



## INTRODUCCIÓN

37  
38  
39 Existe una preocupación internacional debido a un aumento alarmante en la frecuencia y severidad de los  
40 desastres. De acuerdo con Bass *et al* (2008), 240 millones de personas, en promedio, se han visto  
41 afectadas por desastres naturales en todo el mundo cada año entre el 2000 y el 2005.  
42  
43 Un desastre puede ser definido como la acumulación de pérdidas generalizadas sobre múltiples sectores  
44 económicos, asociado a un evento de amenaza natural, que supera la capacidad de la población afectada  
45 para sobreponerse. Este desastre, además, es el resultado de la combinación de condiciones de riesgo,  
46 vulnerabilidad social y las limitadas capacidades de los hogares o comunidades para reducir los  
47 potenciales impactos negativos de aquella amenaza (Below *et al*, 2007; Bass *et al*, 2008).  
48  
49 Entre las múltiples amenazas naturales que puede llegar a convertirse en desastres, una de las más  
50 importantes son las sequías, resultado de una deficiencia en la precipitación, respecto a lo considerado  
51 “normal”, de modo que, cuando se extiende a través de una estación o más tiempo, es insuficiente para  
52 satisfacer las demandas humanas y del ambiente (Wilhite y Buchanan-Smith, 2005; Seth, 2003). Las  
53 sequías, han sido catalogadas como el peligro individual y natural más grande en el planeta (Patrick, 2003;  
54 Askew y Rodda, 1996). De hecho, según Below *et al* (2007), las sequías causaron más del 50% del total  
55 de muertes debidas a desastres naturales entre el 1900 y el 2004, representaron el 35% de la población  
56 afectada por desastres y el 7% de las pérdidas económicas, después de las inundaciones y los terremotos.  
57  
58 Por otro lado, a diferencia de otros eventos climáticos, como inundaciones, heladas, huracanes o tornados,  
59 que poseen distribuciones más bien restringidas en las escalas espacial y temporal, las sequías presentan  
60 mayores dificultades para determinar tanto su duración como su área de influencia, las que pueden ser  
61 bastante mayores que los eventos antes mencionados (Wilhite y Svoboda, 2000; Lehner y Döll, 2001;  
62 Seth, 2003).  
63  
64 Uno de los aspectos que cita consenso entre los autores, es que, en general, las regiones áridas y  
65 semiáridas del mundo presentan un mayor grado de vulnerabilidad a la sequía que las regiones húmedas  
66 del planeta, en particular debido a que estas regiones presentan niveles de precipitación muy limitantes y  
67 con una variabilidad temporal y espacial extremas (Kalma y Franks, 2003, Askew y Rodda, 1996). De  
68 hecho, los mayores desastres naturales asociados a eventos de sequía se han registrado en regiones áridas  
69 y semiáridas, tales como el oeste de África (Askew y Rodda, 1996) y noreste de Brasil (Brant, 2007;  
70 Marcos Valiente, 2000),

71 En el contexto de América Latina, Chile, en particular su zona centro norte, donde gran parte del territorio  
72 presenta una condición árida a semiárida, las sequías son eventos recurrentes de gran impacto  
73 socioeconómico (Fernández, 1997; Fernández *et al*, 1997, Fernández y Vergara, 1998). FAO (2008), por  
74 ejemplo, presenta datos que indican la ocurrencia de 8 eventos de sequía en 30 años en Chile. Más aún,  
75 Espinoza (1985) ejemplifica el impacto histórico de las sequías en el sector agrícola chileno, señalando  
76 cómo, desde la fundación de Santiago en 1541, se han registrado 50 años secos y 52 muy secos, donde la  
77 sequía de 1770-1782 le dio un significado económico al déficit hídrico al afectar la ganadería orientada a  
78 la exportación de cebo para el alumbrado público en Lima. Más recientemente, Espinoza y Hajek (1988),  
79 señalan que la sequía de 1968, que afectó toda la zona semiárida y mediterránea de Chile, tuvo un costo  
80 aproximado para el país de 1.000 millones de dólares. En dicho año, la masa ganadera del país disminuyó  
81 en un 45%, la superficie de riego decreció en un 40% y el desempleo afectó a cerca de 225.000 personas.  
82 En tanto, la sequía de 1994-1997, tuvo un costo en pérdidas y asistencia para el país cercano a 286  
83 millones de dólares (IICA, 1998).

84  
85 Pese a la importancia que este fenómeno reviste al país, persiste aun un factor que agudiza el problema de  
86 la vulnerabilidad de la sociedad y los ambientes áridos y semiáridos frente a su ocurrencia, cual es, la  
87 incertidumbre a la hora de caracterizar su intensidad, duración, severidad y frecuencia, asociado a la gran  
88 gama de definiciones conceptuales como operacionales. Esta dificultad en su definición, derivada de la  
89 complejidad para determinar el inicio o término de un evento de sequía, del mismo modo que otros  
90 desastres naturales, ha ido generando un cambio de enfoque en la comunidad internacional, desde la  
91 atención por la amenaza misma, a la atención por el impacto que ésta puede provocar en la sociedad, en  
92 términos de adaptar medidas adecuadas para mitigar los efectos de los desastres naturales y para integrar  
93 las estrategias de Gestión y Reducción de Riesgo de Desastres en la planificación del desarrollo (Bass *et*  
94 *al*, 2008).

95  
96 En este contexto, el riesgo de un desastre por sequía, ha sido definido como el producto de la exposición  
97 de la región afectada y el grado de vulnerabilidad de ésta frente al evento (Wilhite y Buchanan-Smith,  
98 2005). Por otro lado, otros autores ponen mayor énfasis en el término vulnerabilidad, definido como el  
99 grado en el cual los sistemas humanos y ambientales son susceptibles de experimentar daño debido a una  
100 perturbación o estrés (Luers *et al*, 2003; Adger, 2006; Smith and Wandel, 2006; Downing and  
101 Patwardhan, 2004, Scheneider *et al*, 2007).

102  
103 Independiente del enfoque utilizado para determinar el riesgo o vulnerabilidad de los sistemas sociales y  
104 ambientales a los eventos de sequía, el común denominador en todas las metodologías lo constituye la

105 necesidad de estimar la exposición o probabilidad de ocurrencia de un evento de sequía de determinada  
106 magnitud. Una posibilidad como esta, sin embargo, está sujeta a una de las restricciones más comunes en  
107 el ámbito del análisis hidrológico, cual es, la ausencia de una fuente de registros suficientes para  
108 estimación de eventos extremos, muy especialmente en zonas áridas y semiáridas (Kalma y Franks, 2003).  
109 Existen trabajos que abordan el estudio de frecuencias de sequías en Chile, como los de Fernández y  
110 Vergara (1998) y Fernández (1997). Sin embargo, estos estudios analizan las sequías hidrológicas y no  
111 contemplan el análisis de las de tipo meteorológico, que son la base para el conocimiento de este  
112 fenómeno y permite la estimación de los riesgos de sequía.

113  
114 La determinación de la probabilidad de ocurrencia de una sequía meteorológica, o déficit en las  
115 precipitaciones, así como de cualquier otro tipo de variable ambiental registrada a través del tiempo, es  
116 abordada mediante la hidrología probabilística. Sin embargo, las características propias de regiones áridas  
117 y semiáridas, con gran variabilidad temporal y espacial de las precipitaciones, influencia de factores  
118 externos de variabilidad decadal, como los efectos ENSO, y la reducida disponibilidad de registros de  
119 adecuada extensión, imponen ciertas restricciones a la elección del método más adecuado de ajuste  
120 probabilístico (Kalma y Franks, 2003). Es en este contexto, que el presente estudio enfrenta estas  
121 restricciones mediante la utilización del Análisis Regional de Frecuencias basado en L-momentos, que ha  
122 sido considerado como una de las mejores alternativas para abordar las restricciones mencionadas, para la  
123 evaluación y mapeo de la probabilidad de ocurrencia de eventos de sequía en la región semiárida de Chile.

124 .....

## 125 **MATERIALES Y MÉTODOS**

126

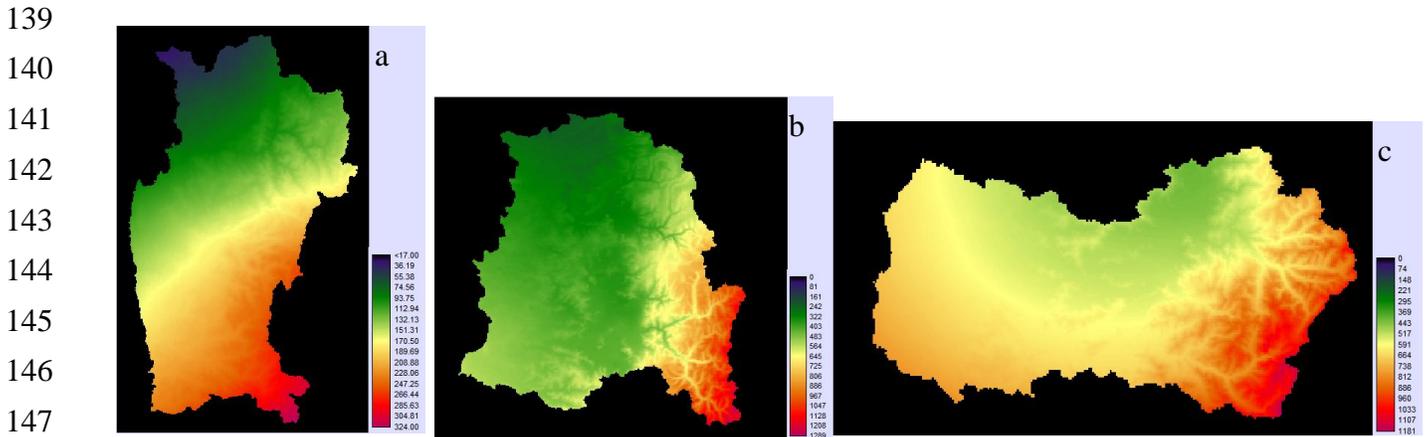
### 127 **a. Características geográficas y administrativas del área de estudio:**

128 El área de estudio, ubicada en la zona centro norte de Chile, corresponde, administrativamente, en  
129 dirección norte-sur, a las regiones de Coquimbo, Valparaíso, Metropolitana de Santiago y la del  
130 Libertador Bernardo O'Higgins. Geográficamente se ubica entre las latitudes 29°01' y 34°54' Lat Sur y  
131 entre las longitudes 69°50' y 72°04' Long. Oeste.

132

### 133 **b. Características de la precipitación media anual en el área de estudio:**

134 La Figura 1 presenta la variación espacial de la precipitación media anual en el área de estudio. Esta  
135 presenta un gradiente norte sur y este oeste, con un mínimo de 50 mm en el extremo noroeste, y un  
136 máximo de 1180 mm en el límite sureste. El origen extra-tropical de las perturbaciones frontales asociadas  
137 con las lluvias de invierno y su refuerzo orográfico a barlovento del cordón andino explican la  
138 disminución de la precipitación anual media de sur a norte y de cordillera a mar (Rutlant, 2004).



148 Figura 1. Precipitación media anual de las regiones de a) Coquimbo, b) Valparaíso y Metropolitana de  
149 Santiago y c) Libertador Bernardo O'Higgins.  
150

151 **c. Definición del evento de sequía**

152 Frente a la dificultad asociada a la gran variedad de definiciones conceptuales, operacionales y de  
153 indicadores disponibles para la sequía, se definió sequía, en este estudio, como un porcentaje respecto a la  
154 precipitación normal, medida muy utilizada en Chile para expresar el grado de superhabito o déficit de la  
155 precipitación, aun sabiendo que este indicador no considera el impacto diferencial que tiene en distintas  
156 regiones un mismo nivel de déficit respecto a la norma (Steinman *et al*, 2005). Para ello, se definió como  
157 sequía, aquella en que la precipitación anual es de un 40% o menos de la precipitación media, es decir, se  
158 presenta un 60% de déficit, lo que corresponde a una sequía intensa.  
159

160 **d. Fuente de datos**

161 Se dispuso de registros de precipitación mensual, de un total de 180 estaciones pluviométricas distribuidas  
162 en el área de estudio, los que fueron obtenidos de la Dirección General de Aguas y la Dirección  
163 Meteorológica de Chile. Para el caso de la región de Coquimbo, se dispuso de valores de precipitación  
164 diario, los cuales fueron agregados en precipitación mensual sólo para aquellos meses con registros diarios  
165 completos. Para el resto de las regiones, se dispuso únicamente de registros de precipitación mensual. En  
166 todo momento se trabajó únicamente con datos completos, no realizando ningún procedimiento para el  
167 relleno de datos faltantes. Por otro lado, se restringió el registro a aquellas estaciones con al menos 15  
168 años de datos completos de precipitación anual, quedando 172 estaciones disponibles para el análisis.  
169

170 En el Cuadro 1 se presentan algunas estadísticas descriptivas de la base de datos utilizada en el presente  
171 estudio. De acuerdo con el Cuadro, la longitud del periodo de registro medio fue de 29,2 años, con un  
172 mínimo de 15 y un máximo de 75 años. Respecto al método de recolección de los datos, la totalidad de las

173 180 estaciones utilizadas en este estudio registran la precipitación se con frecuencia diaria y de forma  
174 manual.

175 Cuadro 1. Estadísticas descriptivas registro estaciones pluviométricas.

Variable	<i>Precipitación Media Anual</i>	<i>Longitud de Registro</i>
N	172	172
Media	364.5	29.2
Desviación Estándar	194.8	11.9
Coef. de Variación [%]	53.4	41.1
Mínimo	52.7	15.0
Maximo	1055.6	75.0
Rango	1002.9	60.0

176

#### 177 e. Metodología del análisis regional de frecuencias basado en L-momentos

178 El Análisis Regional de Frecuencias (ARF), basado en la aplicación de los L-momentos, tiene su origen en  
179 el estudio de crecidas, siendo utilizado en mayor medida en el análisis de éstos eventos y el de  
180 precipitaciones máximas (Loucks y Van Beek, 2005; Schaefer *et al*, 2007; Schaefer *et al*, 2006; Norbiato  
181 *et al*, 2007).

182

183 Los L-momentos son un sistema alternativo para describir la forma de una distribución de probabilidad.  
184 Estadísticamente, los L-momentos son combinaciones lineales de las observaciones ordenadas obtenidas  
185 mediante los momentos ponderados por probabilidad, y por lo tanto, no implican elevaciones al  
186 cuadráticas o cúbicas como en el caso del método producto-momento, haciéndolos mucho menos  
187 sensibles a la presencia de outliers. Debido a esto, los estimadores L-momentos de los coeficientes de  
188 variación y de sesgo adimensionales son casi insesgados, y tienen una distribución casi normal. En  
189 cambio, los coeficientes de variación y sesgo estimados por los momentos convencionales son altamente  
190 sesgados y variables en muestras pequeñas. Además, los estimadores obtenidos mediante producto-  
191 momento presentan límites algebraicos dependientes del tamaño de la muestra, y en muchas muestras  
192 pequeñas o moderadas, es inusual para las estimaciones de sesgo y curtosis presentar valores siquiera  
193 cercanos al verdadero valor poblacional. De este modo, para un amplio rango de aplicaciones  
194 hidrológicas, especialmente aquellas relacionadas con tamaños de muestras pequeñas, los L-momentos  
195 proveen de manera simple y razonable, estimadores eficientes de las características hidrológicas de los  
196 datos y de los parámetros de una gran variedad de distribuciones (Hosking y Wallis, 1996; Stedinger,  
197 1993; Varas y Bois, 1998; Kjeldsen y Jones, 2004; Kottegoda y Rosso, 2008; Hosking, 1996; Reiss et al,  
198 2007; Norbiato et al, 2007; Delicado y Gorla, 2007; Vogel y Fennessey, 1993; Mishra et al, 2007;  
199 Ciunara, 2007).

200 En el caso específico de análisis de sequías, el ARF basado en L-momentos, se ha aplicado al estudio de  
201 la sequía meteorológica e hidrológica, tal como en la elaboración del Atlas de Sequía de EEUU (IWR,  
202 2008), análisis de sequías en el noroeste de México (Hallack-Alegria y Watkins, 2007), análisis de sequías  
203 en Turquía (Yurekli y Anli, 2008) y en comparación con otras alternativas de regionalización en el estudio  
204 de sequías en Europa (Tallaksen y Hisdal, 1999).

205  
206 La esencia del ARF es que los datos provenientes de sitios dentro de una región homogénea, pueden ser  
207 agregados para mejorar la precisión en las estimaciones de la relación probabilidad-cuantil en todos los  
208 sitios (Wallis *et al*, 2007). De esta manera se compensa la falta de información en registros cortos en cada  
209 sitio por la abundancia de información en el espacio (Loucks y Van Beek, 2005). Cunane (1988), citado  
210 por Norbiato *et al* (2007) comparó 20 métodos diferentes de análisis regional de frecuencias, y determinó  
211 como el mejor aquel basado en los momentos de probabilidad ponderada, precursores de los L-momentos.  
212 El procedimiento asume que los sitios dentro de una región homogénea presentan una distribución de  
213 frecuencias idéntica, excepto por un factor de escala específico para el sitio, representado por la media  
214 del sitio (Norbiato *et al*, 2007; Hosking y Wallis, 1996).

215  
216 En el presente estudio, el procedimiento de ARF se basó en las recomendaciones de Hosking y Wallis  
217 (1997) y consideró 5 etapas, aplicadas de manera sucesiva y consistente en:

218  
219 **Etapas 1: Preparación de datos:** Se realizó un esfuerzo considerable en la revisión y control de calidad de  
220 los datos de precipitación, el que tiene como finalidad eliminar falsos valores, asociados a una amplia  
221 variedad de mediciones de datos, su registro, presencia de errores de transcripción y registros incompletos  
222 durante algunos años. Se le dio un especial énfasis a la confirmación de los supuestos básicos en todo  
223 análisis probabilístico. Esta fase de revisión y preparación de datos consideró las recomendaciones de  
224 Helsel y Hirsch (2002), y permitió chequear los supuestos de estacionariedad, mediante el test de regresión  
225 lineal, consistencia, mediante el análisis de curvas doble masa y autocorrelación, mediante el test de  
226 Durbin-Watson (Dahmen y Hall, 1990; Wallis *et al*, 2007).

227  
228 **Etapas 2: Formación y aceptación de sub-regiones homogéneas:** El supuesto básico del ARF es que la  
229 distribución subyacente para un conjunto de sitios es la misma, dentro de una región homogénea (Hosking  
230 y Wallis, 1997). La identificación y formación de regiones homogéneas es un proceso iterativo (Schaefer  
231 *et al*, 2007). En este trabajo, considerando la alta estacionalidad de las precipitaciones en el área de  
232 estudio y la necesidad, posterior a este estudio, de describir la frecuencia de eventos de sequía mensual o  
233 multimensual, se optó por delimitar regiones homogéneas *a priori* basado en tres criterios:

234 1) Realizar un primer agrupamiento de estaciones en función de un Índice de  
235 Estacionalidad (IE), con grupos definidos por los siguientes rangos: grupo 1, estaciones  
236 con IE entre 0 y 0,2; grupo 2, con IE entre 0,2 y 0,6 y grupo 3, con IE mayor a 0,6. El IE  
237 utilizado es el descrito por Schaefer *et al* (2007) cuya base es la estadística circular, que  
238 considera el día medio de ocurrencia, análogo a la media aritmética, y el índice de  
239 estacionalidad, análogo a una medida estandarizada de variación. El IE toma valores entre  
240 0 y 1. Valores cercanos a 0 indican una gran variación en los días de ocurrencia, mientras  
241 que valores cercanos a 1 indican una baja variación en los días de ocurrencia y por tanto  
242 alta concentración de los datos.

243 2) En el caso de que las estaciones analizadas se encuentren todas dentro de un mismo  
244 rango de IE, éstas pueden ser agrupadas en sub-regiones homogéneas basado únicamente  
245 en la magnitud de su precipitación media anual (PMA). De esta manera, las estaciones son  
246 ordenadas de menor a mayor magnitud de la PMA y agregadas en una cantidad  
247 conveniente de sub-regiones. Esta cantidad debe considerar, por un lado, un número  
248 mínimo de 7 estaciones por sub-región (define el límite máximo de sub-regiones),  
249 recomendado para el cálculo de la medida de discordancia, y por otro lado, un cantidad de  
250 sub-regiones que permita un ajuste adecuado de la función que relaciona los L-momentos  
251 regionales con la PMA regional, necesaria con fines de mapeo (define el límite mínimo de  
252 sub-regiones. Con este criterio se delimitaron 8 sub-regiones homogéneas.

253 3) De acuerdo con Hosking y Wallis (1997), las regiones homogéneas no requieren ser  
254 geográficamente continuas, de modo que no se forzó a las estaciones a pertenecer a una  
255 determinada región en función de su ubicación geográfica.

256

257 El grado de homogeneidad de las sub-regiones propuestas se basó en la medida estadística H1 definida  
258 por Hosking y Wallis (1997). La estadística H1 mide la variabilidad relativa de L-Cv observado a partir  
259 de la muestra, y es utilizada para analizar la heterogeneidad en cada una de las 8 sub-regiones homogéneas  
260 propuestas (Wallis *et al*, 2007). A diferencia de los valores críticos definidos por Hosking y Wallis (1997),  
261 en este estudio se determinó como aceptablemente homogénea toda aquella región cuyo H1 fuese menor a  
262 2 y como heterogénea, si H1 es mayor a 3. Esta determinación se basó en Wallis (2008) y se fundamenta  
263 en que los límites propuestos originalmente, sólo tenían en cuenta la variabilidad estadística y no  
264 contemplaban la variación asociada a la operación y mantenimiento de los sistemas de medición.

265

266 **Etapa 3: Determinación de la distribución de probabilidad de mejor ajuste:** Una vez que las sub-  
267 regiones homogéneas han satisfecho la condición de homogeneidad, se determinó, basados en los ratios de

268 los L-momentos regionales, la distribución de probabilidad regional, de acuerdo con la medida de  
269 bondad de ajuste descrita por Hosking y Wallis (1997), la cual fue aplicada a cada una de las sub-regiones  
270 homogéneas para la selección de la distribución de frecuencia de mejor ajuste. Las distribuciones  
271 seleccionadas para evaluar la medida de mejor ajuste fueron la Pareto Generalizada, la Generalizada de  
272 Valor Extremo, la Generalizada Normal, Pearson Tipo III, Generalizada Logística, Kappa y Gaucho. Las  
273 primeras 6 de estas distribuciones y su estimación a partir de los ratios L-momentos está bien  
274 documentada (Hosking y Wallis, 1996; Abdul-Moniem y Selim, 2009; Shawky y Abu-Zinadah, 2007;  
275 Karvanen, 2006; Delicado y Gorla, 2007; Gupta y Kundu, 2000). La distribución Gaucho, acá señalada,  
276 corresponde específicamente a una distribución Kappa, de 4 parámetros, en la que el segundo parámetro  
277 de forma,  $h$ , es fijado a un valor de 0.5000. De este modo, se constituye en una distribución de 3  
278 parámetros, la cual es posible representar en un diagrama de L-momentos ratios entre las distribuciones  
279 Pareto Generalizada y Generalizada de Valor Extremo (Schaefer y Wallis, 2008; Peel *et al*, 2001).

280  
281 **Etapas 4: Determinación de cuantiles:** Los cuantiles de la distribución regional o curva de crecimiento, se  
282 determinaron a partir de los L-momentos y la distribución de mejor ajuste, recordando que la distribución  
283 regional presenta una media igual a 1, mientras que la distribución de cuantiles en cada sitio puede ser  
284 estimada mediante la multiplicación de la curva regional por la PMA del sitio.

285  
286 **Etapas 5: Mapeo del periodo de retorno de la sequía:** Una de las especiales ventajas que presenta el  
287 método de ARF basado en L-momentos es la facilidad de implementar el mapeo espacial de los cuantiles,  
288 considerando aquellos sitios medidos y no medidos. Esto ha sido demostrado ya en varios ejemplos de  
289 aplicación (Wallis *et al*, 2007; Schefer *et al*, 2007, Schaefer *et al*, 2006; Baldassare *et al*, 2006; Baldassare  
290 *et al*, 2005; Raiford *et al*, 2007). El procedimiento de mapeo del periodo de retorno del evento de la sequía  
291 analizada consideró las siguientes dos etapas:

292 1) Determinación de la función predictora: Se determinó la relación entre los L-momentos y la  
293 Precipitación Media Anual como variable predictora. Si bien existen diversas alternativas para  
294 establecer una relación funcional entre los L-momentos y variables auxiliares, una de las más  
295 utilizadas han sido aquellas basadas en la Precipitación Media Anual como variable predictora. En  
296 este estudio, la función utilizada fue la siguiente:

$$L - momento = \alpha e^{-\beta(PMA)} + \delta$$

297  
298  
299 Donde, PMA es la precipitación media anual, L-momento corresponde a los momentos lineales L-  
300 Cv, L-Skewness y L-Kutosis; alfa, beta y delta son constantes a ser determinar mediante

301 optimización. La bondad de ajuste se determinó mediante la raíz estandarizada del error  
302 cuadrático medio (RMSE) y su valor relativo a la media de los valores observados, en porcentaje

303  
304 2) Mapeo del periodo de retorno de sequía anual severa: El procedimiento de mapeo consistió en:  
305 generar los mapas de periodo de retorno de la sequía analizada, mediante las relaciones L-  
306 momento vs PMA y los mapas de PMA presentados en la Figura 1, proporcionados por Morales  
307 (2009). Los mapas fueron obtenidos mediante la herramienta de cómputo L-MAP, aunque  
308 también es posible realizar este procedimiento en las distribuciones invertibles, mediante álgebra  
309 de mapas.

310

### 311 **f. De la herramienta de análisis**

312 En este estudio, se aplicaron dos herramientas de análisis principales:

313 a) La herramienta de cómputo L-RAP, abreviatura de *Linear Regional Analysis of Precipitation* (MGS,  
314 2008) es un software codificado en Visual Basic que se basa en las rutinas desarrolladas por Hosking  
315 (2005) pero que, a diferencia de las versiones en Fortran y R presenta una serie de características:

- 316 i. Posee una interfase de usuario amigable, sin necesidad de las complejas programaciones basadas  
317 en R ni la generación de complejos archivos de ingreso basados en Fortran
- 318 ii. Realiza paso a paso cada una de las etapas asociadas al análisis regional de frecuencias como  
319 importación de datos en formato Excel®, control de calidad, chequeo de supuestos de  
320 estacionariedad mediante regresión lineal, determinación de Índice de Estacionalidad, L-  
321 momentos; determinación de Índices de Discordancia y Heterogeneidad, determinación de  
322 parámetros y cuantiles
- 323 iii. Genera de gráficos de diagrama L-Ratios y cuantiles y gráficos de resumen de cada estación
- 324 iv. Edita la base de datos almacenada en un formato binario interno de L-RAP

325 b) La herramienta L-MAP, programada en Visual Basic, cuya función es relacionar las funciones de ajuste  
326 entre los L-momentos vs. PMA, con imágenes raster de la PMA y posteriormente, utilizar estas relaciones  
327 con los mismos algoritmos de L-RAP para la elaboración de mapas de probabilidad o periodo de retorno.

328 .....

## 329 **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

330

331 **Preparación de datos:** Las 172 estaciones que cumplieron el criterio de tener 15 o más años de registro,  
332 tuvieron en promedio 29,2 años de registro, con un total de 5015 años-registro. Presentaron una  
333 precipitación media de 364,5 mm y un IE promedio de 0,87, con un mínimo de 0,72 y un máximo de 0,94.  
334 Esto implica una alta concentración de la precipitación en una sola época de lluvias. De acuerdo con el

335 criterio definido en *Etapa 2 (a)*, no fue necesario utilizar el criterio de estacionalidad para separar  
 336 estaciones en regiones homogéneas y sólo se formaron sub-regiones homogéneas basadas en la magnitud  
 337 de la PMA.

338  
 339 **Formación y aceptación de sub-regiones homogéneas:** Tal como lo indican Wallis *et al* (2007),  
 340 Schaefer *et al*, (2007) y Schaefer *et al* (2006), la formación de regiones homogéneas es un proceso  
 341 iterativo. El Cuadro 2 presenta las regiones homogéneas propuestas, así como algunos de sus estadísticas  
 342 descriptivas y l-momentos, luego de un proceso de 3 iteraciones. Estas iteraciones consistieron en eliminar  
 343 del análisis algunas estaciones que fueron permanentemente discordantes, cambiar algunas estaciones de  
 344 una región homogénea a otra, en función de sus L-momentos, que afectaron en algún momentos tanto el  
 345 índice de discordancia como haber provocado valores de H1 por sobre el valor crítico. De acuerdo con el  
 346 cuadro, las 8 sub-regiones finalmente propuestas, fueron consideradas homogéneas en términos de H1.  
 347 Las sub-regiones 4, 5 y 6 presentan valores de H1 negativos, lo cual se puede interpretar como que el nivel  
 348 de homogeneidad es mayor al esperado de una región homogénea proveniente de una distribución Kappa  
 349 de 4 parámetros, con los mismos l-momentos regionales de la sub-región analizada.

350

351

Cuadro 2. Estadísticas de resultado del Análisis Regional de Frecuencias de la PMA

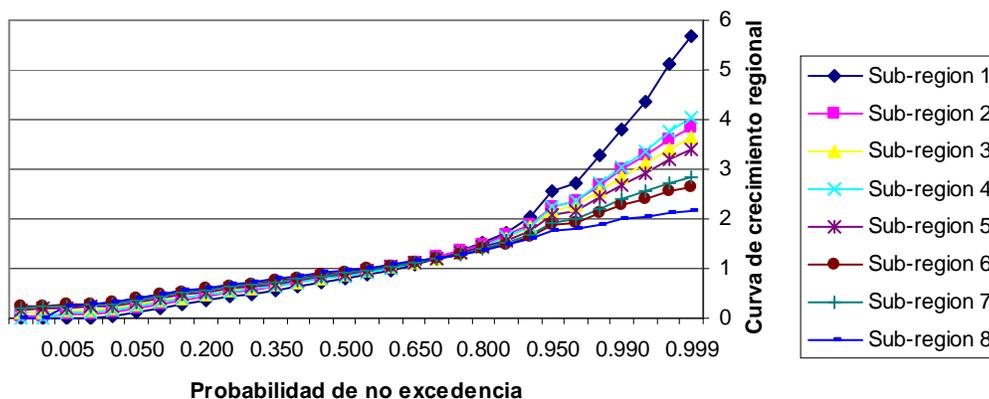
Región	PMA	# Estaciones	# Datos	L-Cv	L-Skew	L-Kurt	H1	Distribución					
								GL	GEV	P3	GN	Gaucho	GP
1	114,8	21	771	0,4146	0,2733	0,1373	0,76			X		X	X
2	191,4	21	667	0,3507	0,2028	0,1065	1,23					X	
3	242,5	21	564	0,3250	0,2028	0,1217	1,01			X		X	
4	281,4	20	583	0,3402	0,2242	0,1393	-2,16			X	X	X	
5	351,8	22	617	0,3001	0,1991	0,1475	-2,1		X	X	X	X	
6	437,7	21	552	0,2561	0,1502	0,1196	-1,62		X	X	X	X	
7	543,1	21	764	0,2715	0,1616	0,1117	1,65			X		X	
8	739,3	21	586	0,2351	0,0856	0,0967	1,05					X	

352

353 **Determinación de funciones de distribución:** El Cuadro 2 presenta las regiones homogéneas propuestas,  
 354 así como las distribuciones de mejor ajuste, de acuerdo con la medida de bondad de ajuste z (Hosking y  
 355 Wallis, 1997). Las distribuciones que se ajustaron, en orden de mayor a menor cantidad ajustes fueron la  
 356 Gaucho, Pearson 3, Generalizada Normal, Generalizada de Valor Extremo y Generalizada de Pareto. La  
 357 única distribución común a todas las sub-regiones homogéneas fue la Gaucho. Esto confirma el que la  
 358 distribución Kappa presenta un alto grado de flexibilidad para adecuarse a una serie de condiciones. De  
 359 hecho, una serie de otras distribuciones comúnmente utilizadas en hidrología son casos particulares de la  
 360 distribución Kappa (Finney, 2004).

361

362 **Determinación de cuantiles:** En la Figura 2 se presentan los cuantiles regionales de cada una de las 8 sub-  
 363 regiones homogéneas, determinados a partir de la distribución Kappa de 4 parámetros (Gaucho), la cual  
 364 fue la única que se ajustó de manera común a las 8 sub-regiones homogéneas. Se aprecia que existe una  
 365 tendencia a que, desde la sub-región 1 a la sub-región 8, se presente un mayor rango de variación en la  
 366 curva de crecimiento. Esto implica una mayor variabilidad en los cuantiles regionales y en los de cada  
 367 sitio. Esto tiene relación con los montos de precipitación media anual, que se incrementan en el mismo  
 368 sentido, desde la sub-región 1 a la 8. Es decir, la variabilidad, medida en términos de L-Cv, L-skewness y  
 369 L-Kurtosis, disminuye desde la zona norte más áridas a la zona sur más húmeda. Este comportamiento es  
 370 similar al descrito por Wallis *et al* (2007); Schaefer *et al* (2007) y Schaefer *et al* (2006) y coincide  
 371 totalmente con la idea de la alta variabilidad interanual de las precipitaciones en regiones áridas y  
 372 semiáridas (Seth, 2003) y es totalmente coincidente con los análisis de variabilidad de la precipitación  
 373 anual para el territorio chileno (Gastó, 1966).



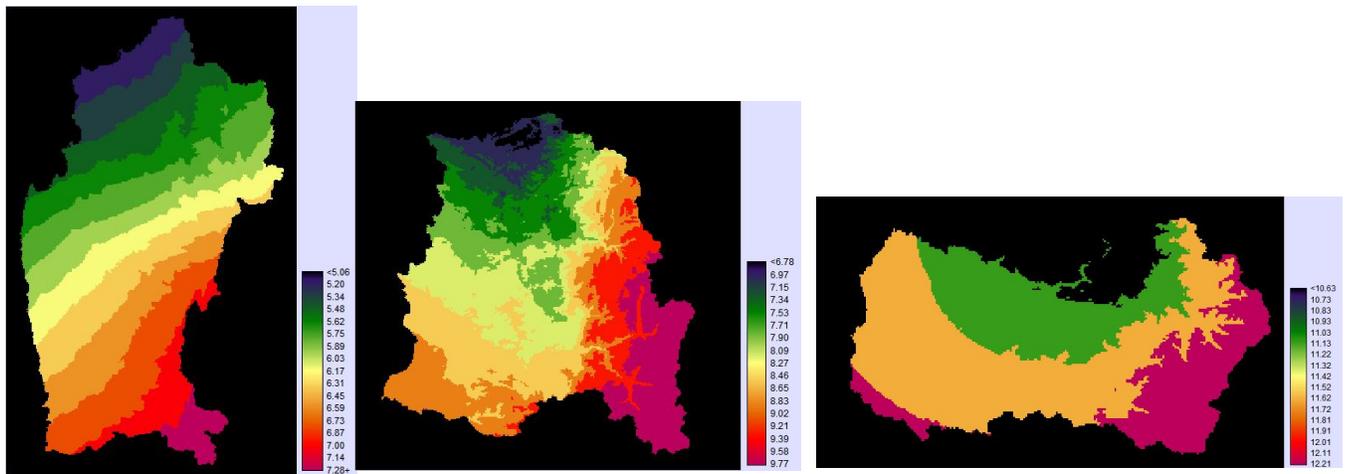
374  
 375 Figura 2. Curvas de crecimiento regional de cada una de las 8 sub-regiones homogéneas.

376  
 377 **Determinación de las relaciones de mejor ajuste:** El Cuadro 3 presentan los coeficientes y el RMSE de  
 378 las funciones de mejor ajuste entre los L-momentos y la PMA. EL RMSE puede ser considerado como  
 379 bajo y se aprecia que el ajuste es mejor para el L-Cv y menor para el L-Kurtosis. En los 3 L-momentos,  
 380 los valores de SRMSE son similares a los registrados por Wallis *et al* (2007) al analizar precipitaciones  
 381 máximas en 24 y 2 horas en Washington.

382  
 383 Cuadro 3. Estadísticas de optimización de funciones de mejor ajuste L-momento vs. PMA.

L-momento	alfa	beta	delta	RMSE	SRMSE [%]
L-CV	0.3030	0.0040	0.2214	0.01136616	3.60
L-Skewness	0.2943	0.0018	0.0291	0.01807645	9.58
L-Kurtosis	0.7351	0.0342	0.1195	0.01422268	11.41

385 Mapeo del periodo de retorno del evento de sequía: En la Figura 3 se presentan los mapas de periodo de  
386 retorno asociados a la ocurrencia de un evento de severa, equivalentes a un 60% de déficit en la  
387 precipitación anual respecto a la media. De acuerdo con los mapas, este evento es más frecuente en el  
388 límite norte del área de estudio (5 años) y es mayor en el límite sur (10 años). Sin embargo, los valores al  
389 límite deben ser considerados con precaución debido a que son función de la relación L-momento vs  
390 PMA, la cual no incluye la PMA mínima de un punto específico, sino la PMA de la sub-región  
391 homogénea ubicada en el límite norte, con un mayor valor de PMA y por tanto, mayor valor de los L-  
392 momentos.



393  
394  
395  
396  
397  
398  
399  
400  
401  
402  
403 Figura 3. Mapas de periodo de retorno de una sequía severa, equivalente a un déficit del 60% respecto a la  
404 precipitación media anual.  
405 .....

### 406 CONCLUSIONES

407  
408 El Análisis Regional de Frecuencias basado en los L-momentos es un procedimiento que  
409 contribuye significativamente a la hidrología probabilística, al permitir compensar la escasez de  
410 información en el tiempo, por la abundancia de ésta en el espacio. A través de una secuencia de 5  
411 etapas, es posible derivar información base para la toma de decisiones en la gestión de riesgos  
412 climáticos, como es el riesgo de sequías. Por otro lado, permite generar mapas de periodos de  
413 retorno de manera simple y con una base estadística robusta. Los mapas obtenidos pueden ser  
414 utilizados para delimitar zonas más susceptibles a las sequías y, en conjunto con cartografía de  
415 vulnerabilidad de los sistemas agropecuarios a la sequía, es posible delimitar zonas de mayor  
416 riesgo, orientando de mejor forma recursos económicos y humanos para programas de  
417 mitigación, prevención y generación de capacidad adaptativa.

418 .....

419 **AGRADECIMIENTOS**

420 Los autores desean agradecer muy especialmente a las siguientes instituciones y personas que han  
421 contribuido al desarrollo de este proyecto. El Gobierno de Flandes (Bélgica); el Programa  
422 Hidrológico Internacional de UNESCO, la Dirección General de Aguas de Chile y la Dirección  
423 Meteorológica de Chile que facilitaron la información meteorológica y respondieron siempre  
424 cordialmente nuestras solicitudes; a los doctores James Wallis y Melvin Schaefer por su  
425 profesionalismo y compartir con nosotros toda una vida de experiencia en la metodología.

426 .....

427

428 **LITERATURA CITADA**

429 ABDUL-MONIEM, I. and Y. SELIM. 2009. TL-Moments and L-Moments Estimation for the Generalized  
430 Pareto Distribution. Applied Mathematical Sciences, Vol. 3, 2009, no. 1, 43 – 52

431  
432 ADGER, W. 2006. Vulnerability. Global Environmental Change 16 (2006) 268–281

433  
434 ASKEW, A. and J. ROODA. 1996. Addressing arid zone problems. L'hydrologie tropicale: séoscience et  
435 outil pour le développement (Actes de la conférence de Paris, mai 1995).IAHS Publ. no. 238, 1996.

436  
437 BALDASSARRE, G., A. CASTELLARIN, and A. BRATH. 2006. Relationships between statistics of  
438 rainfall extremes and mean annual precipitation: an application for design-storm estimation in northern  
439 central Italy. Hydrol. Earth Syst. Sci., 10, 589–601, 2006

440  
441 BALDASSARRE, G., A. CASTELLARIN, and A. BRATH. 2005. Evidences of relationships between  
442 statistics of rainfall extremes and mean annual precipitation: an application for design-storm estimation in  
443 northern central Italy. Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., 2, 2393–2425, 2005

444  
445 BASS, S., S. RAMASAMY, J. DEY DEPRICK and F. BATTISTA. 2008. Disaster Risk Management  
446 Systems Analysis. Environment, Climate Change and Bioenergy Division. Food and Agriculture  
447 Organisation of the United Nations. Rome, January 2008

448  
449 BELOW, R., E. GROVER-KOPEC and M. DILLEY. Documenting Drought-Related Disasters A Global  
450 Reassessment. The Journal of Environment & Development Volume 16 Number 3 September 2007 328-  
451 344

452  
453 BRANT, S. 2007. Assessing vulnerability to drought in ceará, northeast Brazil. A thesis submitted in  
454 partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (Natural Resources and  
455 Environment) University of Michigan.

456  
457 CIUMARA, R. 2007. L-moments evaluation for identically and nonidentically weibull distributed  
458 random variables. Proceedings of the Romanian Academy, Series A, Volume 8, Number 3/2007, pp. 000-  
459 000

460  
461 DAHMEN, E., M. HALL and INTERNATIONAL INSTITUTE FOR LAND RECLAMATION AND  
462 IMPROVEMENT. 1990 Screening of hydrological data : tests for stationarity and relative consistency /

463 E.R. Dahmen [and] M.J. Hall International Institute for Land Reclamation and Improvement,  
464 Wageningen, Netherlands  
465  
466  
467 DELICADO, P. Y GORIA, M. 2007. A small sample comparison of maximum likelihood, moments and  
468 L-moments methods for the asymmetric exponential power Distribution. Computational Statistics & Data  
469 Analysis 52 (2008) 1661 – 1673  
470  
471 DOWNING, T. and A. PATWARDHAN. Assessing Vulnerability for Climate Adaptation. In: Adaptation  
472 Policy Frameworks for Climate Change: Developing Strategies, Policies and Measures. **Edited by Bo**  
473 **Lim, Erika Spanger-Siefried.**  
474  
475 ESPINOZA, G. 1985. Los desastres y su relación con el manejo de los recursos naturales en Chile. AMB.  
476 y DES., VOL I, N° 3, Págs. 159-172, octubre 1985  
477  
478 ESPINOZA, G. y E. HAJEK. 1988. Riesgos climáticos: Evidencias en Chile central. En: FUENTES, E. Y  
479 PEÑAFRENA, S. Editores. Ecología del paisaje en Chile Central: Estudios sobre sus espacios  
480 montañosos. Ediciones Universidad Católica de Chile.  
481  
482 FERNANDEZ, B. 1997. Identificación y caracterización de sequías hidrológicas en Chile central.  
483 Ingeniería del Agua Vol 4. Num. 4:37-46.  
484 <http://upcommons.upc.edu/revistes/bitstream/2099/3082/1/44article4.pdf>  
485  
486 FERNANDEZ, B., G. DONOSO, M. LURASCHI, D. ORPHANOPOLOUS, Y C. SALAZAR. 1997.  
487 Estimación del impacto económico asociado a sequías hidrológicas. VI Jornadas de CONAPHI Chile.  
488  
489 FERNANDEZ, B. Y A. VERGARA. 1998. Risk of scarcity of monthly precipitation and streamflows in  
490 semiarid regions. Hydrological Sciences Journal. Vol 43 (5): 759-773  
491  
492 FINNEY, J. 2004. Optimization of a skewed logistic distribution with respect to the kolmogorov-smirnov  
493 test. A Dissertation Submitted to the Graduate Faculty of the Louisiana State University and Agricultural  
494 and Mechanical College in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy  
495 in The Interdepartmental Program in Engineering Science  
496  
497 GASTO, J. 1966. "Variaciones de las precipitaciones anuales en Chile", Bol. Téc. Fac. Agron. Univ. Chile  
498 24: 4-20.  
499  
500 GUPTA, R. Y D. KUNDU. 2000. Generalized exponential distribution: different method of estimations.  
501 J. Statist. Comput. Simul., 2000, Vol. 00, pp. 1 ± 22  
502  
503 HALLACK-ALEGRIA, M. and D.W. WATKINS JR. 2007. "Annual and Warm Season Drought  
504 Intensity-Duration-Frequency Analysis for Sonora, Mexico," Journal of Climate, 20(9): 1897-1909, 2007.  
505  
506 HELSEL, D. and R. HIRSH, 1992. Statistical methods in water resources. Studies in Environmental  
507 Science 49. Elsevier.  
508  
509 HOSKING, J. 2005. Fortran routines for use with the method of L-moments Version 3.04.  
510  
511 HOSKING, J. and J. WALLIS. 1997. Regional frequency analysis: an approach based on Lmoments.  
512 Cambridge University Press, Cambridge, U.K.  
513

514 IICA. 1998. Sequía 1994 - 1997 : Lecciones y experiencias. Chile. Comisión Nacional de Sequía; Instituto  
515 Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). Agencia de Cooperación Técnica. Santiago,  
516 CL; 1998. 77 pag  
517

518 KALMA, J. y S. FRANKS. 2003. Rainfall in arid and semiarid regions. Chapter 2. In: Simmers, I(Ed).  
519 Understanding water in a Dry Environment. Hydrological processes in arid and semiarid zones.  
520 International Association of Hydrogeologists. BALKEMA. Lissier. 15-63  
521

522 KARVANEN, J. 2006. Estimation of quantile mixtures via L-moments and trimmed L-moments.  
523 Computational Statistics & Data Analysis. Volume 51, Issue 2, 15 November 2006, Pages 947-959  
524  
525

526 KJELDTSEN T.R. and D. JONES. (2004) Sampling variance of flood quantiles from the generalised  
527 logistic distribution estimated using the method of L-moments. Hydrology and Earth System Sciences,  
528 8(2), 183-190.  
529

530 KOTTEGODA, N. and R. ROSSO. 2008. Applied Statistics for Civil and Environmental Engineers.  
531

532 LEHNER, B. Y P. DÖLL. 2001. Europe's drought today and in the future. Lehner B, Doll P. 2001.  
533 Europe's droughts today and in the future. In Eurowasser – Model-based Assessment of European Water  
534 Resources and Hydrology in the Face of Global Change, Kassel World Water Series Report No 5, Lehner  
535 B, Henrichs T, Doll P, Alcamo J (eds). Kassel: Germany; 7.1–7.16.  
536

537 LOUCKS, D. and E. VAN BEEK. 2005. Water Resources Systems Planning and Management: An  
538 Introduction to Methods, Models, and Applications. Paris, France: UNESCO Press  
539

540 LUERS, A., D. LOBELL, L. SKLAR, C. ADDAMS and P. MATSON. 2003. A method for quantifying  
541 vulnerability, applied to the agricultural system of the Yaqui Valley, Mexico. Global Environmental  
542 Change 13 (2003) 255–267  
543

544 MARCOS VALIENTE, Ó. 1999. Evaluación de la vulnerabilidad a la sequía en el nordeste de brasil  
545 mediante indicadores socioclimáticos.  
546

547 MISHRA, B. , Y. TACHIKAWA, and K. TAKARA. 2007. Suitability of simple size for identifying  
548 distribution function in regional frequency analysis. Annuals of Disas. XXXX  
549

550 NORBIATO, D., M. BORGA, M. SANGATI and F. ZANON. 2007. Regional frequency analysis of  
551 extreme precipitation in the eastern Italian Alps and the August 29, 2003 flash flood. Journal of  
552 Hydrology (2007) 345, 149– 166  
553

554 PATRICK, E. 2003. Sequía: Vulnerabilidad y crisis en tierras áridas. Estrategia Internacional para la  
555 reducción de desastres.  
556 [http://www.unisdr.org/eng/public\\_aware/world\\_camp/2003/spanish/19\\_Article\\_UNDP\\_spa.pdf](http://www.unisdr.org/eng/public_aware/world_camp/2003/spanish/19_Article_UNDP_spa.pdf)  
557

558 PEEL, M. C., Q. WANG, R. VOGEL, and T. MCMAHON. 2001. The utility of L-moment ratio diagrams  
559 for selecting a regional probability distribution. Hydrological Sciences-Journal-des Sciences  
560 Hydrologiques  
561

562 REISS, R., M. THOMAS, and J. HOSKING. 2007. Chapter 14. Flood frequency analysis. In: Statistical  
563 Analysis of Extreme Values with Applications to Insurance, Finance, Hydrology and Other Fields. Third  
564 Edition.

565  
566 RAIFORD, J.P., N. AZIZ, A. KHAN and D. POWELL. 2007. Rainfall Depth-Duration-Frequency  
567 Relationships for South Carolina, North Carolina, and Georgia. American Journal of Environmental  
568 Sciences 3 (2): 78-84, 2007  
569  
570 RUTLANT, J. 2004. Aspectos de la circulación atmosférica de gran escala asociada al ciclo ENOS 1997-  
571 1999 y sus consecuencias en el régimen de precipitación en Chile central. En: S. AVARIA, J.  
572 CARRASCO, J. RUTLLANT y E. YÁÑEZ. (eds.). 2004. El Niño-La Niña 1997-2000. Sus Efectos en  
573 Chile. CONA, Chile, Valparaíso. pp. 61-76.  
574  
575 SETH, S. 2003. Human impacts and management issues in arid and semi-arid regions. Chapter 8. In:  
576 Simmers, I(Ed). Understanding water in a Dry Environment. Hydrological processes in arid and semiarid  
577 zones. International Association of Hydrogeologists. BALKEMA. Lissier. 289-341  
578  
579 SCHAEFER, M.; B. BARKER, G. TAYLOR, and J. WALLIS. 2007. Regional precipitation-frequency  
580 analysis and spatial mapping for 24-hour precipitation for Oregon. MGC Engineering Consultants, Inc and  
581 Oregon Climate Service.  
582  
583 SCHAEFER, M. Y J. WALLIS, 2008. Comunicación Personal  
584  
585 SCHNEIDER, S.H., S. SEMENOV, A. PATWARDHAN, I. BURTON, C.H.D. MAGADZA, M.  
586 OPPENHEIMER, A.B. PITTOCK, A. RAHMAN, J.B. SMITH, A. SUAREZ AND F. YAMIN, 2007:  
587 Assessing key vulnerabilities and the risk from climate change. Climate Change 2007: Impacts,  
588 Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the  
589 Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der  
590 Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 779-810.  
591  
592 SHAWKY, A. y H. ABU-ZINADAH. 2009. Exponentiated Pareto Distribution: Different Method of  
593 Estimations. Int. J. Contemp. Math. Sciences, Vol. 4, 2009, no. 14, 677 - 693  
594  
595 SMITH, B. and J. WANDEL 2006. Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. Global  
596 Environmental Change 16 (2006) 282–292  
597  
598 STEDINGER, J.R., R. VOGEL and E. FOUFOULA-GEORGIU. 1993. Frequency Analysis of Extreme  
599 Events, Chapter 18, Handbook of Hydrology, McGraw-Hill Book Company, David R. Maidment, Editor-  
600 in-Chief, 1993  
601  
602 STEINEMANN, A., M. HAYES, AND L. CAVALCANTI . 2005; Drought Indicators and Triggers. In:  
603 Wilhite, D. Editor: Drought and Water Crises Science, Technology, and Management Issues.  
604  
605 TALLAKSEN, L. Y HISDAL, H. 1999. Methods of regional classification of stremflow droguht series:  
606 the EOF Method and L-moments. Technica Report N°2. [http://www.hydrology.uni-](http://www.hydrology.uni-freiburg.de/forsch/aride/navigation/publications/publications.htm)  
607 [freiburg.de/forsch/aride/navigation/publications/publications.htm](http://www.hydrology.uni-freiburg.de/forsch/aride/navigation/publications/publications.htm)  
608  
609 VARAS E. Y P. BOIS. 1998. Hidrología Probabilística. Ed. Universidad Católica, Santiago, Chile. 1998.  
610  
611 VOGEL, R. and M. FENNESSEY. 1993. L-moments diagrams should replace moment product diagrams.  
612 Water Resources Research.  
613

- 614 WALLIS, J., M. SCHAEFER, B. BARRER. and G. TAYLOR. 2007. Regional precipitation-frequency  
615 analysis and spatial mapping for 24-hour and 2-hour durations for Washington States. *Hydrol. Earth Syst.*  
616 *Sci.*, 11(1), 415-442  
617
- 618 WILHITE, D. and M. BUCHANAN-SMITH. 2005. Drought as Hazard: Understanding the Natural and  
619 Social Context. In: Wilhite, D. Editor: *Drought and Water Crises Science, Technology, and Management*  
620 *Issues*.  
621
- 622 WILHITE, D. and M. SVOBODA. 2000. Drought Early Warning Systems in the Context of Drought  
623 Preparedness and Mitigation. En: Wilhite, D.A.; M.V.K. Sivakumar; and D.A. Wood (eds.). 2000. *Early*  
624 *Warning Systems for Drought Preparedness and Drought Management. Proceedings of an Expert Group*  
625 *Meeting. Lisbon, Portugal, September 5–7. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.*  
626 [http://drought.unl.edu/monitor/EWS/EWS\\_WMO.html](http://drought.unl.edu/monitor/EWS/EWS_WMO.html)  
627
- 628 YUREKLI, K. and A. ANLI. 2008. Analyzing Drought Based on Annual Total Rainfalls over Tokat  
629 Province. *International Journal of Natural and Engineering Sciences* 2 (2): 21-26, 2008