinco modelos en estudio no presentaron grandes diferencias, en términos porcentuales, con respecto al promedio general. Así, con los resultados presentados ninguna de estas variaciones sobrepasó el 5,0%, encontrándose incluso en la mayoría de los casos valores cercanos o inferiores a 1,0%. Al comparar estas mismas diferencias porcentuales entre las distintas series de datos (años secos con años húmedos), para un mismo modelo, es importante mencionar que esta área de estudio fue la que manifestó mayores variaciones (sin ser excesivas), siendo éstas superiores a dos puntos porcentuales para dos de los modelos en análisis. Dichos modelos son Iso con 2,7 puntos (-0,5% A.H. y 2,2% A.S.) e IDC con un 4,0 puntos (-0,3% A.H. y -4,3% A.S.).

*** Cordillera de la Costa.**

En la Cordillera de la Costa, las diferencias porcentuales fueron inferiores al 5,0% a excepción del modelo ThM (Thiessen Modificado) con variaciones negativas cercanas al 9,0%, tanto para el período o serie de datos de años secos (A.S.) como para la de años húmedos (A.H.). Al comparar las diferencias presentadas para A.S. y A.H. por un mismo modelo, se aprecia que éstas difieren mínimamente y en general siguen la misma tendencia (valores muy similares que no difieren más allá de un punto porcentual).

*** Cordillera de los Andes.**

Para la Cordillera de los Andes las diferencias porcentuales son levemente superiores que en todos los casos anteriormente descritos, a excepción de el modelo de las Isoyetas (Iso) con diferencias inferiores al 1,5%, en relación a la media de todos los modelos analizados. De todas formas, la mayoría de los porcentajes se encontraron menores al 7,0%, presentando sólo el modelo de Inverso de la Distancia al cuadrado (IDC) valores porcentuales absolutos superiores al resto de los modelos e inferiores a la media en, aproximadamente, un 15%. Si se comparan los porcentajes entre A.H. y A.S., por modelo, se visualiza que éstos son muy similares (difieren menos de un punto), a excepción de Isoyetas (Iso) con 2,4 puntos porcentuales (-1,4% para A.H. y 0,8% para A.S.), que de todas formas no es considerable.

7.2.2.- Análisis de los Resultados de las Pruebas Estadísticas.

La aplicación de Pruebas y Test estadísticos a los modelos MA, Th, ThM y IDC, presentaron los valores que se describen a continuación.

7.2.2.1.- Test de Hipótesis de Efectos de los modelos (Análisis de Varianza).

Al buscar la existencia de diferencias dentro de la totalidad de las medias a la vez, es decir, en una única aplicación de un test, diferenciando sólo las distintas situaciones de estudio (zona geográfica y tipo de datos), se empleó el Test de Efectos de tratamientos. De acuerdo a sus resultados se puede destacar lo siguiente:

*** Valle Central.**

En el Valle Central se presentan valores del test de diferencias entre los efectos de los tratamientos (modelos) para el valor p de 0,996 para Años Húmedos (A.H.) y 0,804 para Años Secos (A.S.). Este elevado resultado de p manifiesta una cantidad que fortalece la aseveración de no existencia de diferencias significativas entre las medias de esta zona.

*** Cordillera de la Costa.**

En esta área, el test de diferencia entre efectos de los modelos con los datos de A.S. no presenta diferencias significativas (valor p de 0,106) y para los datos de A.H. se visualizan diferencias sólo con el α del 10% (valor p de 0,053).

*** Cordillera de los Andes.**

Los efectos de los modelos manifiestan la existencia de diferencias significativas en ambas series de datos, siendo el valor p para A.H. de 0,002 y para A.S. de 0,001.

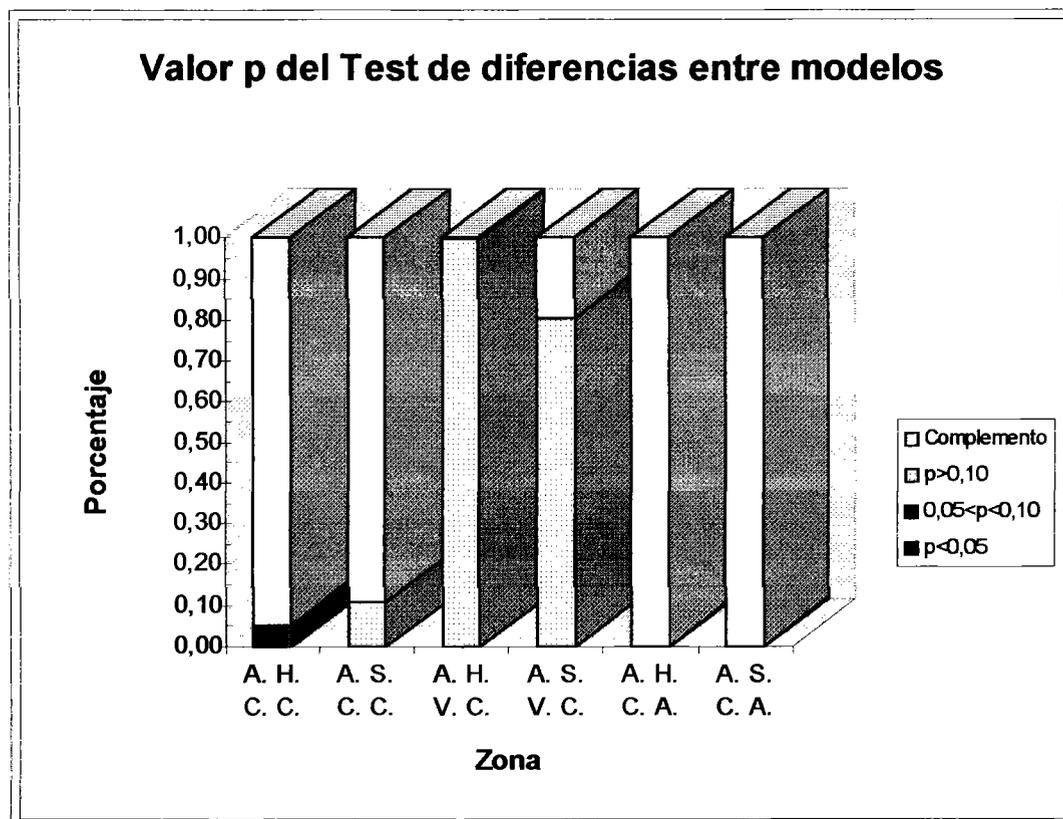


Fig. 7: Gráfica representativa del Valor p del Test de diferencias entre las medias de los modelos (en tantos por uno).

7.2.2.2.- Test de Hipótesis de Diferencias entre pares de medias.

En relación a las salidas obtenidas con la aplicación de este test (Ver Fig. 8 y Fig. 9), se destaca que:

* Valle Central.

La aplicación de pruebas de hipótesis y test estadísticos a los modelos MA, Th, ThM y IDC, en general, no presentaron diferencias significativas para α entre 0,10 y 0,01. Para el test de diferencias entre medias en A.H. los valores de p en todos los casos fueron superiores al 0,82 alcanzando incluso en dos casos 0,98 y para A.S. variaron entre 0,34 y 0,95. Aunque como se acaba de mencionar no existe razón para vislumbrar diferencias entre las

medias arrojadas por los modelos, es destacable mencionar que los valores del p más bajos encontrados en esta área para A.S. (entre 0,34 y 0,51) corresponden a las comparaciones en que aparece IDC. Lo anterior da muestra de una pequeña variación (no significativa) entre los valores de este modelo, en función a los del resto, para A.S., lo que no se manifiesta en A.H. En otras palabras, los valores de p entre pares de medias en que se encuentra IDC para A.S., son los únicos en que se difiere en más de un 20% (hasta 55%) en relación a los de sus similares de A.H.

* Cordillera de la Costa.

El test de diferencias entre medias presenta resultados positivos para A.H. en todas las situaciones en que se consideraba el modelo ThM, para valores de α del 10%, y en su comparación con el modelo Th incluso al 5%, el resto de pares de medias comparadas presentó valores de p superiores a 0,55. Para la situación con A.S. se presentaron diferencias entre las medias Th - ThM al 10% y ThM - IDC al 5%, siendo el valor p para el caso MA - ThM de 0,107 (levemente superior al 10%); el resto de pares de medias en comparación presentaba valores de p sobre 0,40.

* Cordillera de los Andes.

La comparación de las medias de a pares, con el test de hipótesis de diferencia entre medias, visualiza la existencia de diferencias significativas entre el modelo IDC con la totalidad de los modelos a los que se les aplicó esta prueba y para casi la mayoría de α utilizados. Los valores de p en estos casos para A.H. son 0,003, 0,002 y 0,010 y para A.S. son 0,002, 0,001 y 0,025, correspondiendo estos valores a las comparaciones de IDC, con los modelos MA, Th y ThM respectivamente. El resto de pares de medias comparadas presentaron valores de p cercanos o superiores a 0,6 tanto para A.H. como para A.S.

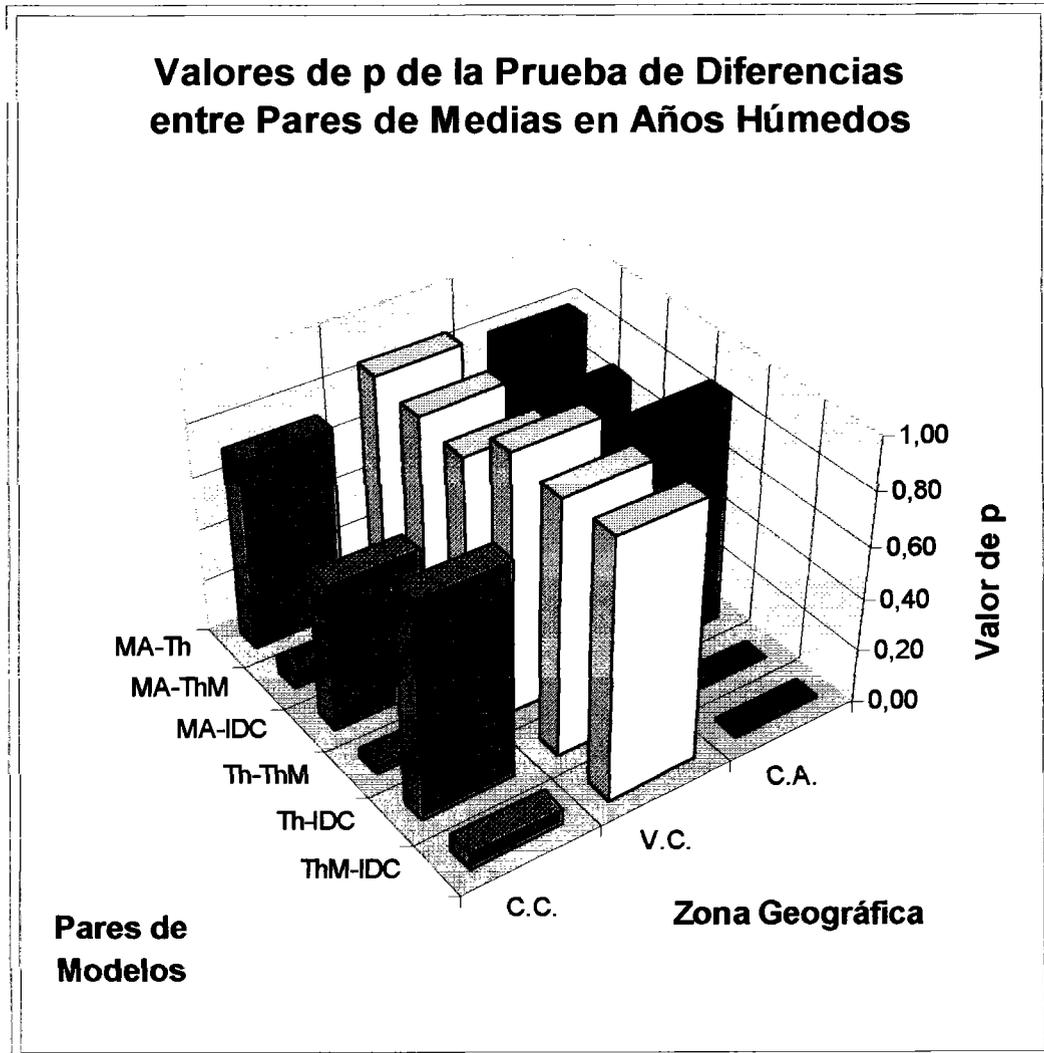


Fig. 8: Valor p de la Prueba de Hipótesis de Diferencias entre Pares de Medias para Años Húmedos.

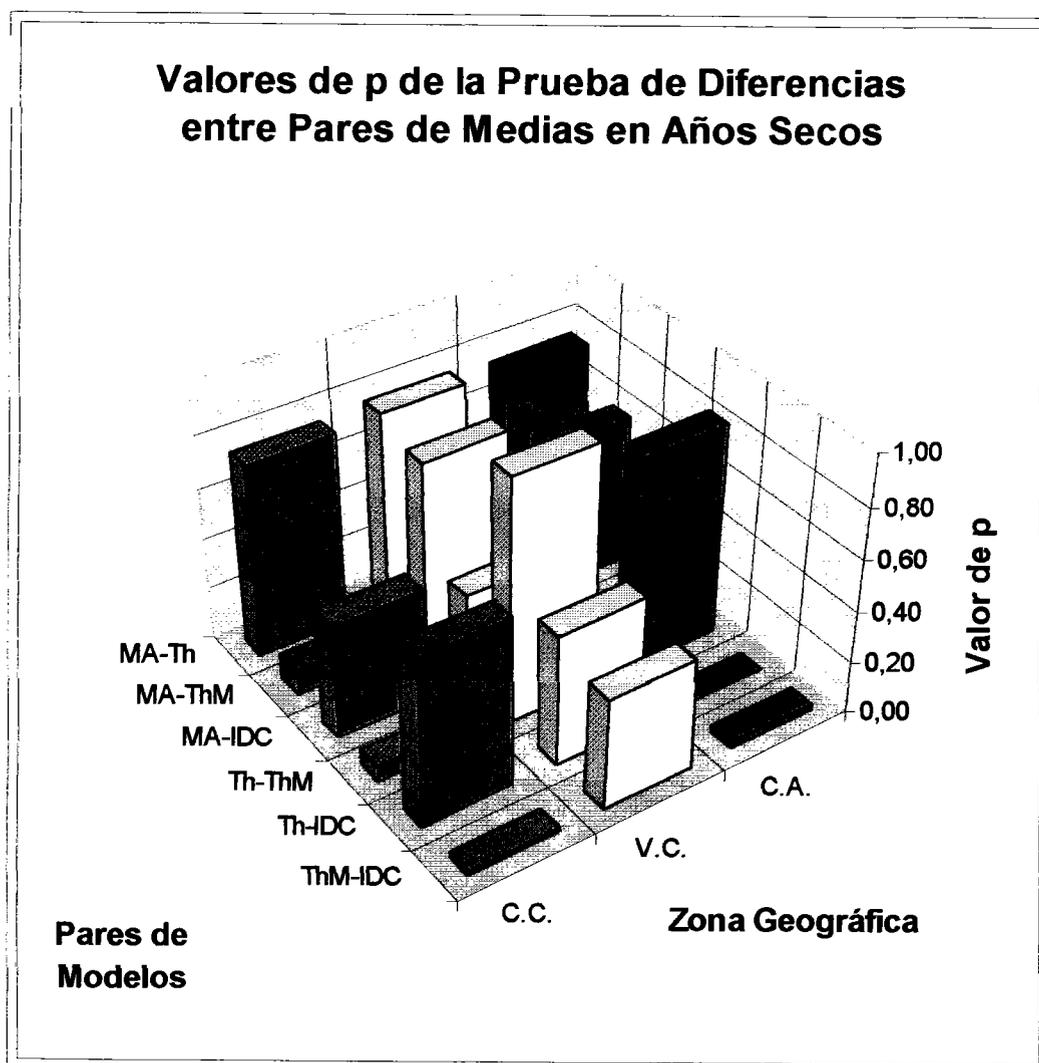


Fig. 9: Valor p de la Prueba de Hipótesis de Diferencias entre Pares de Medias para Años Secos.

7.2.2.3.- Test de Rangos Múltiples de Duncan.

En relación al Test de Rangos Múltiples de Duncan para las distintas zonas se destaca lo siguiente:

*** Valle Central.**

El Test Duncan, al igual que las anteriores pruebas, tampoco manifestó existencia de diferencias significativas entre las medias de los modelos en esta zona, lo que corrobora lo señalado por las pruebas anteriormente aplicadas.

*** Cordillera de la Costa.**

En relación a esta área, con el test de rangos múltiples las diferencias se presentan sólo al 5% (no al 1%) y entre las comparaciones de las medias de los modelos Th - ThM (A.H.) y ThM - IDC (A.H. y A.S.).

*** Cordillera de los Andes.**

En esta zona, el test de Duncan ratifica fuertemente las mismas diferencias ya presentadas por los tests anteriores, en todos los pares de datos comparados en que se encontraba IDC, incluso para el α de 1%, tanto en A.H. como en A.S.

Las tablas correspondientes a los resultados de las pruebas y tests estadísticos se pueden apreciar con mayor nivel de detalle en el Apéndice IX.

7.3.- Las Estaciones Meteorológicas o puntos de medición.

De acuerdo al número de estaciones meteorológicas existentes se aprecia que la cantidad de éstas a nivel regional no es la más adecuada. Producto de ello fue también que a partir de los años 1991-1992 se comenzó con las instalaciones de nuevos puntos de medición.

Asimismo y en relación a la información existente en la actualidad, se visualiza una carencia de estaciones en lo que respecta a las zonas más elevadas de la Cordillera de los Andes. Esto se debe a que las estaciones existentes se concentran en mayor número en la Precordillera Andina y en el Valle Central. Situación similar a la manifestada en los Andes, se observa en la zona occidental de la Cordillera de la Costa, no existiendo más de un par de estaciones, las que corresponderían a Constitución y Putú, ambas de reciente data y con falencias en sus primeros registros de mediciones.

7.4.- La Información Pluviométrica (cantidad y calidad).

Tal como se mencionó anteriormente, un número considerable de estaciones a nivel regional no posee una antigüedad superior a 10 años, lo que condiciona considerablemente la cantidad de datos disponibles.

Además, la principal dificultad que presentan las estaciones con registros de mayor magnitud en el tiempo es la existencia de lagunas (períodos sin datos), las que no dejan de ser considerables en algunos casos particulares. No se puede dejar de mencionar sí, que inversamente existen estaciones que poseen un registro de datos anuales superiores a los 50 años, pero son casos aislados que no permiten un análisis zonal con gran detalle.

En relación a la manifestación de problemas, en los registros de años con mediciones no se aprecian grandes incongruencias. Esto se debe también, en gran parte, a que a esta información posee un manejo preliminar por parte del organismo encargado (D.G.A.).

7.5.- Las Zonas Geográficas de estudio.

7.5.1.- El Valle Central.

En general, la aplicación de cualquiera de los cinco modelos para la Zona Central de estudio o Depresión intermedia, no presenta mayores inconvenientes, considerando de antemano la simplicidad y facilidad de aplicación que manifiesta la Media Aritmética (MA). Lo anterior se debería principalmente a la mayor homogeneidad orográfica que presenta esta parte del territorio regional.

7.5.2.- La Cordillera de la Costa.

En la Cordillera de la Costa la situación es similar a la del Valle Central, a excepción de los resultados obtenidos con el modelo de Thiessen Modificado (ThM). Cabe recordar que ésta fue el área geográfica de mayor extensión y menor número de estaciones (menor densidad de la red de medición), por lo cual también es aconsejable la utilización a futuro de los valores que vayan entregando las nuevas estaciones que existen en la zona,

cuya antigüedad actualmente es inferior a 6 años. Además, se debe considerar que las isoyetas empleadas en este modelo corresponden a las obtenidas del “Balance Hídrico de Chile - 1987” (MOP, DGA, 1988), por lo cual la actualidad (vigencia) de esta información puede no ser la ideal para el estudio, en comparación a la del resto de los modelos.

Asimismo, en áreas donde los montos precipitados no son muy excesivos, la existencia de isoyetas cada 100 mm no es la óptima, debido a que la zona de estudio sólo llega a contener una o dos de estas curvas, como aconteció en gran parte de la Cordillera de la Costa.

7.5.3.- Cordillera de los Andes.

Para el caso de la Cordillera de los Andes, la utilización de cualquiera de los métodos estimadores no manifiesta mayores inconvenientes a excepción del modelo del Inverso de la Distancia al Cuadrado (IDC), ya que éste presentó diferencias significativas con relación a las otras medias, en todas las situaciones en las cuales se comparó.

Tal vez en el caso de este modelo, IDC, sería importante considerar otro factor de ponderación, relacionado igualmente con la distancia o sumado a esto un factor de altitud o direccionalidad de la pendiente (exposición), debido a que la variabilidad que presentan, en pocos kms, las mediciones de la precipitación en las zonas más altas de esta cordillera, son magnitudes realmente notables en comparación a la de sectores cercanos al Valle Central o relativamente más planos.

Lo que sí es importante destacar, es la potencialidad que presenta este modelo (IDC) en relación a las estimaciones de precipitaciones basadas en sistemas de información geográfica, donde puede asignar fácilmente diversos valores según el punto o celda (pixel) que se considere, dentro una determinada superficie en análisis.

Para la situación de la Cordillera de los Andes, es importante mencionar que aunque la altitud en la cual se ubica una estación esté debidamente identificada, no siempre ésta representa a los sectores adyacentes a dicha estación, lo que se debería principalmente a que los lugares de medición se encuentran en lugares de relativo fácil acceso. Lo anterior sería

necesario tenerlo en consideración en la realización o ejecución de otros modelos que apliquen directamente un factor de altitud o altura sobre el nivel del mar.

7.6.- Las Series de Datos (A. S. y A. H.).

En general, los modelos se comportaron relativamente similares para ambas series de datos, años secos y húmedos, en todas las áreas de estudio.

Sólo se aprecian pequeñas variaciones entre A.S. y A.H. en la Cordillera de la Costa, cuando en el test de hipótesis de diferencias de medias se utiliza un valor de α cercano al 5% y, unido a ello, estas diferencias aparecen entre las parejas de medias en comparación que incluyen el modelo ThM. Esto queda de manifiesto al visualizar los valores de p respectivos, además de ser corroborado en la ejecución del test de Duncan entre las medias de Th y ThM, con un α de 0,05 (5%).

Algo similar a lo anterior ocurre para el caso en que aparece IDC en el Valle Central, pero en esta ocasión, debido a que los valores de α necesarios para constatar estas variaciones serían cercanos al 50%, no se aprecian disimilitudes más que al comparar los valores de p , de A.S. y A.H., en la prueba de hipótesis de diferencias entre pares de medias.

7.7.- Los Modelos y su ejecución práctica.

7.7.1- Media Aritmética.

Es un modelo de muy fácil aplicación y de mucha rapidez y simplicidad. Además, no necesita mayor información para su ejecución que la correspondiente a las mediciones puntuales de la precipitación y, dependiendo del número de valores en consideración, una calculadora o planilla electrónica para realizar dicho cálculo.

Las principales carencias de este modelo son que no considera características anexas que pueden influir de manera considerable en las precipitaciones, como podría ser la presencia de grandes cordones

montañosos, cercanía a océanos, condiciones atmosféricas predominantes en la región, entre otros.

Asimismo y relacionado a lo anterior, para tratar de minimizar la falencia que posee este método de estimación de la precipitación, es de suma importancia poseer una red de medición lo suficientemente densa y con una distribución relativamente homogénea de los aparatos de medición de acuerdo a las condiciones del terreno, sobre todo si éste es muy accidentado.

7.7.2.- Polígonos de Thiessen.

La aplicación de este método no presenta mayores complicaciones. Además de la información pluviométrica, requiere para su ejecución sólo la ubicación espacial de las estaciones. No requiere de una inversión excesiva de tiempo, ni de materiales. Debido a que se realiza una representación geométrica, los implementos necesarios para llevarlo a cabo son básicamente materiales de dibujo técnico, destacando la importancia de trabajarlo en una escala adecuada. Incluso algunos Sistemas de Información Geográfica (S.I.G.) llevan incorporado este modelo.

Entre las falencias de este método destaca el que sólo considera el posicionamiento de las estaciones y una superficie de influencia para cada una de ellas en forma plana, no considerando las diferencias topográficas que se pueden presentar en cada zona. Además, asume que la precipitación de la estación es la precipitación de la zona que representa geométricamente, lo cual no siempre es cierto.

Al ponderar o asignarles diferentes superficies a cada estación, hipotéticamente sus resultados deberían ser más precisos que el modelo anteriormente descrito, pero al igual que en éste también es de suma importancia la distribución y cantidad de puntos de medición por unidad de superficie.

7.7.3.- Isoyetas.

Las isoyetas son el modelo que presenta más laboriosidad, tanto en tiempo como en recursos materiales. Para su ejecución es necesario disponer

además de las mediciones de precipitación en los períodos de interés (ya sean anuales, mensuales u de otro intervalo) y de las respectivas ubicaciones de los puntos de observación, de las precipitaciones normales de cada estación, del material cartográfico correspondiente y de un conocimiento espacial y atmosférico lo más detallado posible de las áreas en las cuales se va a aplicar el modelo.

Si la zona es relativamente plana, las isoyetas se pueden distribuir más o menos homogéneas entre los puntos con mediciones, pero de no ser así se debe considerar una serie de factores, dando principal interés a los correspondientes a la topografía del lugar y la forma de manifestarse la precipitación (ciclónica, convectiva u orográfica) o su tipo (desde sólida a líquida).

Este modelo al considerar los factores de la zona y de las precipitaciones, debería ser el más exacto de los cinco modelos en estudio, pero, a la vez, tiene un alto grado de subjetividad dado por la experiencia y acceso a la información que posea el técnico encargado de la construcción de las correspondientes isoyetas.

7.7.4.- Thiessen Modificado.

Thiessen Modificado es una mezcla de los modelos Polígonos de Thiessen e Isoyetas. Sus resultados debieran ser de bastante exactitud. Entre la información que necesita para su puesta en práctica, además de la básica ya mencionada en el método de Thiessen, está la existencia previa de las isoyetas correspondientes a las áreas de aplicación. Este requisito anterior condiciona bastante al modelo, debido a que su exactitud va a depender fuertemente de la calidad de esta información pluvial, ya sea en el grado de semejanza a la realidad que posean o en la cantidad de datos utilizada en su construcción, entre otros aspectos.

Un inconveniente que presenta Thiessen Modificado, al igual que Thiessen, es que una variación en la cantidad o ubicación de las estaciones meteorológicas, conlleva la realización de una nueva representación gráfica y, por ende, actualizar las mediciones de superficies de los polígonos, con todos los inconvenientes y nuevos cálculos asociados que ello demanda.

7.7.5.- Inverso de la Distancia al Cuadrado.

Este modelo es el más actual o de uso masivo más reciente entre los que se han analizado. Su importancia radica en la fácil aplicación para su utilización en un sistema de información geográfica, al requerir estimaciones en distintos puntos sobre una rejilla o serie de celdas ubicadas espacialmente. En este contexto, este modelo sería similar a la media aritmética, pero con el agregado de una ponderación por la distancia entre el punto respectivo y los sitios de medición. Dicha ponderación, al tener un factor cuadrático en el distanciamiento, recibe una influencia bastante fuerte del monto medido de las estaciones más cercanas y al considerar una serie o variedad de puntos de estimación, como sería en un S.I.G., puede formar lo que se denomina “bull’s eyes” (Lynch, 1998) o fuertes concentraciones concéntricas de los montos estimados en torno a las estaciones.

La información necesaria para la realización de este método no va más allá de poseer la ubicación exacta de los puntos de medición, además de la respectiva información pluvial. Para facilitar su ejecución, es preciso tener una representación esquemática de la distribución espacial de las estaciones.

Entre los inconvenientes que se vislumbran, está el que IDC sólo considera distancias, pero no considera la direccionalidad de la precipitación, la cual a su vez puede ser influida por condiciones tanto del terreno como ambientales (atmosféricas) u otras. Además, su estimación va a depender importantemente del posicionamiento (separación) que tengan las estaciones en la respectiva zona.

Sería interesante además realizar pruebas con otros factores exponenciales, no sólo al cuadrado, dependiendo del lugar de aplicación y relacionado a la altitud de los puntos, porque en zonas donde las variaciones orográficas son considerables como la Cordillera de los Andes, las estimaciones no parecen ser de las mejores. Se debe tener en cuenta que en sitios con grandes desniveles las diferencias de precipitaciones en pocos kilómetros son realmente considerables.

7.7.6.- Los cinco modelos.

Dado que los cinco modelos son utilizados para calcular precipitaciones medias areales anuales, no estiman valores sobre o bajo los existentes en las respectivas estaciones utilizadas, es decir, no tienen un efecto extremo en las estimaciones. Esto no siempre ocurre al realizar estimaciones de precipitación con otro tipo de modelos como serían las regresiones. Dado que dependiendo de los factores y variables que incluyan este tipo de modelos sí se podría llegar a obtener valores de precipitaciones, para una zona determinada, superiores a los que presentan las estaciones ubicadas en dicho sector o incluso matemáticamente podrían llegarse a dar valores negativos.

7.8.- La Comparación de los modelos.

Lo que es notable de destacar es la fuerte semejanza existente entre los resultados asociados a los modelos de la Media Aritmética y Thiessen, siendo éstos los únicos dos modelos que nunca presentaron diferencias entre sus medias.

En la aplicación de los modelos se debe considerar además, la facilidad y rapidez que presenta el modelo de la Media Aritmética (MA) en relación al resto, por lo cual, y en función de los resultados obtenidos a través de las comparaciones realizadas, su utilización en un determinado estudio no debería presentar inconvenientes. De los resultados también se puede inferir que este modelo presenta buenas estimaciones cuando los puntos de medición se distribuyen uniformemente sobre el área y sus mediciones no varían de manera considerable de la media.

Caso análogo al anterior presentan los Polígonos de Thiessen (Th), principalmente en terrenos no montañosos, ya que el modelo no considera de manera directa las influencias de la orografía sobre la lluvia. El planteamiento de este modelo asigna la precipitación de la estación más cercana a los puntos dentro de cada polígono, por lo que hipotéticamente debería ser más exacto que la Media Aritmética. Pero Th presenta el inconveniente de no poseer flexibilidad, al ser necesario construir una nueva serie de polígonos cada vez que se cambie la posición de una estación o se instale una nueva, así como en el caso de no existir mediciones en alguna de las estaciones para un período específico, ni puedan ser éstas completadas.

En el caso de la Cordillera de los Andes, en forma porcentual, los resultados más cercanos al promedio de los cinco modelos fueron las isoyetas. Se debe considerar sí, el trabajo anexo que implica la realización de las isoyetas y que en gran medida están condicionadas por la capacidad y experiencia de personal técnico que las realizan. Unido a ello, la realización de este método es, en general, aconsejable para períodos superiores a un año ya que no se justifica construirlas para períodos demasiado cortos.

También se debe considerar que la exactitud en la construcción de las isoyetas, está en gran medida relacionada a la cantidad y distribución de los puntos que registran la precipitación en el lugar geográfico de estudio, ya que una red de pluviómetros lo suficientemente densa y una separación espacial relacionada con las características orográficas es primordial. Lo anterior (densidad de estaciones) no se dio para el caso de la Cordillera de la Costa, en la presente investigación, pero esto se vio compensado con la no existencia de gran variabilidad entre los valores de las mediciones de dicha zona.

La existencia de isoyetas previas a la realización de un estudio hidrológico, predispone la aplicación del método de Thiessen Modificado (ThM), pero es importante la consideración de la vigencia o actualidad que tengan dichas curvas, así como la cantidad de valores, de preferencia anuales, utilizados en su construcción. Además, es relevante o incluso en algunos casos primordial, disponer de éstas en la escala y equidistancia adecuada a los objetivos de la investigación que se realiza.

Inverso de la Distancia al Cuadrado (IDC) fue el modelo que manifestó las mayores diferencias en comparación a los demás modelos, principalmente en la zona andina. Como se apreció en las diferentes zonas, en sectores planos sus estimaciones son bastante semejantes al resto, pero al emplearse en terrenos quebrados fue el que manifestó las menores estimaciones entre los cinco modelos. No se debe dejar de tener en consideración, a la vez, que es uno de los más simples en su aplicación, junto a la Media Aritmética.

Aunque sus estimaciones no fueron las más óptimas, un modelo de este tipo y simplicidad depende fuertemente de una alta densidad de puntos de medición sobre todo si el terreno es poco homogéneo. Unido a ello, se debe considerar que, en general, en un sector como lo es la Cordillera de los Andes, las estaciones pueden no estar ubicadas en lugares muy representativos de todos los niveles pluviales existentes.

8.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

8.1.- Conclusiones.

La investigación llevada a cabo permite concluir lo siguiente.

- 1.- La utilización de los modelos estimadores de precipitaciones areales presenta notables diferencias, tanto en lo relacionado a la complejidad y laboriosidad de cada uno en particular, como en los requisitos necesarios para su aplicación.
- 2.- Sí existen, al parecer, notables diferencias entre los distintos modelos aplicados para la estimación de la precipitación areal media, dentro de algunas zonas de la VII Región del país, asociadas éstas a sus posiciones longitudinales con su respectiva situación orográfica y de altitud.
- 3.- De los cinco métodos, el que más diferencias presentó es el Inverso de la Distancia al Cuadrado (IDC), tanto para las 3 situaciones en análisis como para las dos series de datos consideradas.
- 4.- Los modelos analizados, presentan algunas estimaciones que están condicionadas por la cantidad de precipitación sobre o bajo la normal, es decir, existen leves diferencias para un mismo modelo y área geográfica entre las estimaciones con los datos de Años Húmedos y los de Años Secos, lo que es más notorio en zonas relativamente planas, como el Valle Central, que en zonas montañosas.
- 5.- En el caso de la Cordillera de la Costa, para Años Secos no existen grandes diferencias significativas entre los distintos modelos y la variación porcentual máxima alcanza al -9,0% con el modelo de Thiessen Modificado (ThM).
- 6.- En la Cordillera de la Costa para Años Húmedos, se manifiesta una leve diferencia entre Thiessen Modificado (ThM) y la totalidad del resto de los modelos en análisis.

- 7.- Para el Valle Central en Años Secos, no existen diferencias significativas entre los modelos y la mayor diferencia porcentual en relación la media general la presenta el modelo Inverso de la Distancia al Cuadrado (IDC) con un -4,3%.
- 8.- Para el Valle Central en Años Húmedos, no se vislumbran diferencias entre los modelos, siendo la variación mayor de sólo un 1,0% con el modelo Media Aritmética (MA).
- 9.- En la situación de la Cordillera de los Andes para Años Secos, sí existen diferencias significativas entre los modelos originadas por la presencia del modelo Inverso de la Distancia al Cuadrado (IDC) y con variaciones porcentuales de -15,7% frente al promedio de los cinco modelos.
- 10.- Para el caso de la Cordillera de los Andes en Años Húmedos, sí se presentan diferencias significativas entre el modelo Inverso de la Distancia al Cuadrado (IDC) y todos los demás modelos; su variación porcentual en estas condiciones alcanza al -14,8%.
- 11.- Basándose en lo descrito en las conclusiones 5 y 6, para la zona de la Cordillera de la Costa en Años Secos y Húmedos, no es aconsejable la estimación de las precipitaciones areales empleando el modelo de Thiessen Modificado, ya que sus resultados presentan variaciones con respecto al resto de los modelos.
- 12.- En función de las conclusiones 7 y 8, se puede concluir que para la zona longitudinal del Valle Central en la región, en Años Secos y Húmedos, la utilización o aplicación de cualquiera de los 5 modelos en estudio es relativamente indiferente en cuanto a sus resultados.
- 13.- De acuerdo a las conclusiones 9 y 10, en la Cordillera de los Andes, para ambas series de datos pluviales, el modelo Inverso de la Distancia al Cuadrado presenta notorias diferencias, con un valor de significancia muy extremo, en relación a los demás promedios, por lo cual se concluye que este modelo manifiesta deficiencias en estas condiciones frente a los otros modelos.
- 14.- La Hipótesis de Trabajo planteada sólo logró ser corroborada parcialmente, dado que en la mayoría de los modelos comparados y en las distintas situaciones aplicadas no se detectaron diferencias significativas.

15.- Finalmente, como conclusión se puede plantear que el método más recomendable para la VII Región de Chile es Polígonos de Thiessen (Th), ya que en el presente análisis comparativo manifestó resultados bastantes aceptables dentro de la generalidad de situaciones, al igual que la Media Aritmética, pero Th además agrega en su formulación un factor externo relacionado a la superficie adyacente a cada estación.

8.2.- Recomendaciones.

Como guía para posteriores investigaciones a realizar a nivel regional, donde sea necesario disponer de los montos precipitados sobre una determinada superficie, y considerando los modelos analizados en el presente estudio se puede recomendar:

- No se aconseja la utilización del método del Inverso de la Distancia al Cuadrado (IDC) en terrenos que presenten mediciones de precipitaciones elevadas y con gran variación entre las mismas en las diversas estaciones o puntos de medición, como sería el caso de la Cordillera de los Andes. Ello, si la densidad de la red de medición no es lo suficientemente elevada, debido a que este método tiende a subestimar los valores pluviales areales (en comparación al resto de los modelos estudiados en la presente investigación).
- Dado que la utilización de los modelos está condicionada principalmente por dos grandes factores, las condiciones del área de aplicación y los datos puntuales de las mediciones, en una zona como la Depresión Intermedia, donde se aprecia cierta homogeneidad en dichos aspectos, se recomienda el empleo de cualquiera de los modelos comparados. Lo que se justifica con la no presencia de inconvenientes en relación a sus resultados, no así en cuanto a los requisitos particulares necesarios para cada aplicación.
- Referente a la Cordillera de la Costa y en relación a la necesidad a futuro de la estimación de las precipitaciones areales en algún estudio en particular, donde no sea primordial disponer de registros demasiado extensos en el tiempo, es aconsejable la utilización de un mayor número de estaciones meteorológicas, empleando para ello, en lo posible, aquellas de más reciente data. De todas formas, para esta área geográfica, se recomienda aplicar cualquiera de los modelos comparados a excepción de Thiessen Modificado.

- También es recomendable a nivel regional continuar con la instalación de nuevos puntos de medición, situación que comenzó durante los primeros años de la presente década. Esto, sobre todo en las áreas donde existe mayor carencia de ellos, como sería la zona costera occidental y la alta cordillera andina, y donde las variaciones (temporales y espaciales) son más extremas y los montos precipitados son más elevados.

A modo de resumen, se puede mencionar que la selección del método o modelo más adecuado para la estimación de la precipitación areal debe tener en consideración los siguientes factores:

- * La distribución espacial y temporal de la precipitación.
- * La densidad y distribución de la red de medida de la precipitación (estaciones pluviales) en función de la zona geográfica en estudio.
- * La disponibilidad de datos, incluyendo cantidad y calidad.
- * La posibilidad de realización o ejecución práctica del modelo.

Finalmente, se recomienda continuar con las investigaciones sobre este tipo de variables hídricas, como se realizó en el presente estudio con la precipitación, dado que así, con un conocimiento más detallado del territorio nacional y sus condiciones asociadas, se puede obtener una visión más precisa en la cantidad de las precipitaciones aportadas y, por consiguiente, una mejor capacidad de gestión de los recursos tanto hídricos como naturales y ambientales en general.

9.- BIBLIOGRAFÍA.

- ABTEW, W., OBEYSEKERA, J. y SHIH, G. 1995. Spatial variation of daily rainfall and network design. (Resumen). Agricultural Abstracts: 92-96.
- ACEITUNO, P. 1996. Análisis comparativo de la predictibilidad estacional de la precipitación en la región subtropical de América del Sur. (Resumen). Universidad de Chile. Santiago. Chile. Internet.
- ACEITUNO, P. 1996. Predictibilidad estacional de anomalías pluviométricas y térmicas de las regiones norte y central de Chile. (Resumen). Departamento de Geofísica, Universidad de Chile. Santiago. Chile. Internet.
- ANÓNIMO. 1995. On the influence of the spatial distribution of rainfall and basin characteristics on basin run-off characteristics. (Resumen). Internet.
- AUSTIN, A. 1982. Climatología. 2ª ed. Ediciones Omega S. A. Barcelona. España. 379 p.
- BARRY, R. y CHORLES, R. 1980. Atmósfera, tiempo y clima. 3ª ed. Ediciones Omega S. A. Barcelona. España. 395 p.
- CHOW, V., MAIDMENT, D. y MAYS, L. 1994. Hidrología Aplicada. Mc. Graw-Hill. Bogotá. Colombia. 584 p.
- CID, L., DAEZ, K., SEPÚLVEDA, R. y ALFARO, E. 1997. Propiedades distribucionales y componentes estacionales de la precipitación sobre algunas regiones de las Américas. (Resumen). Departamento de Estadística, Universidad de Concepción. Concepción Chile. En: Taller "Variabilidad Climática Interanual: Métodos de Pronóstico e Impactos Asociados en Chile". Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Santiago Chile. Internet.

- DAVIS, S. y DE WIEST, R. 1971. Hidrogeología. Ediciones Ariel S. A. Barcelona. España. 563 p.
- E.S.R.I. 1996. ArcView GIS versión 3.0. The geographic information system for everyone. Enviromental Systems Research Institute (ESRI) Inc. California. USA. 350 p.
- FAURES, J. 1990. Sensitivity of runoff to small scale spatial variability of observed rainfall in a distribution model. University of Arizona. Tucson. USA. (Resumen). Master Abstracts 29/03. p. 425. 169 p.
- FERNÁNDEZ, F. 1995. Manual de climatología aplicada. Clima, medio ambiente y planificación. Síntesis S. A. Madrid. España. 285 p.
- FOGEL, M. 1981. Precipitation in the desert. In: Water in Desert Ecosystems. School of Renawable Natural Resources. University of Arizona. Tucson. USA. (Resumen). Shynthesis Series N° 11. pp. 219-234.
- FRANCKE, S. 1996. Elementos de ordenación de cuencas y conservación de suelos. Chile Forestal, Documento Técnico N° 101. CONAF. Santiago. Chile. 12 p.
- GANDULLO, J. 1994. Climatología y Ciencia del Suelo. Fundación Conde del Valle de Salazar, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Universidad Politécnica de Madrid. Madrid. España. 404 p.
- GAREN, D., JOHNSON, G. y HANSON, C. 1994. Mean areal precipitation for daily hidrologic modeling in mountainous regions. (Resumen). Agricultural Abstracts: 92-96.
- GONZÁLEZ, M. y GARCÍA, D. 1995. Restauración de ríos y riberas. Fundación Conde del Valle de Salazar, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Universidad Politécnica de Madrid. Madrid. España. 600 p.

- GOODRICH, D., FAURES, J., WOOLHISER, D., LANE, L. y SOROOSHIAN, S. 1995. Measurement and analysis of small-scale convective storm rainfall variability. (Resumen). Agricultural Abstracts: 92-96.
- GUJARATI, D. 1996. Econometría. 2ª ed. Mc Graw-Hill Latinoamericana. D. F. México. 597 p.
- HUFTY, A. 1984. Introducción a la climatología. Editorial Ariel S. A. Barcelona. España. 292 p.
- HUSAIN, T. 1989. Hidrologic uncertainty measure and network design. King Fahd Univ. of Petroleum & Minerals. Dhahran. Saudi Arabia. (Resumen). Water Resources Bulletin v 25 n 3 Jun-1989. p. 527-534.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR. 1985. Atlas geográfico de Chile. 1ª ed. Talleres Gráficos del Instituto Geográfico Militar. Santiago. Chile. 140 p.
- KAZMANN, R. 1974. Hidrología moderna. 2ª ed. Compañía Editorial Continental S. A. D. F. México. 20 p.
- LINSLEY, R., KOHLER, M. y PAULHUS, J. 1988. Hidrología para ingenieros. 2ª ed. Mc Graw-Hill Latinoamericana. D. F. México. 386 p.
- LLAMAS, J. 1993. Hidrología general. Principios y aplicaciones. Editorial Universidad del País Vasco. Bilbao. España. 635 p.
- LÓPEZ, F. s. a. El bosque en la restauración de cuencas torrenciales. Apuntes Dr. Ing. de Montes, Prof. Emérito Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Universidad Politécnica de Madrid. Madrid. España. 35 p.
- LÓPEZ, F., GARCÍA, J. y PIZARRO, R. 1995. El papel del bosque en la gestión de cuencas hidrográficas. Chile Forestal, Documento Técnico N° 93. CONAF. Santiago. Chile. 12 p.

- LÓPEZ, R., ATLAS, D., ROSENFELD, D., THOMAS, J., BLANCHARD, D., y HOLLE R. 1996. Estimation of areal rainfall using the radar echo area time integral. NOAA (National Severe Storms Laboratory and Weather Research Program) - NASA (Goddard Space Flight Center). (Resumen). Internet: Nov-1996.
- LUCERO, A. 1997. Análisis probabilístico espacial y temporal de las precipitaciones pluviales anuales de la VII región. Escuela de Ingeniería Forestal, Facultad de Recursos Naturales. Universidad de Talca. Talca. Chile. 69 p.
- LYNCH, S. 1998. Converting point estimates of daily rainfall onto a rectangular grid. Department of Agricultural Engineering, University of Natal. South Africa. Internet: Mar-1998. 10 p.
- LYNCH, S. y DENT, M. 1997. Estimating areal mean monthly time series of rainfall. Revised Paper (Originally published in: SANCIAHS-1991 y Water N°19-1993). Department of Agricultural Engineering and Computing Centre for Water Research, University of Natal. South Africa. Internet: Sep-1997. 8 p.
- LYNCH, S. y SCHULZE, R. 1997. Techniques for estimating areal daily rainfall. Department of Agricultural Engineering, University of Natal. South Africa. Internet: Jan-1998. 10 p.
- MENDENHALL, W. y REINMUTH, J. 1981. Estadística para administración y economía. Grupo Editorial Iberoamérica. D. F. México. 707 p.
- MINTEGUI, J. y LÓPEZ, F. 1990. La ordenación agrohidrológica en la planificación. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. Vitoria-Gasteiz. España. 306 p.
- MONTGOMERY, D. y RUNGER, G. 1996. Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería. Mc Graw-Hill Latinoamericana. D. F. México. 1009 p.

- MOP, DGA, Chile. 1988. Balance hídrico de Chile - 1987. Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas. Santiago. Chile. 50 p.
- MOPT, CEDEX, España. 1992. Metodologías y recomendaciones para la evaluación de recursos hídricos. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Ministerio de Obras Públicas y Transporte. Madrid. España. 52 p.
- NASA. s.a. Global precipitation estimates. (Resumen). Internet.
- NASA. s.a. Precipitation and convective systems. (Resumen). Internet.
- NASA. s.a. Regional rainfall climatologies. (Resumen). Internet.
- ONOF, C., y WHEATER, H. 1996. Modelling of the time-series of spatial coverages of British rainfall fields. (Resumen). Agricultural Abstracts: 92-96.
- PIZARRO, R. 1988. Elementos técnicos de hidrología II (Instructivos técnicos): Proyecto regional sobre uso y conservación de recursos hídricos en áreas rurales de América Latina y el Caribe. CONAF. IV Región. Chile. 109 p.
- ✕ - PIZARRO, R. 1993. Elementos técnicos de hidrología III. Proyecto regional mayor sobre uso y conservación de recursos hídricos en áreas rurales de América Latina y el Caribe. Universidad de Talca. Talca. Chile. 135 p.
- PIZARRO, R. 1996. Análisis comparativo de modelos matemáticos precipitación - escorrentía en cuencas de la España peninsular. Departamento de Ingeniería Forestal, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid. España. 320 p.
- REMENIERAS, G. 1971. Tratado de hidrología aplicada. Editores Técnicos Asociados S. A. Barcelona. España. 515 p.

- SALGADO, L. 1980. Apuntes de Hidrología. Departamento de Ingeniería Agrícola, Facultad de Ciencias Agropecuarias y Forestales. Universidad de Concepción. Chillán. Chile. 65 p.
- SHENG, T. 1992. Manual de campo para la ordenación de cuencas hidrográficas: Estudio y planificación de cuencas hidrográficas. Guía FAO: Conservación 13/6. Roma. Italia. 185 p.
- STOWHAS, L. 1998. La enseñanza de conocimientos en hidrología y ciencias afines. 9 p. In: Pizarro, R. (Ed.). Actas V jornadas de trabajo del Comité chileno para el Programa Hidrológico Internacional, P. H. I., de UNESCO. Talca, 3 y 4 de Julio de 1997. Enseñanza e investigación en los recursos del agua con vistas al siglo XXI. Universidad de Talca. Talca. Chile. p. (En Edición)
- TRAGSA y TRAGSATEC. 1994. Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión. Empresa de Transformación Agraria S. A. y Tecnologías y Servicios Agrarios S. A. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. España. 902 p.
- UNESCO, ROSTLAC. 1982. Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur. Oficina Regional de Ciencia y Tecnología de la Unesco para América Latina y el Caribe. Montevideo. Uruguay. 130 p.
- VANDEWIELE, G., XU, CH. y NI-LAR-WIN. 1992. Methodology and comparative study of monthly water balance models in Belgium, China and Burma. Vrije Universiteit. Brussels. Belgium. (Resumen). Journal of Hidrology v 134 n 1-4 , Jun-1992. p 315-347.

APÉNDICES

APÉNDICE I

Ubicación Geográfica y Precipitaciones Normales de
las Estaciones Pluviométricas y Croquis con la
Posición de las 17 Estaciones Seleccionadas.

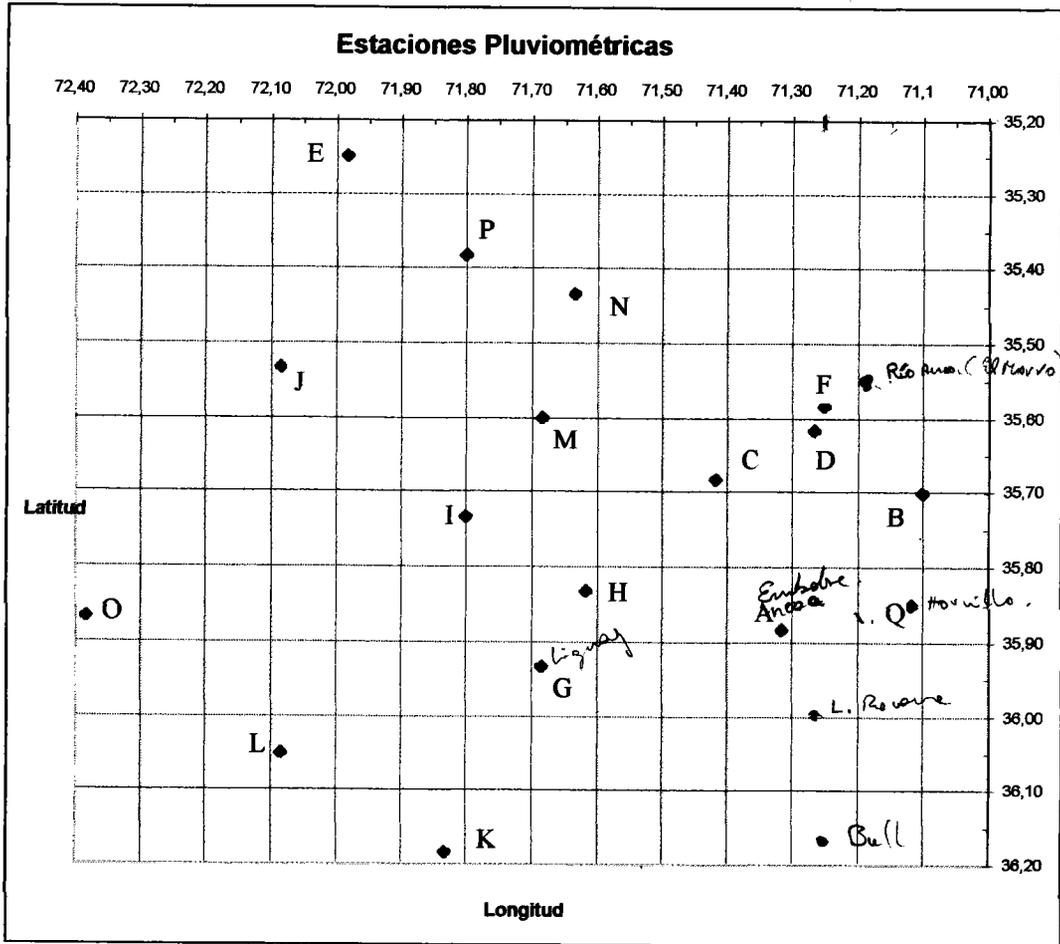
Tabla N° 1: Estaciones Pluviométricas, Ubicación Geográfica (en grados y minutos) y Precipitaciones Normales.

ESTACIÓN	LONGITUD (° / min)	LATITUD (° / min)	ALTURA (m.s.n.m.)	Promedios Normales (mm)	Cord. Costa	Valle Central	Cord. Andes
Ancoa E.	71 / 19	35 / 53	410	1633,3			*
Armerillo	71 / 06	35 / 42	500	2392,8			*
Colbún	71 / 25	35 / 41	280	1041,2			*
Colorado	71 / 16	35 / 37	400	1406,6			*
Gualleco	71 / 59	35 / 15	80	827,0	*		
Hornillo	71 / 07	35 / 51	760	2213,0			*
Huapi	71 / 15	35 / 35	195	1025,5			*
Liguay	71 / 41	35 / 56	130	977,8		*	
Linares	71 / 37	35 / 50	140	880,3		*	
Melozal	71 / 48	35 / 44	90	765,5		*	
Nirivilo	72 / 05	35 / 32	215	851,0	*		
Parral	71 / 50	36 / 11	160	969,8		*	
Quella	72 / 05	36 / 03	135	736,4	*		
S. Javier	71 / 41	35 / 36	120	779,2		*	
Talca	71 / 38	35 / 26	110	643,8		*	
Tutuven E.	72 / 23	35 / 52	170	921,6	*		
Pencahue	71 / 48	35 / 23	115	603,6		*	
Total					4	7	6

Tabla N° 2: Estaciones Pluviométricas, Ubicación Geográfica (en grados) y Letra Símbolo utilizada en el Croquis de Ubicación.

ESTACIÓN	Letra (Croquis)	LONGITUD (°)	LATITUD (°)	ALTURA (m.s.n.m.)	Cord. Costa	Valle Central	Cord. Andes
Ancoa E.	A	71,32	35,88	410			Sí
Armerillo	B	71,10	35,70	500			Sí
Colbún	C	71,42	35,68	280			Sí
Colorado	D	71,27	35,62	400			Sí
Gualleco	E	71,98	35,25	80	No		
Hornillo	Q	71,12	35,85	760			Sí
Huapi	F	71,25	35,58	195			Sí
Liguay	G	71,68	35,93	130		Sí	
Linares	H	71,62	35,83	140		Sí	
Melozal	I	71,80	35,73	90		Sí	
Nirivilo	J	72,08	35,53	215	Sí		
Parral	K	71,83	36,18	160		No	
Quella	L	72,08	36,05	135	Sí		
S. Javier	M	71,68	35,60	120		Sí	
Talca	N	71,63	35,43	110		Sí	
Tutuven E.	O	72,38	35,87	170	Sí		
Pencahue	P	71,80	35,38	115		No	
Utilizadas				14	3	5	6
Total				17	4	7	6
Sí: La estación fue utilizada en cálculo de las Precipitaciones areales							
No: La estación no fue utilizada en cálculo de las Precipitaciones areales							

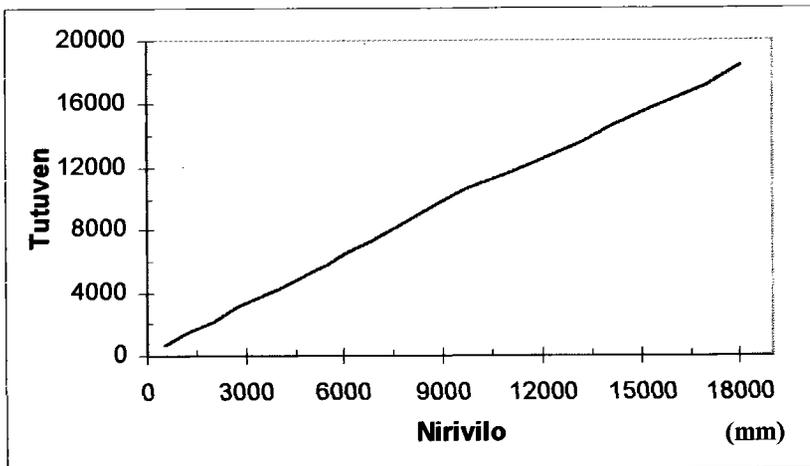
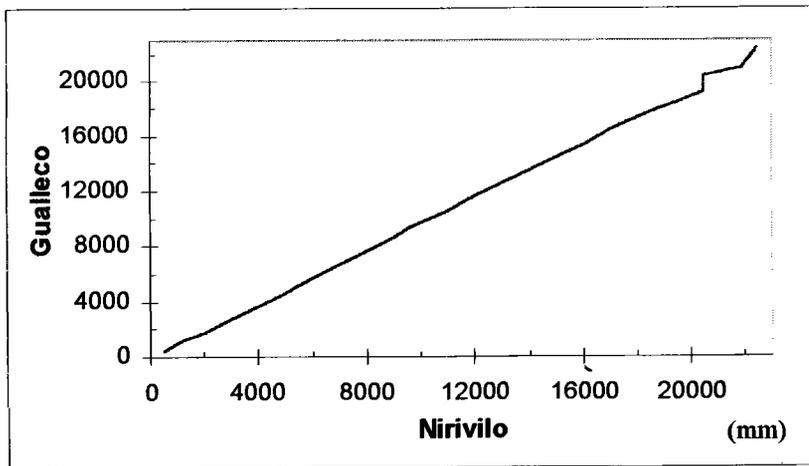
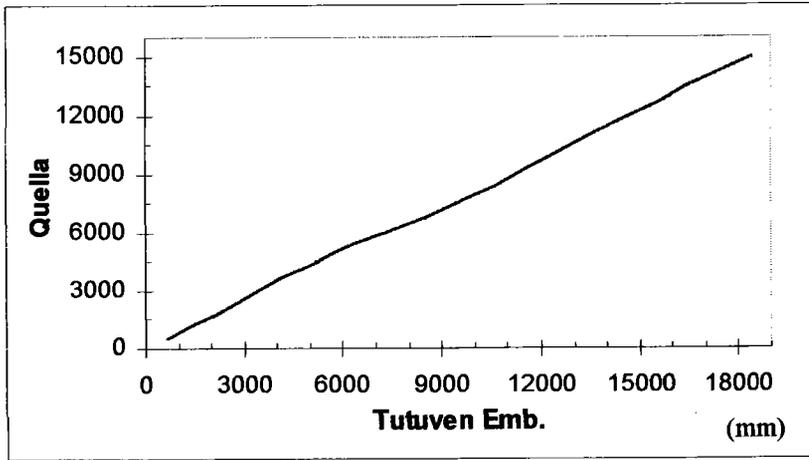
- Croquis de Ubicación de las 17 estaciones seleccionadas.

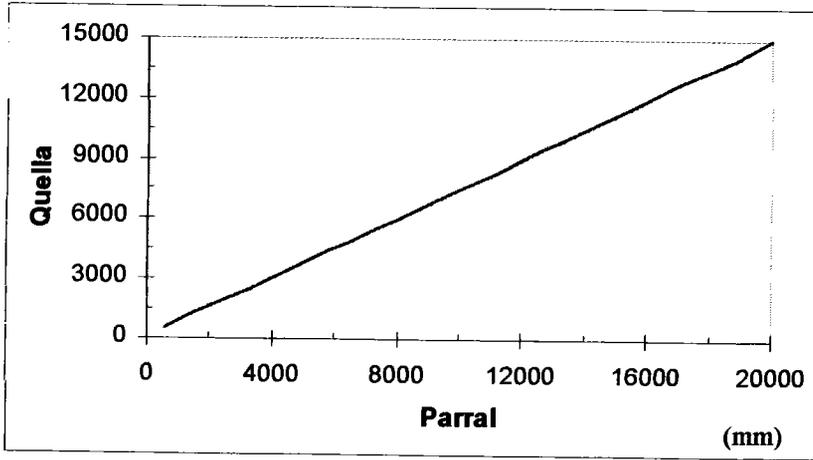


APÉNDICE II

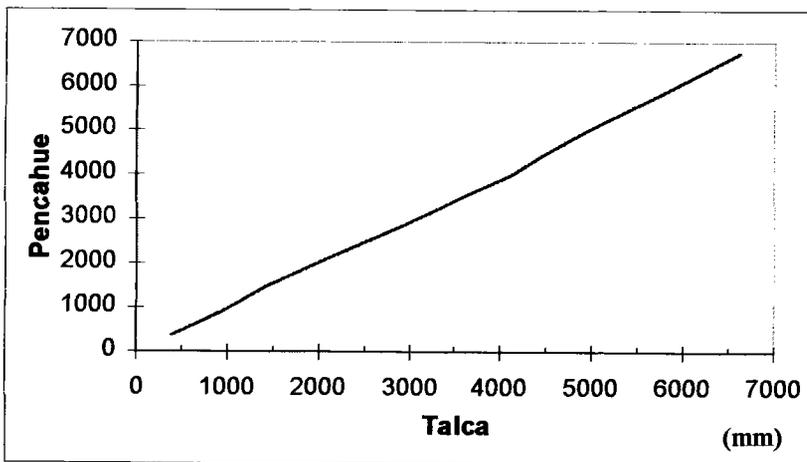
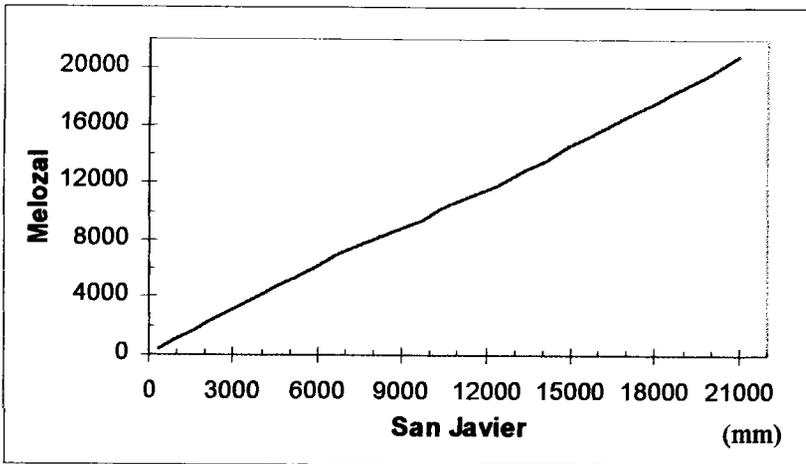
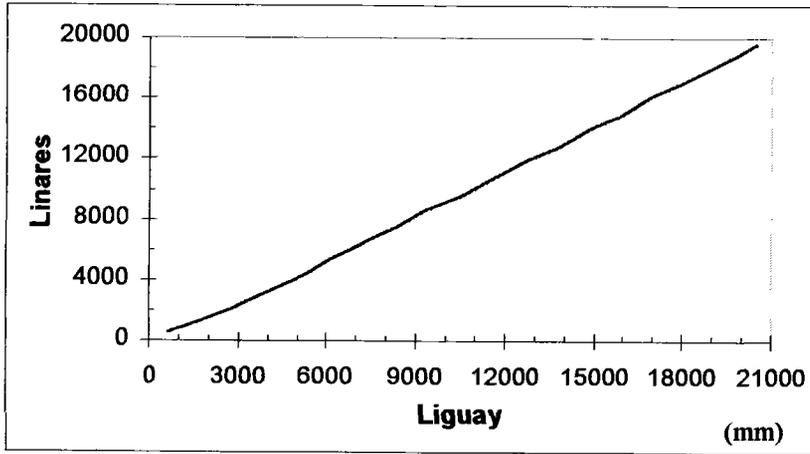
Gráfica de Consistencia entre Estaciones Vecinas
(Curvas Doble Acumuladas).

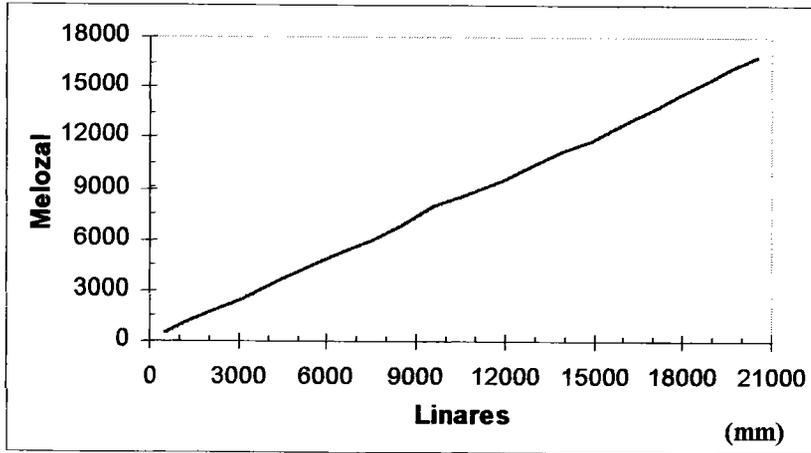
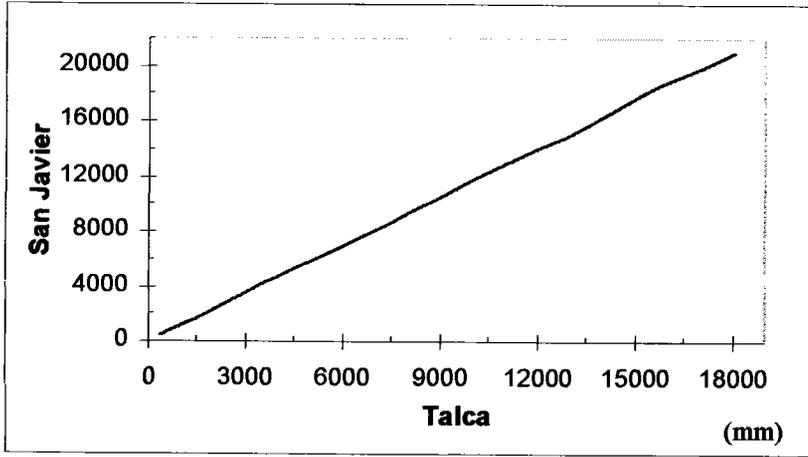
- Cordillera de la Costa.



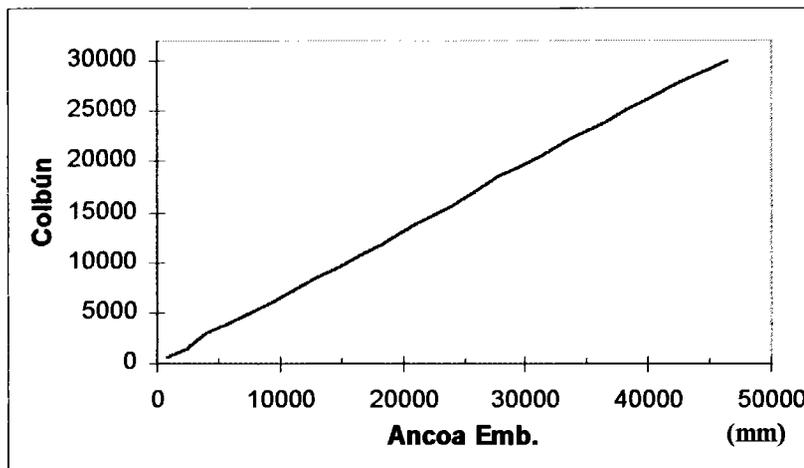
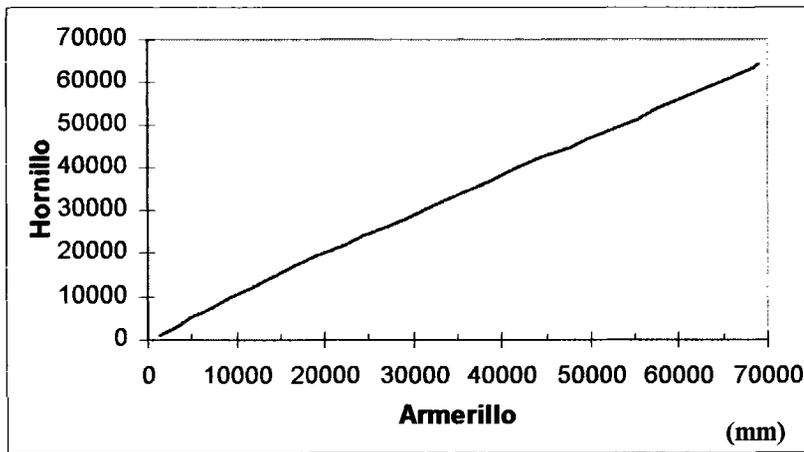
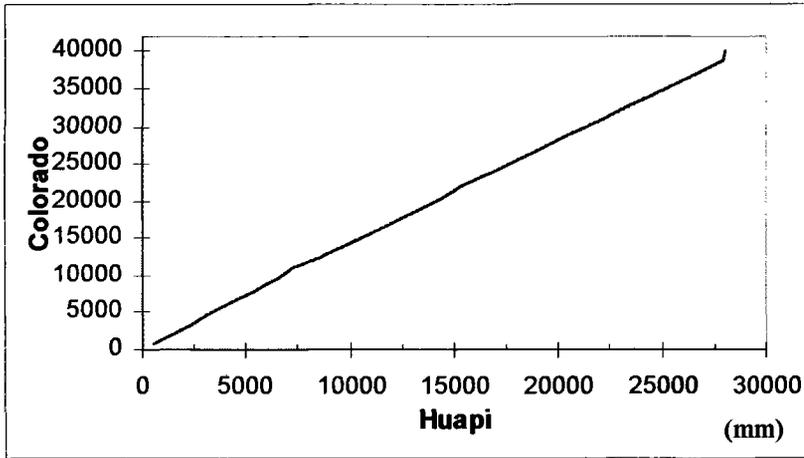


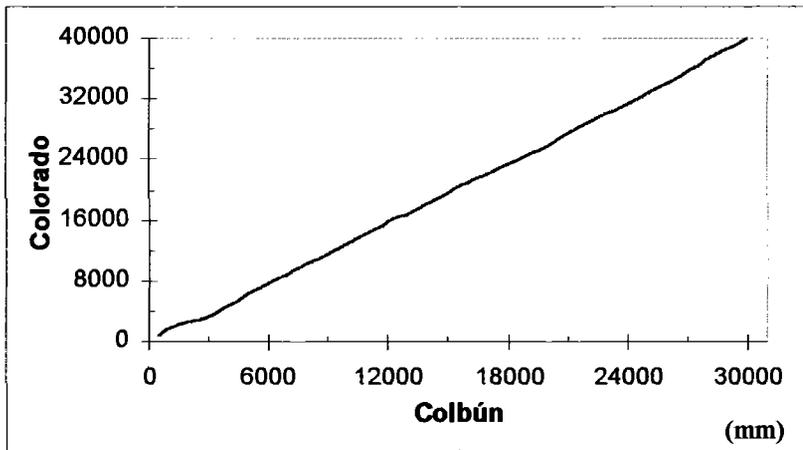
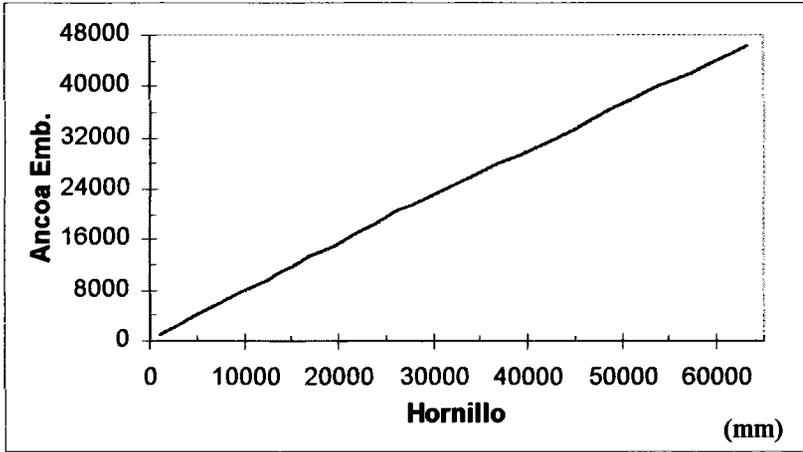
- Valle Central.





- Cordillera de los Andes.





APÉNDICE III

Superficies de las Zonas Longitudinales de Aplicación de los Modelos y de los Polígonos de Thiessen; Densidades y Distancias; Red Pluviométrica Óptima y Error asociado a la Red Actual según Llamas (1993) y Croquis de las Áreas de Estudio.

Tabla N° 3: Superficies de Influencia (Polígonos de Thiessen) y Distancias desde cada estación hasta el centro de cada zona geográfica.

ZONA LONGITUDINAL DE ESTUDIO	ESTACIÓN	SUPERFICIE DE INFLUENCIA (km ²)	DISTANCIAS AL CENTRO (km)	Letra
Cordillera de los Andes	Ancoa E.	423,46	17,6	A
	Armerillo	339,565	14,9	B
	Colbún	403,32	14,6	C
	Colorado	210,98	12,3	D
	Hornillo	363,92	18,4	F
	Huapi	261,075	16,7	E
Total		2002,32		
Valle Central	Liguay	432,8	28,0	A
	Linares	324,66	18,6	B
	Melozal	414,46	10,0	C
	S. Javier	575,28	9,1	D
	Talca	505,6	28,6	E
Total		2252,8		
Cordillera de la Costa	Nirivilo	1063,98	32,0	A
	Quella	1196,54	31,8	B
	Tutuven E.	732,36	16,6	C
Total		2992,88		

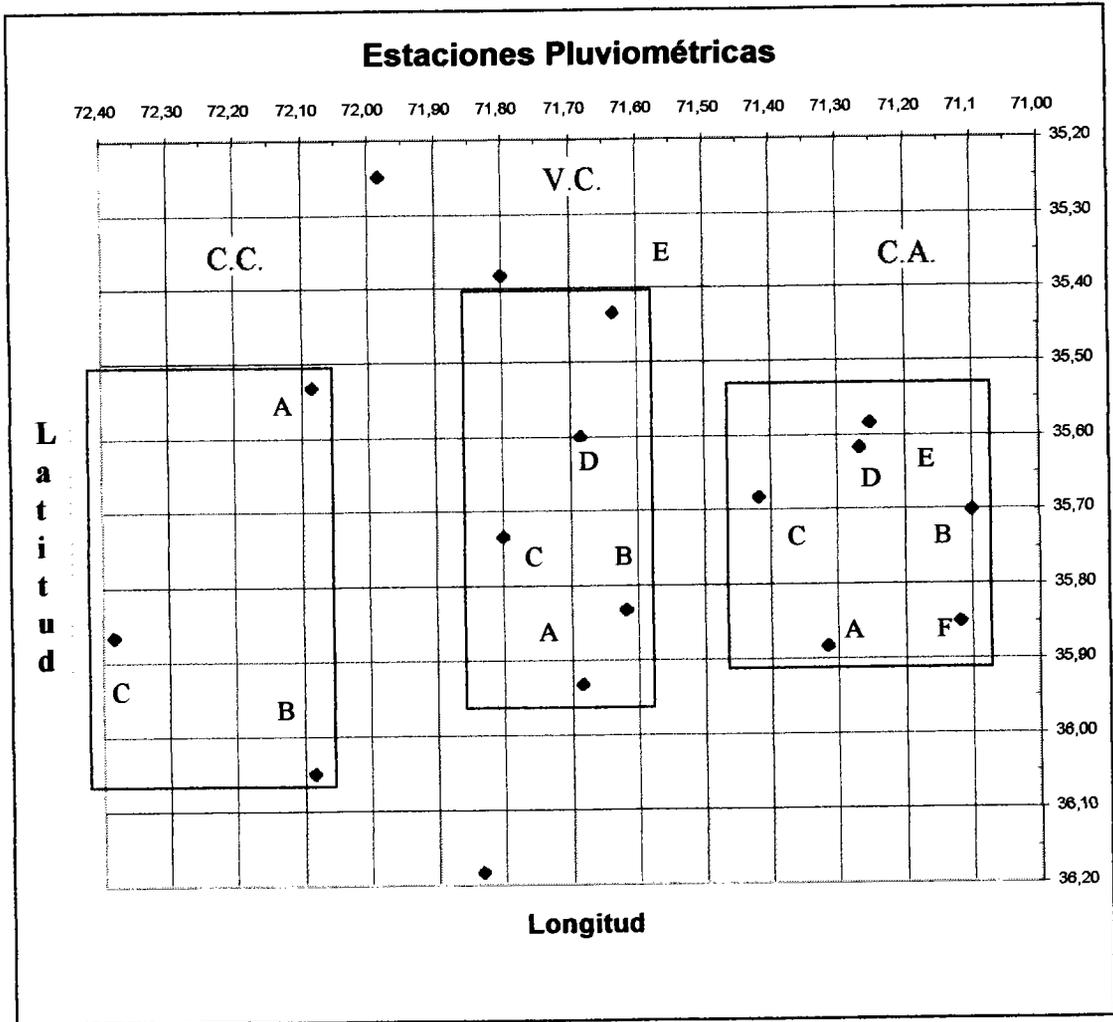
Tabla N° 4: Densidad Pluviográfica y Superficie por zona longitudinal.

Zona	Superficie (km ²)	Estación Pluviog. (cantidad)	Densidad (km ² / estac.)
C. Andes	2.000	6	333,3
V. Central	2.250	5	450,0
C. Costa	3.000	3	1.000,0
Total	7.250	14	517,9

Tabla N° 5: Red óptima obtenida por media aritmética y error asociado a la red actual, según Llamas (1993).

RED PLUVIOGRÁFICA						
Zona	Normales \bar{x} (mm)	Desv. St. S (mm)	Coef. Var. C.V. (%)	Error adm. p (%)	N° Estaciones	
					N	N
C. Costa	836,33	93,4671	11,1758	10	1,25	2
V. Central	809,32	126,143	15,5963	10	2,43	3
C. Andes	1618,73	580,175	35,8413	10	12,85	13
Zona	Normales \bar{x} (mm)	Desv. St. S (mm)	Coef. Var. C.V. (%)	N° Estac. N	Error adm. p (%)	
C. Costa	836,33	93,4671	11,1758	3	6,45	
V. Central	809,32	126,143	15,5963	5	6,97	
C. Andes	1618,73	580,175	35,8413	6	14,63	

- Áreas Longitudinales de Estudio.



APÉNDICE IV

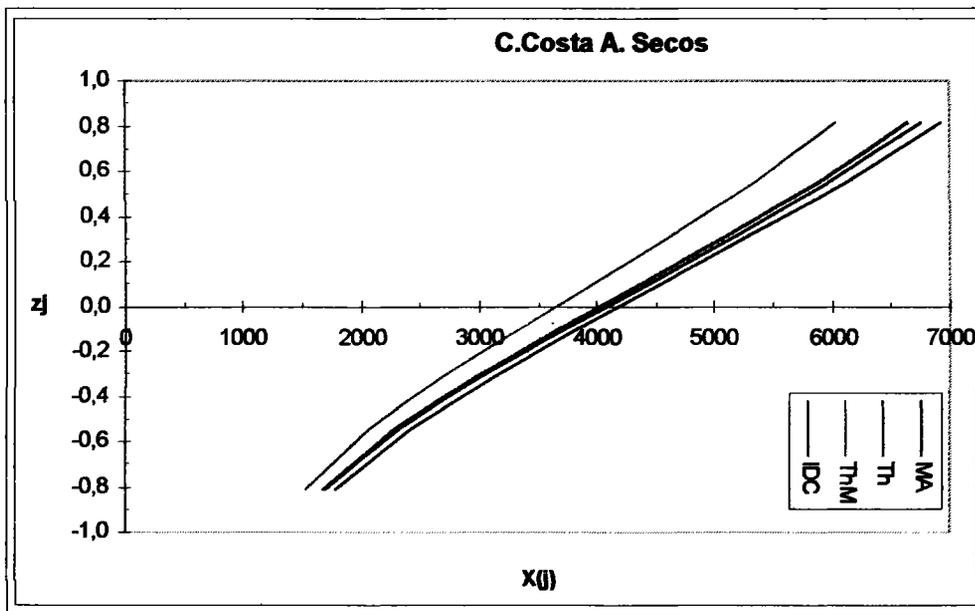
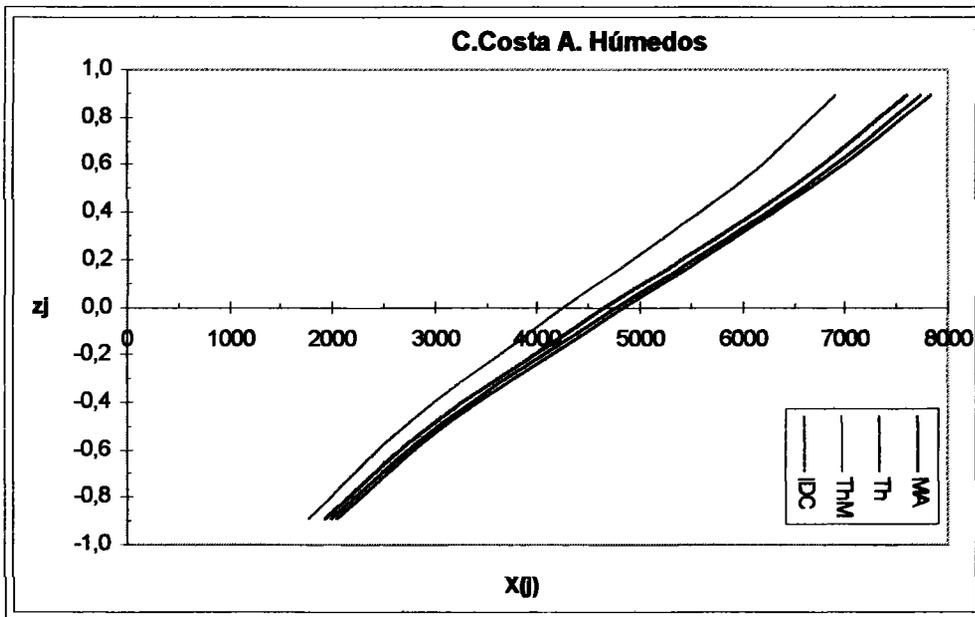
Series de Años Secos y Húmedos.

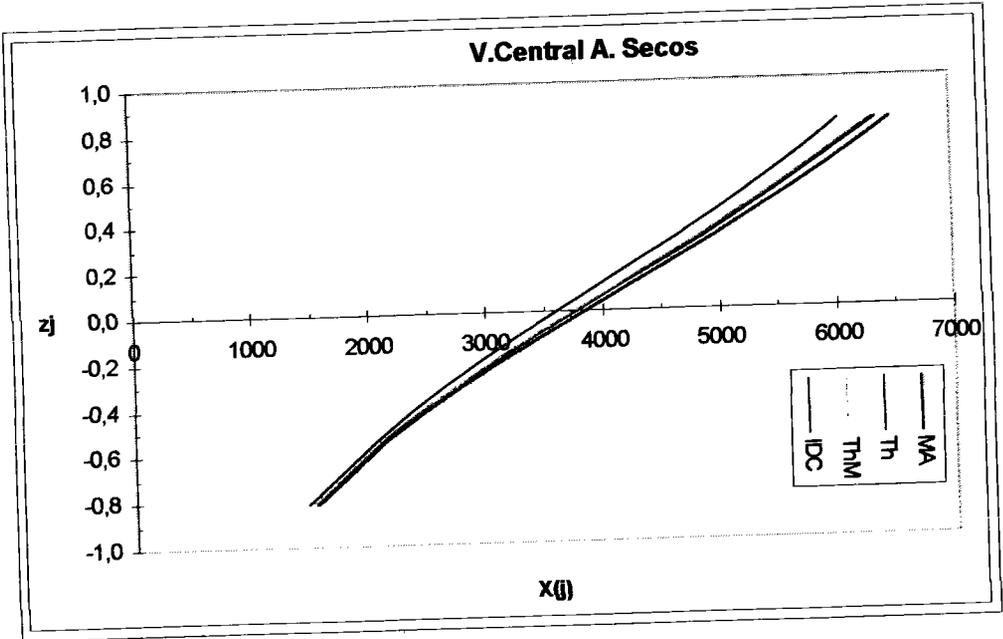
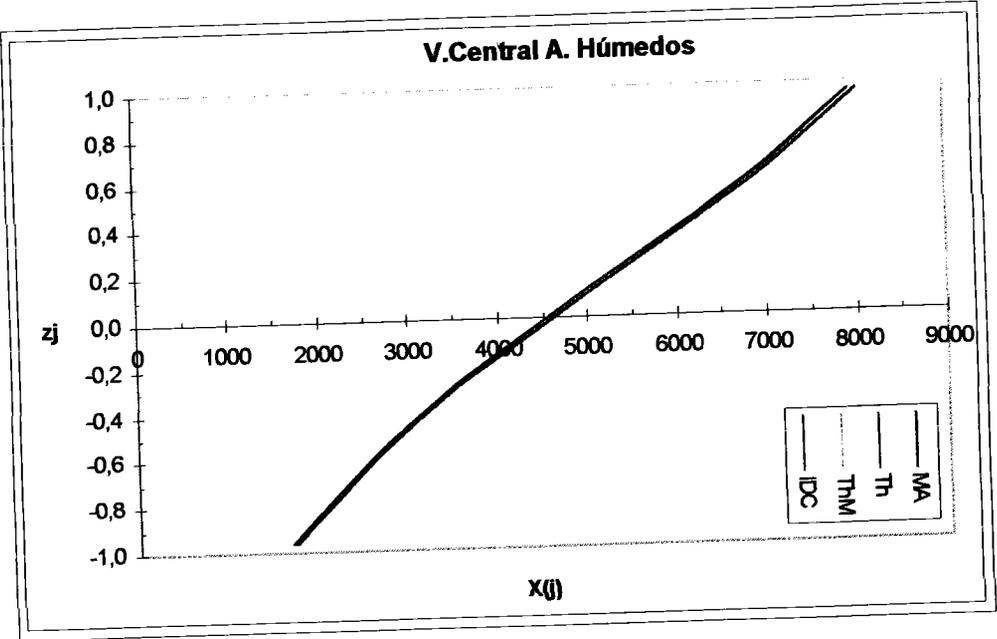
Tabla N° 6: Series de Años Húmedos y Secos, en relación a la Precipitación Normal.

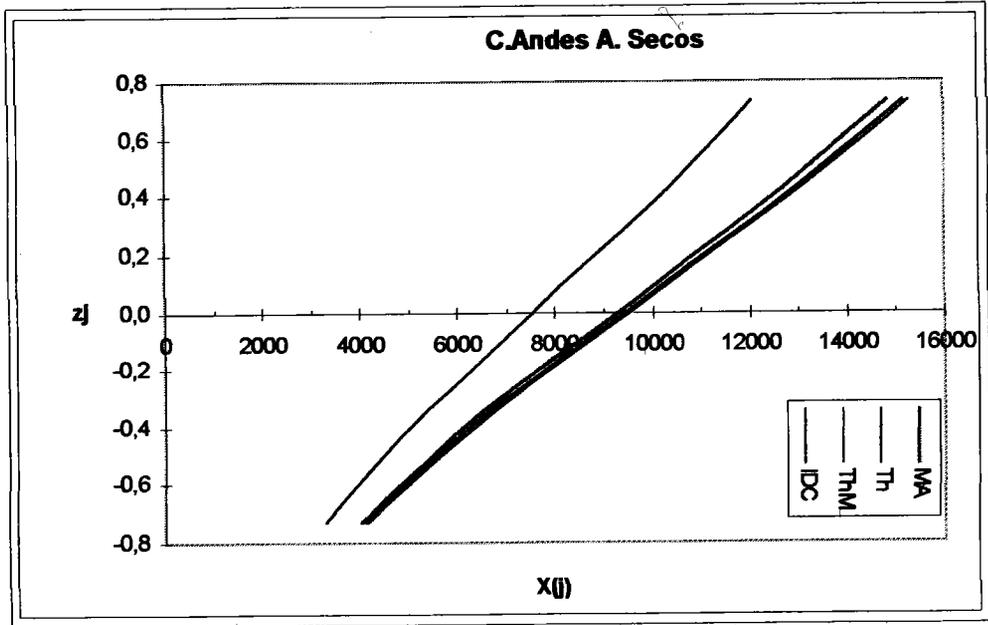
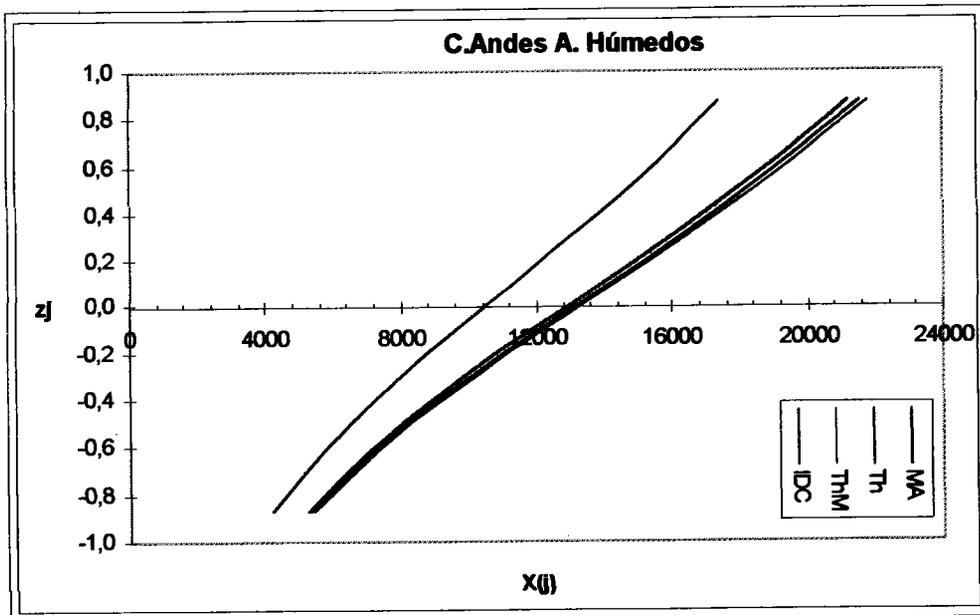
N°	Cordillera de los Andes			Valle Central			Cordillera de la Costa		
	AÑO	Años		AÑO	Años		AÑO	Años	
		Húmedos	Secos		Húmedos	Secos		Húmedos	Secos
1	1996		***	1996		***	1996		***
2	1995		***	1995		***	1995		***
3	1994		***	1994		***	1994		***
4	1993		***	1993		***	1993		***
5	1992	***		1992	***		1992	***	
6	1991	***		1991	***		1991	***	
7	1990		***	1990		***	1990		***
8	1989		***	1989		***	1989		***
9	1988		***	1988		***	1988		***
10	1987	***		1987	***		1987	***	
11	1986	***		1986	***		1986	***	
12	1985		***	1985		***	1985		***
13	1984	***		1984	***		1984	***	
14	1983		***	1983		***	1983		***
15	1982	***		1982	***		1982	***	
16	1981		***	1981		***	1981		***
17	1980	***		1980	***		1980	***	
18	1979	***		1979		***	1979		***
19	1978	***		1978	***		1978		***
20	1977	***		1977	***		1977	***	
21	1976		***	1976		***	1976		
22	1975	***		1975			1975		
23	1974	***		1974			1974		
24	1973		***	1973			1973		
25	1972	***		1972			1972		
26	1971		***	1971			1971		
27	1970		***	1970			1970		
28	1969		***	1969			1969		
Total		13	15		9	12		8	12

APÉNDICE V

Gráficos de Probabilidad Normal Acumulada.







APÉNDICE VI

Modelos Precipitación - Altitud, para las
Precipitaciones Normales y por Serie Extrema de
Datos, sin considerar zonas planas.
Perfil Pluviométrico empleado en Isoyetas.

Tablas N° 8 y N° 9: Ajustes de Modelos Precipitación (mm) vs Altitud (m.s.n.m.), primera aproximación utilizando las Precipitaciones Normales de todas las estaciones.

Resumen Modelos Precipitación (Normal), Altura (Altitud) y Longitud.

Regr. Simple: $x = \text{altura}$, $y = Pp$.

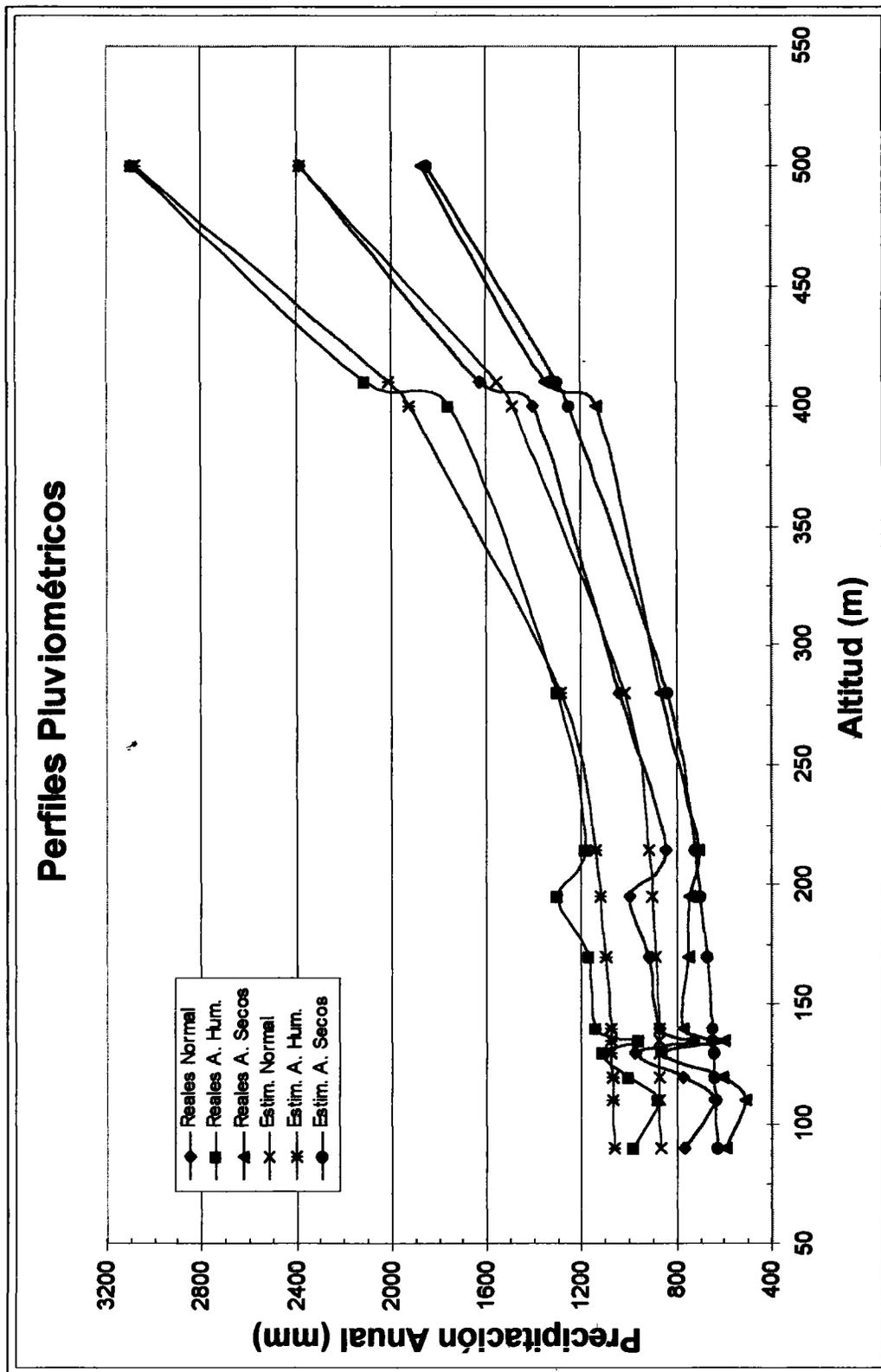
Modelo	Transformación	a	ln a	b	ln b	r	r ²	S.E.
$y = a + bx$		368,528		3,2423		0,920521	84,7358	181,688
$y = a + bx^2$		690,43		0,0059578		0,956976	91,5804	134,938
$y = a + bx^3$		781,401		1,231E-05		0,96966	94,0241	113,681
$y = a + bx^4$		820,937		2,553E-08		0,969123	93,9199	114,669
$y = a + b \cdot \ln x$		-2506,13		684,897		0,843134	71,0874	250,053
$y = ax^b$	$\ln y = \ln a + b \ln x$		3,99579	0,556798		0,875083	76,577	0,176291
$y = ab^x$	$\ln y = \ln a + x \cdot \ln b$		6,34944		0,0025539	0,925692	85,6906	0,137791

Regr. Múltiple: $x = \text{altura}$, $y = (73 - \text{longitud})$, $z = Pp$.

Modelo	a	b	c	d	r ²	r ² ajust.	S.E.	M.E.	Dur.-Wat.
$z = a + bx + cy$	295,825	3,10375	76,5423		84,9379	82,6207	187,294	135,29	0,998784
$z = a + bx^2 + cy$	704,702	0,0059991	-12,6039		91,5857	90,2911	139,988	109,285	1,374
$z = a + bx^3 + cy$	793,883	1,238E-05	-10,5208		94,0279	93,1091	117,936	87,2099	1,552
$z = a + bx^3 + cy + dw$	-3388,54	1,222E-05	7,93585	116,554	94,4295	93,0368	118,553	89,1125	1,68283
$z = a + bx^3 + cw$	-3328,98	1,227E-05	115,149		94,4274	93,5701	113,923	88,8622	1,71694

Tabla N° 10: Modelos Precipitación (mm) vs Altitud (m.s.n.m.), por serie de datos y sin utilizar zonas planas.

MODELOS PRECIPITACIÓN VS ALTURA (Altitud)							
		Tipo: $Pp = a + b * H^z$					
	Reales			Estimados			
Altitud	Normal	A. Húm.	A. Sec.	Normal	A. Húm.	A. Sec.	Estación
90	765,5	985,3	597,7	876,0	1068,3	640,0	Melozal
110	643,8	883,4	513,4	878,0	1071,8	645,9	Talca
120	779,2	1009,5	609,6	879,5	1074,3	649,7	San Javier
130	977,8	1119,4	871,5	881,4	1077,4	654,3	Liguay
135	736,4	966,0	602,1	882,5	1079,3	656,9	Quella
140	880,3	1144,0	774,2	883,8	1081,3	659,6	Linares
170	921,6	1173,1	754,0	894,7	1098,8	680,8	Tutuven
195	1025,5	1303,4	784,7	909,5	1121,7	705,2	Huapi
215	851,0	1188,2	709,2	926,3	1147,0	729,7	Nirivilo
280	1041,2	1303,2	872,7	1023,6	1288,0	846,8	Colbún
400	1406,6	1763,0	1138,2	1495,8	1928,7	1256,6	Colorado
410	1633,3	2113,3	1354,6	1560,3	2013,7	1304,6	Ancoa E.
500	2392,8	3096,6	1874,1	2391,5	3081,2	1851,1	Armerillo
760	2213,0	2802,6	1795,1	8972,4	10961,4	4910,9	Homillo
		zi	4	3,8	3		
		ai	874,443	1065,36	632,894		
		bi	2,43E-08	1,12E-07	9,75E-06		
		r ²	97,32	96,89	95,98		
		E.E.E.	87,40	116,75	85,06		
Validez		(m.s.n.m.)					
Mínimo		130					
Máximo		500					



APÉNDICE VII

Precipitaciones Areales Anuales.

APÉNDICE VIII

Isoyetas Medias Anuales, Superficies entre Isoyetas sucesivas y Precipitación Media Areal obtenida con las Isoyetas.

Tabla N° 14: Isoyetas Medias Anuales, Superficies entre Isoyetas sucesivas y Precipitación Areal Media por Isoyetas, para la Cordillera de la Costa.

CORDILLERA DE LA COSTA						
Años Húmedos			Años Secos			
Isoyeta Media	Superficie	Prom. * Superf.	Isoyeta Media	Superficie	Prom. * Superf.	
975	258	251550	575	105	60375	
1050	1070	1123500	650	1148	746200	
1150	824	947600	750	1596	1197000	
1250	518	647500	825	134	110550	
1350	269	363150				
Total	2939	3333300	Total	2983	2114125	
Porcentaje	97,97%		Porcentaje	99,43%		
Pp media		1134,16	Pp media		708,72	

* Los montos pluviales se encuentran en mm/año y las superficies en km².

Tabla N° 15: Isoyetas Medias Anuales, Superficies entre Isoyetas sucesivas y Precipitación Areal Media por Isoyetas, para el Valle Central.

VALLE CENTRAL						
Años Húmedos			Años Secos			
Isoyeta Media	Superficie	Prom. * Superf.	Isoyeta Media	Superficie	Prom. * Superf.	
850	298	253300	550	701	385550	
950	714	678300	650	702	456300	
1050	781	820050	750	466	349500	
1150	472	542800	850	376	319600	
Total	2265	2294450	Total	2245	1510950	
Porcentaje	100,67%		Porcentaje	99,78%		
Pp media		1013,00	Pp media		673,03	

* Los montos pluviales se encuentran en mm/año y las superficies en km².

Tabla N° 16: Isoyetas Medias Anuales, Superficies entre Isoyetas sucesivas y Precipitación Areal Media por Isoyetas, para la Cordillera de los Andes.

CORDILLERA DE LOS ANDES						
Años Húmedos			Años Secos			
Isoyeta Media	Superficie	Prom.*Superf.	Isoyeta Media	Superficie	Prom.*Superf.	
950	218	207100	750	336	252000	
1250	324	405000	900	376	338400	
1750	494	864500	1100	269	295900	
2250	512	1152000	1350	437	589950	
2750	378	1039500	1750	454	794500	
3100	59	182900	2100	137	287700	
Total	1985	3851000	Total	2009	2558450	
Porcentaje	99,25%		Porcentaje	100,45%		
Pp media		1940,05	Pp media		1273,49	

* Los montos pluviales se encuentran en mm/año y las superficies en km².

APÉNDICE IX

Resultados de las Pruebas Estadísticas.

Tabla N° 17: Test de Efectos de los Modelos.

* Test de Hipótesis: Efectos de los Modelos (Tratamientos).					
H₀: t1 = t2 = t4 = t5 = 0		Los efectos de los tratamientos (modelos) son iguales			
H₁: t_i ≠ 0		Los efectos de los tratamientos (modelos) son distintos para al menos un modelo			
		Alfa			
Zona	Periodo	0,10	0,05	0,01	p
C. Costa	A. H.	SÍ	No	No	0,053
	A. S.	No	No	No	0,106
V. Central	A. H.	No	No	No	0,996
	A. S.	No	No	No	0,804
C. Andes	A. H.	SÍ	SÍ	SÍ	0,002
	A. S.	SÍ	SÍ	SÍ	0,001
No: No se puede rechazar H₀					
SÍ: Sí se puede rechazar H₀					

Tabla N° 18: Test de Hipótesis de Diferencias de Medias.

* Test de Hipótesis: Diferencias entre Medias								
$H_0: \mu_i = \mu_j \checkmark$			Supuestos:		Población Normal Varianzas desconocidas			
$H_1: \mu_i \neq \mu_j \checkmark$			Caso:		$\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$			
Zona	Periodo	α	MA-Th	MA-ThM	MA-IDC	Th-ThM	Th-IDC	ThM-IDC
Cord. de la Costa	A. H.	0,10	No	SÍ	No	SÍ	No	SÍ
		0,05	No	No	No	SÍ	No	No
		0,01	No	No	No	No	No	No
		p	0,723	0,063	0,553	0,028	0,818	0,058
	A. S.	0,10 ^m	No	No	No	SÍ	No	SÍ
		0,05	No	No	No	No	No	SÍ
		0,01	No	No	No	No	No	No
		p	0,753	0,107	0,441	0,061	0,651	0,018
Valle Central	A. H.	0,10	No	No	No	No	No	No
		0,05	No	No	No	No	No	No
		0,01	No	No	No	No	No	No
		p	0,863	0,843	0,825	0,979	0,963	0,979
	A. S.	0,10	No	No	No	No	No	No
		0,05	No	No	No	No	No	No
		0,01	No	No	No	No	No	No
		p	0,768	0,716	0,341	0,945	0,506	0,431
Cord. de los Andes	A. H.	0,10	No	No	SÍ	No	SÍ	SÍ
		0,05	No	No	SÍ	No	SÍ	SÍ
		0,01	No	No	SÍ	No	SÍ	No
		p	0,803	0,684	0,003	0,876	0,002	0,010
	A. S.	0,10	No	No	SÍ	No	SÍ	SÍ
		0,05	No	No	SÍ	No	SÍ	SÍ
		0,01	No	No	SÍ	No	SÍ	No
		p	0,749	0,590	0,002	0,827	0,001	0,025
No: No se puede rechazar H_0								
SÍ: SÍ se puede rechazar H_0								

Tabla N° 19: Test de Rangos Múltiples de Duncan.

* Test de Rangos Múltiples de Duncan								
Diferencias entre pares de Medias								
Zona	Periodo	Alfa	MA-Th	MA-ThM	MA-IDC	Th-ThM	Th-IDC	ThM-IDC
Cord. de la Costa	A. H.	0,05	No	No	No	SÍ	No	SÍ
		0,01	No	No	No	No	No	No
	A. S.	0,05	No	No	No	No	No	SÍ
		0,01	No	No	No	No	No	No
Valle Central	A. H.	0,05	No	No	No	No	No	No
		0,01	No	No	No	No	No	No
	A. S.	0,05	No	No	No	No	No	No
		0,01	No	No	No	No	No	No
Cord. de los Andes	A. H.	0,05	No	No	SÍ	No	SÍ	SÍ
		0,01	No	No	SÍ	No	SÍ	SÍ
	A. S.	0,05	No	No	SÍ	No	SÍ	SÍ
		0,01	No	No	SÍ	No	SÍ	SÍ
No: No existe diferencia significativa entre los pares de medias								
SÍ: SÍ existe diferencia significativa entre los pares de medias								
		Alfa	Dos Medias Adyacentes		Dos medias dentro de un grupo de 4 medias			
Nivel de Protección:		0,05	0,95		0,857			
		0,01	0,99		0,970			

ANEXOS

ANEXO I

Definiciones.

I.- DEFINICIONES.

Adiabático: transformación termodinámica que experimenta un sistema sin que haya intercambio de calor con otros sistemas.

Anticiclón: área o espacio de máxima presión barométrica, en la que reina un tiempo hermoso y agradable.

Borrascas: temporal fuerte, tormenta de mar o tempestad que se levanta en tierra.

Isoyetas: son líneas (sobre el mapa) que unen puntos de igual precipitación. (MOPT, CEDEX, 1992; Linsley et al, 1988; Llamas, 1993; Pizarro, 1993; Fernández, 1995).

Kriging: método de interpolación lineal ponderada de una variable, en distintos puntos de un espacio, considerando que la asignación de los pesos tiene en cuenta la estructura de correlación espacial entre estaciones. Este método es utilizado en modelación espacial de tendencias y cambios climáticos. (MOPT, CEDEX, 1992; Fernández, 1995).

Torrencial: carácter que se les da a los ríos que presentan diferencias notables de nivel entre las cabeceras y la base de equilibrio (mar o lago) en un corto trecho.

Vaguadas: línea que marca la parte más honda de un valle, y es el camino por donde van las aguas de las corrientes naturales. Cañada, cauce, rambla, arroyada.

Valor normal: promedio de una variable climática, a lo largo de algunos años de observación. En el caso de la precipitación, este valor correspondía anteriormente al promedio de 20 años y en la actualidad se refiere al de 30 años o en su defecto al del máximo número de años posibles dentro de este rango. (Chow et al, 1994)

Valor p: es el nivel de significancia más pequeño que conduce al rechazo de la Hipótesis nula H_0 . (Montgomery y Runger, 1996).

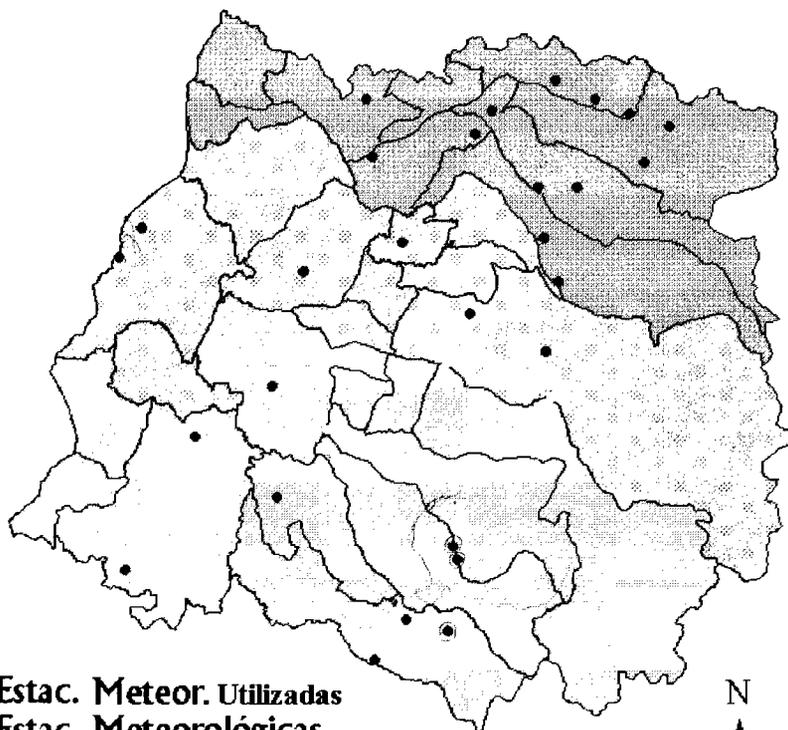
Variograma: instrumento para determinar la estructura espacial de una variable o su mutabilidad en el tiempo. (Fernández, 1995).

Variograma tipo: es una función matemática que mide la mutabilidad de una variable cuando sus valores se observan en puntos separados una distancia concreta. (Fernández, 1995).

ANEXO II

**Mapa con las Estaciones Meteorológicas existentes en
la VII Región.**

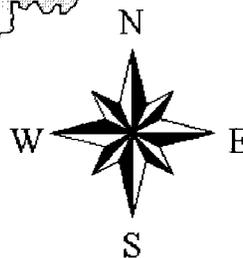
Estaciones Meteorológicas VII Región



Estac. Meteor. Utilizadas
• Estac. Meteorológicas

Limites

-  CAUQUENES
-  CURICO
-  LINARES
-  TALCA

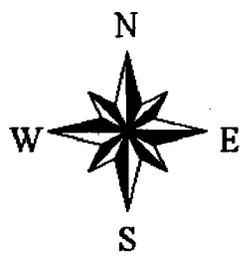
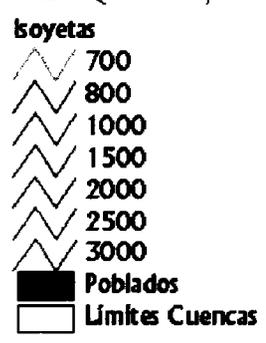
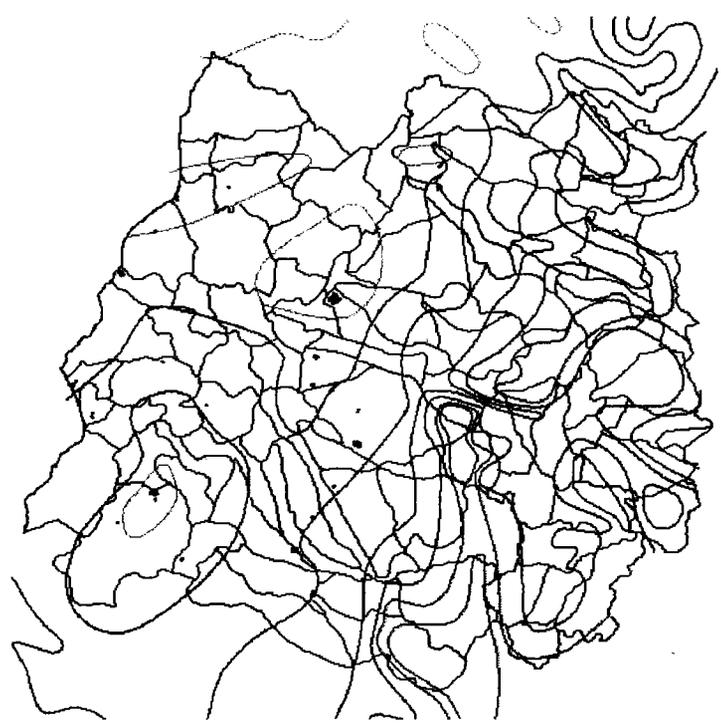


Fuente: Base de datos digitalizada D.G.A.

ANEXO III

**Mapa de Isoyetas VII Región
“Balance Hídrico de Chile -1987”.**

Mapa de Isoyetas VII Región



Fuente: Base de datos digitalizada D.G.A.

* Valores de Isoyetas corresponden a Precipitaciones en mm por año.