

## **Análisis del comportamiento y agresividad de las precipitaciones, en la zona central de Chile**

Roberto Pizarro T., Francisco Cornejo A., Claudia González M., Karina Macaya P.

Universidad de Talca. Av. Lircay s/n, Casilla 721 - Talca, Chile.

### **RESUMEN**

En la zona central de Chile, se analiza la distribución y la agresividad de las precipitaciones, a partir de registros procedentes de 63 estaciones meteorológicas. Se utilizaron las precipitaciones mensuales y anuales, como información base para el cálculo de los índices de Fournier (FI) y Modificado de Fournier (MFI), el Índice de Concentración de Precipitaciones (PCI) y el Índice Modificado de Fournier-Maule (IMFM); este último creado especialmente para esta investigación.

Se pudo constatar que en la cordillera de los Andes la agresividad de las lluvias es mayor que en las demás unidades de relieve. Además, los índices evidenciaron una relación directa con las precipitaciones, es decir, a medida que aumenta el monto de las precipitaciones, también aumenta su agresividad. Por otra parte, el PCI indica que las precipitaciones no han mostrado un cambio en la concentración anual, quedando de manifiesto que la zona central de Chile es *Altamente estacional*.

Finalmente, los altos valores de los coeficientes de variación de las precipitaciones y de los índices indican que la zona en estudio posee una alta variabilidad climática, lo que puede explicarse por el clima mediterráneo de transición imperante en estas regiones. Además, se evidenció que en el período 2000-2004 existe una tendencia al aumento de las precipitaciones, lo que resulta contradictorio con la tendencia general a la disminución de las mismas, influenciada principalmente por la década del '90.

Palabras clave: agresividad climática, concentración de las precipitaciones, distribución temporal y espacial de las precipitaciones, zona central de Chile.

## 1. INTRODUCCIÓN

La precipitación es, junto con la temperatura, el elemento climático que de manera más directa influye en la configuración de la naturaleza, ya que su variabilidad condiciona los ciclos agrícolas y otras actividades del quehacer humano.

La variabilidad de las precipitaciones, tanto espacial como temporal, está relacionada con la dinámica general de la atmósfera, de la cual dependen el régimen pluviométrico anual y las oscilaciones interanuales, que sumados a la topografía y el relieve, introducen desequilibrios muy marcados en la distribución espacial de las precipitaciones (Fernández, 1995).

Al respecto, Chile consta de una oferta relativamente estable de agua. Sin embargo, se observa que a lo largo del territorio nacional existe una gran variabilidad en la distribución de este recurso, en términos espaciales y temporales. Este fenómeno se hace claramente visible al realizar un análisis de las precipitaciones de las zonas áridas y semiáridas.

La variabilidad interanual de las precipitaciones en Chile Central, está en gran medida asociada a la alternancia de la ocurrencia de los fenómenos El Niño y La Niña (Rutllant y Fuenzalida, 1991). Esta información es confirmada por Montecinos y Aceituno (2003), quienes señalan que esta fluctuación de las precipitaciones está asociada a la ocurrencia de los fenómenos ENSO (El Niño / Southern Oscillation). Además, Garreaud y Aceituno (2001), señalan que durante los años húmedos o “Niño”, el número de días con precipitación aumenta, en términos de frecuencia de tormentas, particularmente las de intensidad moderada y extrema (10-20 mm/día y 50 mm/día, respectivamente). No obstante, en años “Niña”, las desviaciones hacia un menor número de días con precipitación son sólo marginalmente significativas.

En un estudio realizado por Bown (2004), se determinó que en la región de Los Lagos, en el sur de Chile, entre 1961 y 2000, todas las estaciones meteorológicas regionales mostraron una tendencia a la disminución de las precipitaciones, con una tasa máxima de 15 mm en la estación Valdivia.

En este marco, la presente investigación pretende establecer, a partir de diferentes parámetros que miden el grado de agresividad y concentración temporal de las precipitaciones, si tal variación en la tendencia climática está o no ocurriendo en la zona central de Chile. Los parámetros considerados fueron el Índice de Fournier (FI), el Índice Modificado de Fournier (MFI) y el Índice de Concentración de las Precipitaciones (PCI). A ellos se agrega el planteamiento de un nuevo parámetro desarrollado a partir de esta investigación, el Índice Modificado de Fournier-Maule (IMFM).

## **2. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO**

### *2.1 Descripción del área de estudio*

El área de investigación corresponde a la zona central de Chile; en particular las regiones Metropolitana, de O'Higgins y del Maule, entre los 32°55' y 36°33' de latitud Sur.

Un aspecto importante de la caracterización del área en estudio lo constituye el relieve (Ilustración 1). Al respecto, Chile presenta una geografía muy particular, conformada por cuatro unidades bien definidas; las planicies litorales, que se localizan entre el océano Pacífico por el oeste y la cordillera de la Costa por el este; a continuación, la cordillera de la Costa, que se inicia al norte del país formando una cadena montañosa alta que declina a medida que avanza hacia el sur y que constituye una importante barrera contra las influencias oceánicas; la depresión Intermedia, también llamada valle Central, que corresponde a una faja de relieve deprimido que se extiende latitudinalmente, entre ambas cordilleras y, por último, la cordillera de los Andes, que se presenta a lo largo de todo Chile, con alturas que bordean los 5000 metros en la zona central. Estas unidades de relieve determinan, en gran medida, las características climáticas de Chile; en lo particular, ambas cordilleras, Andina y de la Costa, afectan considerablemente la distribución de las precipitaciones, ya que las nubes cargadas de humedad chocan contra la ladera de barlovento, produciendo copiosas lluvias en este sector; estas son las lluvias

orográficas. Por el contrario, el sector de sotavento de las cordilleras, queda protegido contra la irrupción de los sistemas ciclónicos (Inzunza, 2005).

Según Santibáñez (1993), la zona central de Chile presenta un clima de tipo Mediterráneo, cuya característica principal es la presencia de una estación seca prolongada y un invierno bien marcado con temperaturas extremas que llegan a 0°C. La temperatura media es de 19°C y con extremas de 30°C, durante el período de verano; en cambio en invierno las temperaturas mínimas medias son de 7°C.

En cuanto a las precipitaciones, Inzunza (2005) señala que el promedio anual alcanza los 350 mm, presentando gran irregularidad, debido a que un año puede ser muy lluvioso y el siguiente muy seco. Por otro lado, las precipitaciones decrecen desde la costa hacia la depresión Intermedia, para aumentar nuevamente en la cordillera de los Andes. Lo mismo ocurre en el sentido latitudinal, es decir, a medida que se avanza hacia el sur se incrementan los montos anuales de precipitación. Estudios desarrollados por MIDEPLAN (1998), señalan que en el valle central el 83 % de las precipitaciones anuales se concentran en cuatro meses del año, es decir entre mayo y septiembre, siendo los de mayor pluviosidad los meses de junio y julio.

## *2.2 Agresividad climática*

La determinación de un índice que describa el efecto erosivo de las precipitaciones constituye un problema ampliamente abordado. Wischmeier (1959), propuso un Índice de Erosividad de la Lluvia para ser utilizado en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE). Dicho índice, conocido como factor  $R$ , requiere para su cálculo un valor  $E$ , que constituye la energía cinética liberada por la lluvia y un valor  $I$ , que corresponde a la máxima intensidad de precipitación durante un intervalo de 30 minutos. El cálculo del valor  $R$  es difícil de realizar, ya que es necesario disponer de un registro continuo de las variaciones de intensidad de la lluvia durante los diferentes aguaceros. Por el contrario, en Chile son escasas las estaciones de medición pluviográfica y están distribuidas irregularmente.

Debido a la dificultad para calcular el factor  $R$ , Fournier (1960), crea el Índice de Agresividad Climática o Índice de Fournier (FI), el cual se obtiene con los volúmenes de precipitación registrados en estaciones que posean datos representativos de la zona de estudio, utilizando la siguiente expresión:

$$FI_j = \frac{P_{\max j}^2}{P_m}$$

donde  $FI_j$  es el Índice de Fournier, para el año  $j$ ;  $P_{\max j}$  es la precipitación correspondiente al mes más lluvioso del año  $j$  y  $P_m$  es la precipitación media anual.

El FI solo considera el mes de mayor precipitación, despreciando los valores del resto de los meses. Sin embargo, es necesario considerar que existen zonas cuyo régimen de precipitaciones presenta más de una máxima mensual, así como también zonas donde los valores pluviométricos son en general elevados (Jordán y Bellinfante, 2000).

Para corregir posibles desviaciones, Arnoldus (1978) propone una modificación del FI que considera las precipitaciones de cada mes, dando origen al Índice Modificado de Fournier (MFI), definido de la siguiente forma:

$$MFI_j = \frac{\sum_{i=1}^{12} (p_{ij})^2}{P_m}$$

donde  $MFI_j$  es el Índice Modificado de Fournier, para el año  $j$ ;  $p_{ij}$  es la precipitación mensual del mes  $i$  (mm), del año  $j$  y  $P_m$  es la precipitación media anual (mm).

En esta investigación, a partir de la información recopilada, se propuso la utilización de un nuevo parámetro para profundizar en el comportamiento anual de las precipitaciones en la zona central de Chile. Este nuevo parámetro será llamado Índice Modificado de Fournier-Maule (IMFM). A continuación, se muestra la expresión del índice propuesto:

$$IMFM_j = \frac{\sum_{i=1}^{n=12} P_{ij}^2}{P_m}$$

donde  $IMFM_j$  es el Índice Modificado de Fournier-Maule, para el año  $j$ ;  $P_{ij}$  es la precipitación del mes  $i$  (mm) en el año  $j$  y  $P_m$  es la precipitación media anual (mm).

Este nuevo indicador pretende explicar cómo varían las precipitaciones anuales con respecto a su promedio anual. Se plantea que si la precipitación de un año  $j$ , es igual a la precipitación media anual, el valor del IMFM será el valor del promedio anual.

### 2.3 Concentración de precipitaciones

El término concentración de las precipitaciones se refiere al comportamiento de las mismas, ya sea en su cantidad anual, en su variación estacional y en la duración de la estación lluviosa de un año cualquiera. Es decir, si las precipitaciones de la época lluviosa se concentran sobre un periodo corto o más largo del año (Schulze, 1997).

Con el fin de estimar la agresividad de las lluvias, a partir de la variabilidad temporal de las precipitaciones mensuales, Oliver (1980) propuso el Índice de Concentración de las Precipitaciones (PCI), que se define de la siguiente manera:

$$PCI_j = 100 * \frac{\sum_{i=1}^{12} P_{ij}^2}{P_j^2}$$

donde  $PCI_j$  es el Índice de Concentración de las Precipitaciones, para el año  $j$ , expresado en porcentaje;  $p_{ij}$  es la precipitación del mes  $i$  (mm), en el año  $j$ ;  $P_j$  es la precipitación anual del año  $j$  (mm).

## 3. METODOLOGÍA

### 3.1 Selección de estaciones pluviométricas

La zona en estudio cuenta con un total de 120 estaciones pluviométricas, a cargo de la Dirección General de Aguas (DGA), cada una de ellas con diferentes periodos de registro de información. Sin embargo, con el fin de escoger las estaciones más representativas de las distintas regiones, se estableció un criterio de selección que determinó considerar sólo las estaciones con un período de registro igual o superior a veinte años. De este modo fueron consideradas 63 estaciones, distribuidas aleatoriamente en las cuatro unidades de relieve caracterizadas anteriormente, con información pluviométrica de carácter mensual y anual. En la Ilustración 2, se muestra la ubicación de las estaciones seleccionadas.

### *3.2 Procesamiento de la información*

Para determinar posibles tendencias en los registros pluviométricos de las estaciones analizadas, se realizó un análisis gráfico de los promedios móviles (PM) de las precipitaciones medias anuales y se construyó una tabla de tendencias de las mismas. Spiegel y Stephens (2002), señalan que los PM tienen la propiedad de reducir la variación presente en un conjunto de datos, tendiendo a eliminar patrones cíclicos, estacionales e irregulares. Los PM expresan el promedio de una variable en un momento dado sobre un período de tiempo y son calculados de la siguiente manera:

$$PM = \frac{\sum_{t=1}^n D_t}{n}$$

donde  $PM$  es el promedio móvil de la variable;  $D_t$  es el valor de la variable  $D$  en un tiempo  $t$  y  $n$  es el número de períodos considerados.

Por otra parte Nania (2003), señala que el ajuste de un conjunto de datos hidrológicos a una distribución, se puede resumir en forma compacta en una función matemática. En esta investigación se utilizará la Función de Distribución de Probabilidad (FDP) de Gumbel, ya que ha demostrado una

adecuada capacidad de ajuste a valores extremos de caudales y precipitación en distintos períodos de tiempo (Pizarro y Novoa, 1986). La FDP Gumbel se expresa de la siguiente manera:

$$F(x) = e^{-e^{-d(x-\mu)}}$$

donde  $x$  es el valor a asumir por la variable aleatoria;  $d$  y  $\mu$  son parámetros a ajustar de la función y  $e$  es la constante de Neper.

La asociación de las precipitaciones con distintos periodos de retorno, a partir de la FDP Gumbel, permitió comparar entre distintas series de registro de una misma estación para determinar e identificar posibles cambios en las tendencias de las precipitaciones.

### 3.3 Cálculo de los índices

En una segunda etapa del estudio se calculó el Índice de Concentración de las Precipitaciones (PCI), el Índice de Fournier (FI), el Índice de Fournier Modificado (MFI) y, a partir del nuevo parámetro definido, el Índice Modificado de Fournier-Maule (IMFM).

El PCI se calculó para cada estación anualmente, utilizando como base la precipitación mensual. El valor de este índice oscila entre 8,33 %, si la precipitación es igual en todos los meses, hasta 100 % si toda la lluvia se concentra en un solo mes. En el Cuadro 1 se muestra la clasificación del PCI propuesta por Lobo *et al* (2005).

Del mismo modo se calculó el FI y el MFI para cada estación anualmente, cuyos valores fueron analizados a partir de los cuadros 2 y 3, que muestran la clasificación de estos índices según CEC (1992), adaptada para las regiones en estudio en función de los montos de precipitación registrados en las regiones IV, V, Metropolitana, VI, y VII.

Por último, se calculó el IMFM, que pretende explicar el comportamiento de las precipitaciones en relación a su promedio anual. Por tanto, si la precipitación de un año cualquiera supera notoriamente a

la precipitación media, el índice crecerá notoriamente; si son iguales, el índice tomaría el valor de la precipitación media; y si las precipitaciones anuales son menores que la precipitación media, el índice entregará un valor notoriamente menor a dicha media.

Al igual que los valores anuales de precipitación, los índices (PCI, FI, MFI e IMFM) fueron examinados a partir de los promedios móviles en cada estación y fueron sometidos al ajuste a la FDP Gumbel. Con este análisis se determinaron posibles tendencias de agresividad, concentración y variación de las precipitaciones, así como también permitió realizar una comparación entre las probabilidades de excedencia de los periodos de una misma estación.

## **4. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

### *4.1 Promedios móviles de precipitaciones*

El análisis gráfico de las precipitaciones, a través de los promedios móviles, se realizó para las 63 estaciones en estudio. A modo de ejemplo, en la Ilustración 3 se muestra el gráfico de los promedios móviles para 4 estaciones de la región Metropolitana, en la que se apreció la mayor variabilidad anual de precipitaciones. Este análisis demostró que existe, para todas las estaciones, una alta variabilidad en el monto anual de las precipitaciones.

### *4.2 Determinación de la probabilidad de excedencia para distintos períodos de retorno en cada estación*

Para el ajuste de las precipitaciones, a través de la FDP de Gumbel, se agruparon las series anuales de cada estación en períodos aproximados de veinte años (20 +/- 4 años). Una vez determinados los períodos, se estableció como parámetro de comparación la probabilidad de excedencia, es decir, que los

valores calculados para las precipitaciones, asociados a las distintas probabilidades de ocurrencia y de acuerdo a los periodos de retorno utilizados en este estudio (50 y 100 años), superen su valor.

Para realizar el ajuste se seleccionaron 23 estaciones, las que contaban con una serie de datos, con un mínimo de 40 años. Para verificar el ajuste se utilizó la prueba de bondad de Kolmogorov Smirnov, la que fue aceptada en todas las estaciones ajustadas.

A partir de este análisis se pudo apreciar que las 16 estaciones de la región Metropolitana mostraron una tendencia al aumento en sus montos de precipitación; en la región de O'Higgins la tendencia de las dos estaciones analizadas es a la disminución de sus precipitaciones y en la región del Maule la tendencia de 8 estaciones es al aumento y en 7 es a la disminución de las precipitaciones (Cuadro 4).

En general, al relacionar las tendencias con la longitud de la serie de datos, se puede establecer que la mayoría de las estaciones que presentan tendencia a la disminución, poseen series de datos menores a 40 años; en cambio, la tendencia al aumento está ligada con series de datos de más de 40 años.

En relación a la ubicación espacial, las estaciones ubicadas en ambas cordilleras, Andina y de la Costa, manifestaron mayoritariamente una tendencia a la baja en los montos de precipitación, en tanto que en las estaciones situadas en la depresión Intermedia, no existe una marcada tendencia al aumento o a la disminución de la precipitación anual.

#### *4.3 Obtención y análisis de los índices*

La obtención de los índices PCI, FI, MFI, e IMFM, se realizó en base a las precipitaciones mensuales y anuales de las 63 estaciones pluviométricas seleccionadas. En el Cuadro 5 se presenta un resumen con los índices promedio obtenidos para cada región, según la zona de ubicación de las estaciones pluviométricas. Además, con los índices se realizó un análisis similar al utilizado con las precipitaciones, es decir, se determinó la tendencia para los distintos períodos en que fueron divididas las series de datos, como se aprecia en el Cuadro 6. Los signos positivos (+) significan tendencia al

aumento y los signos negativos (-), representan tendencia a la baja, para los valores anuales de precipitaciones y para los índices analizados.

Al revisar la tendencia de la concentración de las precipitaciones, se pudo constatar que no existe una tendencia clara al incremento o la disminución en los valores del PCI, en función del tiempo. Sin embargo, se evidenció que independiente de la tendencia existente en las estaciones analizadas, la concentración de las precipitaciones se ha mantenido relativamente estable en el tiempo (PCI de 25% aproximadamente), con valores que reflejan un comportamiento *Altamente estacional*, según la clasificación propuesta por Lobo *et al* (2005). En cuanto a la tendencia espacial del PCI, queda en evidencia que los promedios decrecen latitudinal y sistemáticamente en 11%, en las regiones de O'Higgins y del Maule, respecto del valor promedio calculado para la región Metropolitana; en cambio, no es posible establecer una tendencia longitudinal para la zona en estudio. Por otra parte, si se considera el análisis gráfico entre el PCI y las precipitaciones, se aprecia que no existe una relación clara entre la cantidad y la concentración de las mismas. Incluso en una estación de larga data (Los Queñes), se observa una relación levemente inversa entre el monto de las precipitaciones y la concentración de éstas, como se observa en la Ilustración 3.

Para los parámetros FI y MFI, en las regiones Metropolitana y de O'Higgins, es posible observar en todas las estaciones una tendencia clara al aumento de los valores de los respectivos índices, en función del tiempo. En cambio, en la región del Maule la tendencia no es clara, ya que algunas estaciones muestran una tendencia temporal a la baja y otras al incremento. En cuanto a la componente espacial de ambos índices, FI y MFI, se pudo observar que en la cordillera de los Andes se encuentran los valores promedio más altos de agresividad del clima en todas las regiones. Así también, se pudo establecer que en la zona andina de la región del Maule las precipitaciones han sido en promedio *Altamente agresivas*, según las clasificaciones hechas por CEC (1992) y adaptadas para este estudio; en cambio, las regiones Metropolitana y de O'Higgins, además de la cordillera de la Costa y la depresión Intermedia de la región del Maule, presentaron valores de FI y MFI moderados y similares, por lo tanto, dichas zonas

fueron clasificadas como de *Moderada agresividad* y de *Moderada a baja agresividad*, respectivamente. En cuanto a la tendencia latitudinal, se aprecia un marcado incremento en ambos índices, a medida que se avanza hacia el sur. Por otra parte, ambos índices muestran una relación directa entre los montos de precipitaciones y la agresividad que éstas denotan, es decir que, en la medida en que las precipitaciones aumentan, su agresividad también aumenta (Ilustración 4).

Por otra parte, y en relación a la agresividad del clima, las tendencias mostradas por el FI y el MFI coincidieron en 57 de las 63 estaciones analizadas. Las escasas diferencias, tanto en la tendencia como en la clasificación de la agresividad, se deben a que el MFI incluye los valores de todos los meses de precipitación, mientras que el FI sólo lo hace con el de mayor precipitación en el año. Además, en todas las estaciones analizadas se observó que los valores del FI y del MFI son bastante heterogéneos entre un año y otro, de lo cual se desprende la existencia de una alta variabilidad en la agresividad del clima, lo que se observa principalmente en la cordillera de los Andes durante el periodo de lluvias.

Al realizar el análisis del IMFM, se observaron mayores diferencias. En la región Metropolitana la mayoría de las estaciones presenta una tendencia temporal al aumento de las precipitaciones por sobre su media (10 de las 16 estaciones); en cambio, en las regiones de O'Higgins y del Maule la tendencia es a la disminución (30 de las 47 estaciones). En general, se observó que las estaciones ubicadas en la cordillera Andina son las que más evidencian una tendencia general a la baja en los montos de las precipitaciones, aunque eso no constituye una expresión determinística por los antecedentes ya aportados. Por otra parte, la tendencia espacial de este índice coincide con la descripción dada por los índices FI y MFI, confirmando que la cordillera de los Andes, en la región del Maule, es la zona que presenta la mayor agresividad en las precipitaciones; la tendencia latitudinal, en cambio, revela un fuerte incremento en los valores de agresividad de las precipitaciones, a medida que se avanza hacia el sur, alcanzando en la región del Maule valores de hasta un 120 % por sobre los valores calculados para la región Metropolitana. Por último, al revisar la Ilustración 3 se observa que a medida que las precipitaciones aumentan, aumenta de manera potencial el valor del IMFM; es decir que existe una

relación potencial entre la lluvia caída y la variación de éstas con respecto a su media. Dicho fenómeno se produce en la totalidad de las estaciones estudiadas.

#### *4.4 Análisis de las precipitaciones para las décadas del '60, '70, '80 y '90*

Otro aspecto importante de analizar, es la tendencia que muestran las precipitaciones en distintas décadas (Cuadro7). Al respecto, es posible apreciar que el comportamiento periódico de las precipitaciones es similar; la década del '60 es la que presenta los valores más bajos de precipitación, aumentando progresivamente en las décadas del '70 y '80, para disminuir notoriamente en la década del '90. Asimismo, es interesante observar que en los últimos cinco años (2000-2004), los valores de precipitación media han superado al resto de las décadas, mostrando una clara tendencia al aumento.

Luego, se aprecia que las décadas más importantes en términos de tendencia resultan ser la del '80 y la del '90. Esto porque hasta la década del '80, los promedios tienden a aumentar; sin embargo en la del '90, se aprecia la existencia de un descenso en los valores promedio de precipitación.

Así, la disminución promedio entre la década del '80 y la del '90 es de un 23,1% en la región Metropolitana, de un 15,7% en la región de O'Higgins y de un 14,6% en la región del Maule. Por otra parte, en los últimos cinco años el aumento con respecto a la década del '90 es de un 30,5% en la región Metropolitana, de un 25 % en la región de O'Higgins y de un 25,5% en la región del Maule. Sin embargo, el último tramo sólo considera el periodo 2000/2003-2004, por lo que no es aún representativo de la década completa, aunque manifiesta una clara tendencia al aumento de las lluvias.

## **5. CONCLUSIONES**

Los resultados obtenidos permiten confirmar que las precipitaciones, en la zona central de Chile, tienden a aumentar latitudinalmente y, que además los valores de precipitación más altos se presentan

en la cordillera Andina, disminuyendo progresivamente al pasar por la depresión Intermedia y aumentando nuevamente en la cordillera de la Costa.

Al revisar la tendencia temporal de las precipitaciones, se observó que mayoritariamente en las regiones de O'Higgins y del Maule existe una tendencia a la disminución de las precipitaciones, influenciada principalmente por la década del '90. En la región Metropolitana en cambio, las estaciones no mostraron una clara tendencia al aumento o a la disminución.

En relación a la concentración temporal de las precipitaciones, se pudo verificar la existencia de ciertas tendencias que no significaron un evidente cambio en la composición anual de éstas, es decir, las precipitaciones no han manifestado un cambio en la concentración anual y por lo tanto basado en los valores del Índice de Concentración de las Precipitaciones (PCI), queda de manifiesto que la zona central de Chile es *Altamente estacional*.

En cuanto a los índices de Fournier (FI) y Modificado de Fournier (MFI), que determinan la agresividad del clima, se observó que en el sector de la cordillera de los Andes la agresividad de las lluvias tiende a ser mayor que en los demás sectores. Estos índices también evidenciaron una relación directa con las precipitaciones, es decir, a medida que aumentaban las precipitaciones también aumenta su agresividad.

En relación al Índice Modificado de Fournier-Maule (IMFM), creado para este estudio, se pudo constatar que es el que se relaciona de mejor manera con los montos de precipitación anual, a través del tiempo. Luego, la mayoría de las estaciones de la región Metropolitana mostraron una tendencia temporal a superar sus promedios anuales de precipitación, mientras que, la mayoría de las estaciones de las regiones de O'Higgins y del Maule presentaron una tendencia a no superar el promedio anual de precipitación.

Finalmente, los altos valores de los coeficientes de variación de las precipitaciones y de los índices en estudio permiten concluir que las tres regiones poseen una alta variabilidad climática, lo que podría ser explicado por el clima mediterráneo de transición de estas regiones. Además, se evidenció que en el

período 2000/2003-2004 todas las estaciones presentan una clara tendencia al aumento de las precipitaciones, lo que resulta inusual si se considera que la tendencia para todo el período en estudio es a la disminución de las mismas, influenciado principalmente por la década del '90.

## 6. REFERENCIAS

ARNOLDUS, H. *An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation*. In: De Boodst, M. and Gabriels, D. (eds.). *Assessment of erosion*, John Wiley and Sons, Inc. Chichester, England, 1978. pp 127 – 132.

BOWN, F. *Cambios climáticos en la región de Los Lagos y respuestas recientes del glaciar Casa Pangué (41°08'S)*. Tesis para optar al grado de Magíster en Geografía, Universidad de Chile, 2004. 131 pp.

CEC. *CORINE soil erosion risk and important land resources in the southern regions of the European Community*. Commission of the European Communities 13.233. Luxemburg, 1992. 97 pp.

FERNANDEZ, F. *Manual de climatología aplicada. Clima, medioambiente y planificación*. Ed. Síntesis S.A., 1995. 285 pp.

FOURNIER, F. *Climat et erosion*. Ed. Presses Unisitaeres de France, Paris, 1960. 201 pp.

GARREAUD, R., ACEITUNO, P. *Interannual rainfall variability over the South American Altiplano*. *Journal of Climate*, Vol. 14, 2001. pp 2779 - 2789.

INZUNZA, J. *Climas de Chile, Capítulo 15*. In: *Meteorología descriptiva y aplicaciones en Chile*. Universidad de Concepción. Depto. de Física de la Atmósfera y del Océano, 2003. pp 421 – 451.

JORDÁN, A., BELLINFANTE, N. *Cartografía de la erosividad de la lluvia estimada a partir de datos pluviométricos mensuales en el Campo de Gibraltar (Cádiz)*. *Edafología*. Vol. 7-3, 2000. 10 pp.

LOBO, D., GABRIELS, D., OVALLES, F., SANTIBAÑEZ, F., MOYANO, M., AGUILERA, R., PIZARRO, R., SANGÜESA, C., URRRA, N. *Guía metodológica para la elaboración del mapa de zonas*

*áridas, semiáridas y sub-húmedas secas de América Latina y el Caribe.* CAZALAC, PHI-UNESCO, 2005. 66 pp.

MIDEPLAN. *Cuencas hidrográficas en Chile: diagnósticos y proyectos.* Santiago, Chile, 1998. 205 pp.

MONTECINOS, A., ACEITUNO, P. *Seasonality of the ENSO-Related rainfall variability in central Chile and associated circulation anomalies.* Journal of Climate, Vol. 16, 2003. pp 281 - 296.

NANIA, L. *Estadística aplicada a la hidrología.* Universidad de Granada. España, 2003. 29 pp.

OLIVER, J. *Monthly precipitation distribution: a comparative index.* Professional Geographer, Vol. 32, N° 3, 1980. pp 300 - 309.

PIZARRO, R., NOVOA, P. *Elementos técnicos de hidrología I.* Instructivos técnicos, Corporación Nacional Forestal, Ministerio de Agricultura de Chile, 1986. 57 pp.

RUTLLANT, J., FUENZALIDA, H. *Synoptic aspects of the central Chile rainfall variability associated with the Southern Oscillation.* International Journal of Climatology Vol. 11, N° 1, 1991. pp 63 - 76.

SANTIBAÑEZ, F., URIBE, J. *Atlas agroclimático de Chile, VI, VII, VIII y IX regiones.* Laboratorio de agroclimatología, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad de Chile - CORFO, 1993. 73 pp.

SCHULZE, R. *South African atlas of agrohydrology and climatology.* Water Research Commission, Pretoria, RSA, Report TT 82/96, 1997. 276 pp.

SPIEGEL, M., STEPHENS, L. *Estadística.* Tercera edición. México, Ed. Mc Graw-Hill, 2002. 541 pp.

WISCHMEIER, W. *A rainfall erosion index for a universal soil-loss equation.* Soil Science Society Proceeding 23, 1959. pp 246 - 249.

## **Listado de cuadros**

- Cuadro 1:** Clasificación del Índice de Concentración de las Precipitaciones (PCI), propuesta por Lobo *et al* (2005).
- Cuadro 2:** Clasificación del Índice de Fournier (FI), adaptado para la zona en estudio.
- Cuadro 3:** Clasificación del Índice Modificado de Fournier (MFI), según CEC (1992) y adaptado para la zona en estudio.
- Cuadro 4:** Valores de precipitación para las 23 estaciones ajustadas a la FDP Gumbel, para los periodos de retorno de 50 y 100 años.
- Cuadro 5:** Valores promedio para los índices (PCI, FI, MFI, IMFM) y para las precipitaciones (PP), considerando las 63 estaciones incluidas en esta investigación.
- Cuadro 6:** Resumen de tendencias para los índices calculados (PCI, FI, MFI, IMFM), en las 23 estaciones seleccionadas para el ajuste a la FDP Gumbel.
- Cuadro 7:** Promedios de precipitación y coeficientes de variación para las décadas del '60, '70, '80, '90 y 2000, considerando las 63 estaciones incluidas en esta investigación.

## **Listado de ilustraciones**

- Ilustración 1:** Mapa de ubicación de las estaciones pluviométricas utilizadas en este estudio.
- Ilustración 2:** Gráfica geomorfológica de Chile central, que señala la disposición de las principales unidades de relieve.
- Ilustración 3:** Promedios móviles para cuatro estaciones de la región Metropolitana.
- Ilustración 4:** Relaciones gráficas entre los montos de precipitación anual y los valores calculados para los distintos índices, PCI, FI, MFI e IMFM, estación Los Queñes, región del Maule.

**Cuadro 1.** Clasificación del Índice de Concentración de las Precipitaciones (PCI), propuesta por Lobo *et al* (2005).

<b>PCI</b>	<b>Descripción de la concentración</b>
8,3 – 10	Uniforme
10 – 15	Moderadamente estacional
15 – 20	Estacional
20 – 50	Altamente estacional

**Cuadro 2.** Clasificación del Índice de Fournier (FI), adaptado para la zona en estudio.

<b>Clase</b>	<b>FI / (Adaptado)</b>	<b>Descripción de la agresividad</b>
1	50<	Muy Baja
2	50-100	Baja
3	100-150	Moderada
4	150-200	Alta
5	>200	Muy Alta

**Cuadro 3.** Clasificación del Índice Modificado de Fournier (MFI), según CEC (1992) y adaptado para la zona en estudio.

<b>Clase</b>	<b>MFI / (CEC, 1992)</b>	<b>MFI / (Adaptado)</b>	<b>Descripción de la agresividad</b>
1	<60	<100	Muy baja
2	60-90	100-200	Baja
3	90-120	200-300	Moderada
4	120-160	300-400	Alta
5	>160	>400	Muy alta

**Cuadro 4.** Valores de precipitación para las 23 estaciones ajustadas a la FDP Gumbel, para los periodos de retorno de 50 y 100 años.

Región	Estación / Ubicación	Serie T P	1921-1940		1941-1960		1961-1980		1981-2003/2004	
			50	100	50	100	50	100	50	100
			0,98	0,99	0,98	0,99	0,98	0,99	0,98	0,99
Metropolitana	Embalse El Yeso	33°40'00" / 70°05'00"	-	-	-	-	1.089,3	1.221,1	1.623,8	1.825,7
	Of. Central D.G.A.	33°26'00" / 70°39'00"	-	-	-	-	614,7	682,9	803,4	897,9
	Rincón de los Valles	32°57'00" / 70°46'00"	-	-	-	-	562,5	625,1	872,4	987,1
	Caleu	33°00'00" / 71°00'00"	-	-	-	-	1.156,2	1.289,5	1.633,0	1.846,7
	Embalse Rungue	33°01'00" / 70°54'00"	-	-	-	-	719,6	799,6	1.125,1	1.272,5
	Carmen de las Rosas	33°45'00" / 71°09'00"	-	-	868,3	956,0	912,5	1.010,5	1.017,1	1.134,0
O'Higgins	La Rufina	34°44'00" / 70°46'00"	-	-	-	-	2.224,7	2.459,1	2.187,8	2.411,1
	Rappel	33°57'00" / 71°44'00"	-	-	-	-	1.172,3	1.301,0	947,0	1.051,1
Maule	Los Queñes	35°00'00" / 70°49'00"	2.055,6	2.305,1	2.027,5	2.231,2	2.812,1	3.115,1	2.681,4	2.961,6
	Gualleco	35°14'00" / 71°59'00"	-	-	-	-	1.582,8	1.753,8	1.632,7	1.798,7
	Armerillo	35°42'00" / 71°06'00"	-	-	5.082,2	5.599,2	4.461,4	4.835,9	4.426,8	4.881,3
	Embalse Digua	36°15'00" / 71°32'00"	-	-	-	-	2.798,7	3.081,8	2.573,5	2.805,5
	Perquilauquén	36°15'00" / 71°50'00"	-	-	-	-	2.371,7	2.583,3	2.684,2	2.941,9
	Quella	36°03'26" / 72°05'21"	-	-	-	-	1.344,8	1.480,8	1.305,4	1.430,7
	Nirivilo	35°32'18" / 72°05'29"	-	-	-	-	1.541,7	1.696,5	1.711,0	1.895,2
	Parral	36°11'00" / 71°50'00"	-	-	-	-	1.690,0	1.842,7	1.766,8	1.933,5
	Embalse Bullileo	36°17'00" / 71°25'00"	-	-	3.401,7	3.680,4	3.833,4	4.188,6	3.733,5	4.075,6
	Hornillo	35°51'00" / 71°07'00"	-	-	-	-	4.440,7	4.922,3	3.929,2	4.309,9
	Embalse Ancoa	35°53'00" / 71°19'00"	-	-	-	-	2.793,1	3.056,7	2.970,7	3.255,5
	Melozal	35°44'00" / 71°48'00"	-	-	-	-	1.417,1	1.556,0	1.370,1	1.501,7
	Colbún	35°41'00" / 71°25'00"	-	-	-	-	1.800,4	1.976,3	1.939,9	2.128,8
	El Guindo	35°16'00" / 71°21'00"	-	-	-	-	1.515,1	1.672,1	1.336,1	1.475,1
	Colorado	35°37'00" / 71°16'00"	-	-	-	-	2.600,6	2.854,4	2.582,9	2.834,7

T = periodo de retorno; P = probabilidad asociada a T, definida por  $F(X) = (1 - 1/T)$  y (-) = sin información.

**Cuadro 5.** Valores promedio para los índices (PCI, FI, MFI, IMFM) y para las precipitaciones (PP), considerando las 63 estaciones incluidas en esta investigación.

<b>Región</b>	<b>Unidad de relieve</b>	<b>PCI</b>	<b>FI</b>	<b>MFI</b>	<b>IMFM</b>	<b>PP</b>
Metropolitana	Cordillera de la Costa	28,7	117,2	171,8	576,9	466,0
	Depresión Intermedia	29,2	91,8	130,9	440,2	350,0
	Cordillera de los Andes	25,0	121,3	179,7	679,3	545,8
	<i>Promedio</i>	<i>27,6</i>	<i>110,1</i>	<i>160,8</i>	<i>565,5</i>	<i>453,9</i>
O'Higgins	Planicie litoral	23,6	86,2	143,4	594,6	523,8
	Cordillera de la Costa	24,8	116,4	192,5	776,4	675,6
	Depresión Intermedia	25,9	124,8	197,7	753,0	646,1
	Cordillera de los Andes	24,3	134,2	220,0	907,8	799,0
	<i>Promedio</i>	<i>24,7</i>	<i>115,4</i>	<i>188,4</i>	<i>758,0</i>	<i>661,1</i>
Maule	Cordillera de la Costa	22,8	116,6	203,2	902,5	813,1
	Depresión Intermedia	21,0	103,2	194,9	960,6	881,6
	Cordillera de los Andes	22,2	170,5	308,0	1.460,4	1.322,8
	<i>Promedio</i>	<i>22,0</i>	<i>130,1</i>	<i>235,4</i>	<i>1.107,8</i>	<i>1.005,8</i>

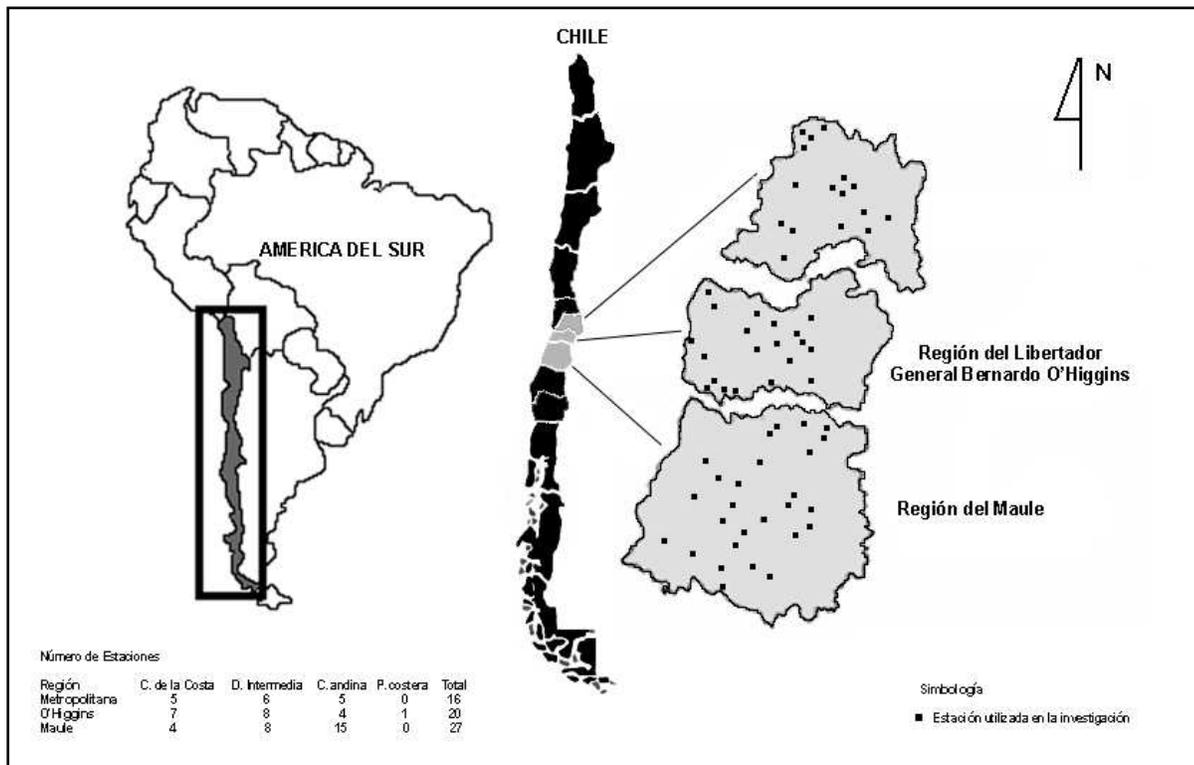
**Cuadro 6.** Resumen de tendencias para los índices calculados (PCI, FI, MFI, IMFM), en las 23 estaciones seleccionadas para el ajuste a la FDP Gumbel.

<b>Región</b>	<b>Estación</b>	<b>Serie</b>	<b>PCI</b>	<b>FI</b>	<b>MFI</b>	<b>IMFM</b>
Metropolitana	Embalse El Yeso	1962-2004	+	+	+	+
	Of. Central D.G.A.	1960-2004	-	+	+	+
	Rincón de los Valles	1957-2004	-	+	+	+
	Caleu	1957-2004	+	+	+	+
	Embalse Rungue	1943-2004	-	+	+	+
	Carmen de las Rosas	1930-2004	+	+	+	+
O'Higgins	La Rufina	1960-2004	-	+	+	+
	Rapel	1960-2004	-	+	+	+
Maule	Los Queñes	1918-2003	-	+	+	+
	Gualleco	1962-2003	+	+	+	+
	Armerillo	1916-2003	-	-	-	-
	Embalse Digua	1947-2003	-	-	-	-
	Perquillauquén	1956-2003	+	+	+	+
	Quella	1961-2003	+	+	+	-
	Nirivilo	1956-2003	+	+	+	+
	Parral	1964-2003	+	+	+	+
	Embalse Bullileo	1930-2003	+	+	+	-
	Hornillo	1961-2003	+	+	+	-
	Embalse Ancoa	1957-2003	-	+	+	+
	Melozal	1950-2003	-	+	+	-
	Colbún	1959-2003	-	+	+	+
	El Guindo	1964-2003	+	-	-	-
	Colorado	1963-2003	+	+	+	-

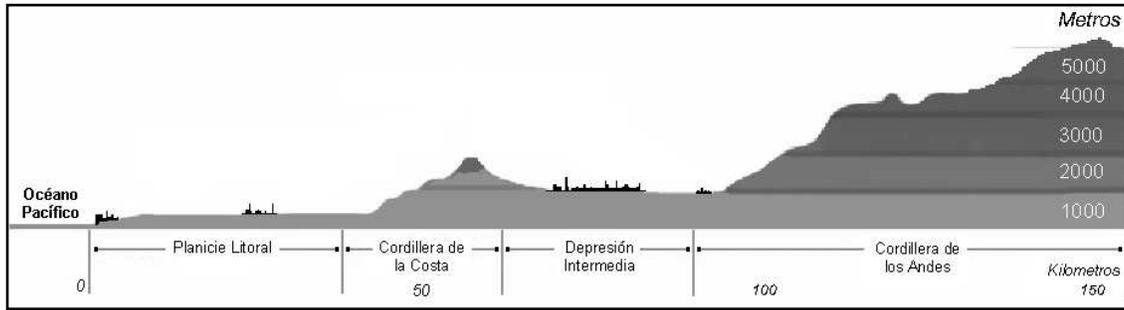
**Cuadro 7.** Promedios de precipitación y coeficientes de variación para las décadas del '60, '70, '80, '90 y 2000, considerando las 63 estaciones incluidas en esta investigación.

<b>Región</b>		<b>60 - 69</b>	<b>70 - 79</b>	<b>80 - 89</b>	<b>90 - 99</b>	<b>00 - 03/04</b>
Metropolitana	Promedio	352,4	431,7	518,6	398,8	520,6
	CV (%)	28,72	27,25	24,46	23,57	22,47
O'Higgins	Promedio	663,1	727,2	716,9	604,6	755,7
	CV (%)	45,30	26,54	21,63	24,30	20,68
Maule	Promedio	1.061,8	1.193,4	1.182,4	1.009,8	1.267,4
	CV (%)	42,94	47,79	43,57	43,70	42,62

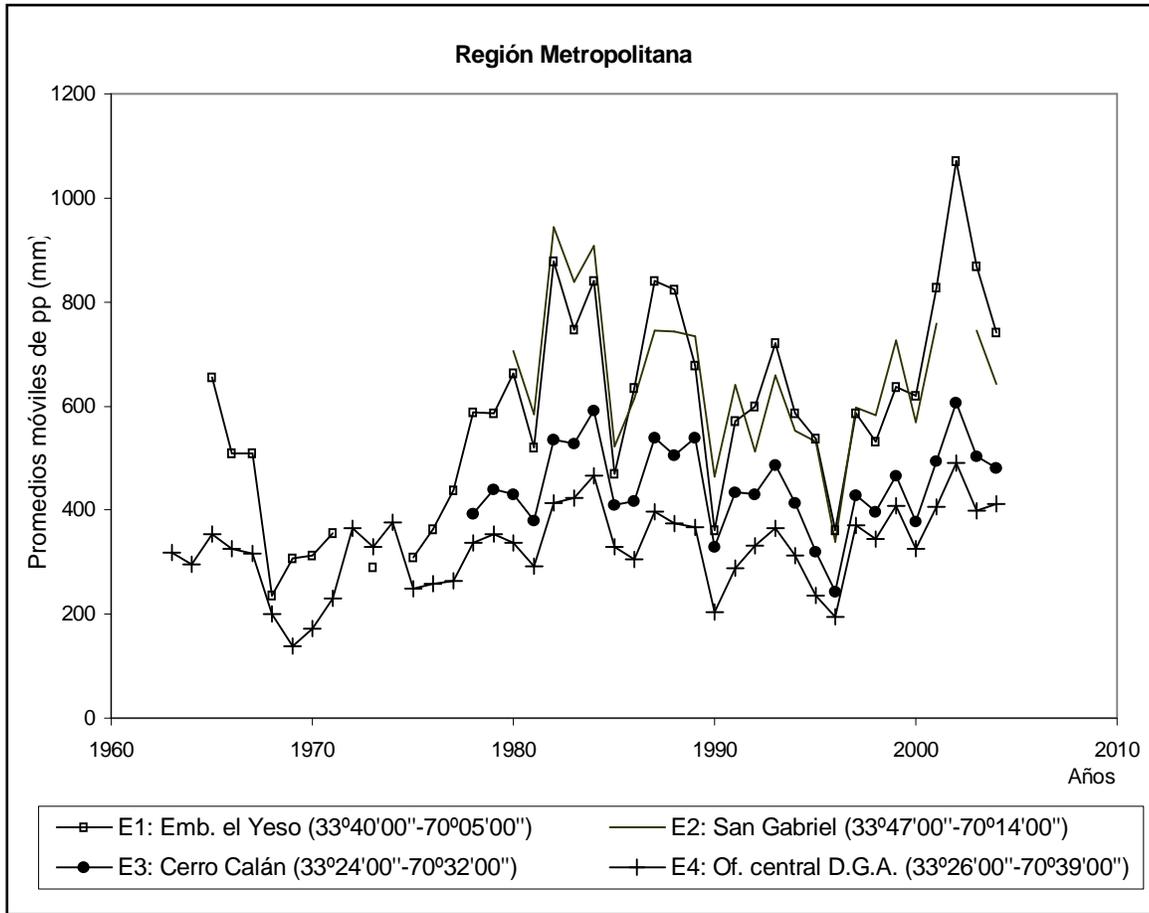
CV: coeficiente de variación.



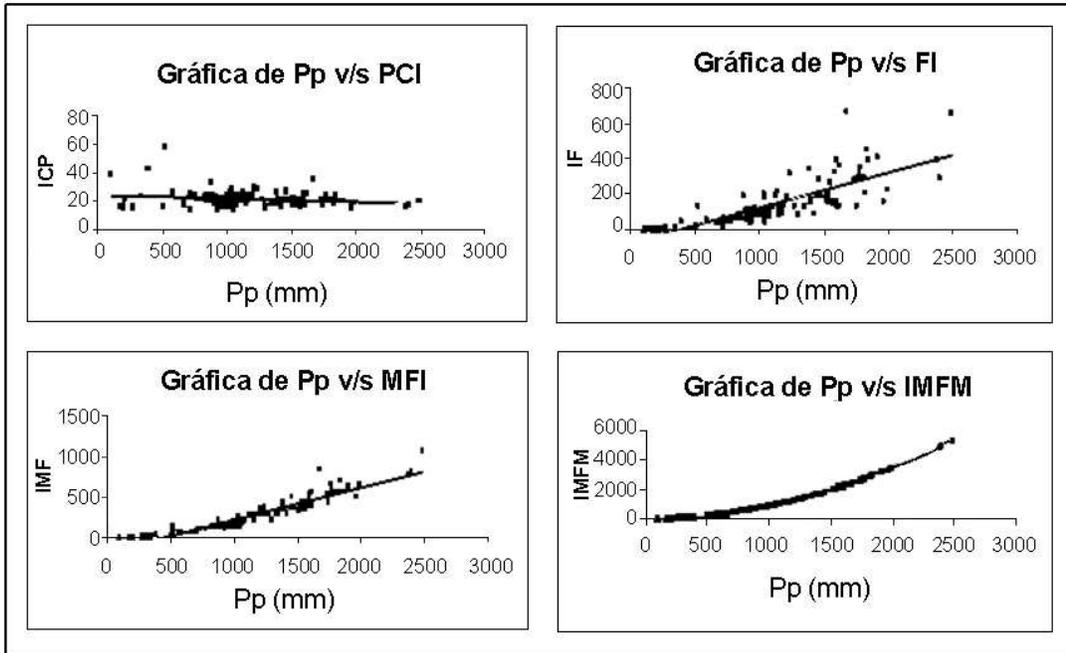
**Ilustración 1.** Mapa de ubicación de las estaciones pluviométricas utilizadas en este estudio.



**Ilustración 2.** Gráfica geomorfológica de Chile central, que señala la disposición de las principales unidades de relieve.



**Ilustración 3.** Promedios móviles para cuatro estaciones de la región Metropolitana.



**Ilustración 4.** Relaciones gráficas entre los montos de precipitación anual y los valores calculados para los distintos índices, PCI, FI, MFI e IMFM, estación Los Queñes, región del Maule.