



**MEDIO AMBIENTE**  
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



**COORDINACIÓN DE DESARROLLO  
PROFESIONAL E INSTITUCIONAL**

**SUBCOORDINACIÓN DE POSGRADO**

**TESIS**

**ANÁLISIS REGIONAL DE FRECUENCIA DE SEQUÍAS EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO,  
MÉXICO, CON BASE EN LA METODOLOGÍA DE L-MOMENTOS**

que para obtener el grado de  
**Maestro en  
Ciencias y Tecnología del Agua**

presenta  
**Jesús Alberto Ceballos Tavares**

**Tutor: Dr. David Ortega Gaucin**

**Jiutepec, Morelos**

**2020**





Con fundamento en los artículos 21 y 27 de la Ley Federal del Derecho de Autor y como titular de los derechos moral y patrimoniales de la obra titulada “ANÁLISIS REGIONAL DE FRECUENCIA DE SEQUÍAS EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO, MÉXICO, CON BASE EN LA METODOLOGÍA DE L-MOMENTOS”, otorgo de manera gratuita y permanente al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, autorización para que fijen la obra en cualquier medio, incluido el electrónico, y la divulguen entre su personal, estudiantes o terceras personas, sin que pueda percibir por tal divulgación una contraprestación.

**JESÚS ALBERTO CEBALLOS TAVARES**

---

Jiutepec, Morelos, 14 de enero de 2020.



## **DEDICATORIAS**

Principalmente a mi madre, Mirna Catalina Tabares Adán, quien forjó desde pequeño a la persona que soy ahora, gracias por todo lo que me enseñaste y por todo tu amor.

A mi padre, Juan Carmelo Ceballos Ramos, gracias por todo el apoyo durante este tiempo, por estar ahí en cada momento difícil y por no dejarme solo, algún día espero ser tan buen padre como lo has sido para mí.

A Natalia Uribe Uribe, que a pesar de las dificultades y los momentos complicados siempre estuviste ahí para darme ánimos cada vez que los necesitaba. Gracias por nuestra pequeña Valentina a quien también le dedico este logro, ya que son mi principal motor para seguir adelante.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi tutor, Dr. David Ortega Gaucin, por brindarme el tiempo y la confianza que necesitaba durante el trabajo de investigación, despejando dudas y aportando conocimientos. Gracias.

A mis sinodales, Dr. Rene Lobato, Dr. Efraín Mateos, Dr. Javier Aparicio y M.I. Jesús de la Cruz, por su tiempo y aportaciones realizadas durante cada una de las evaluaciones.

Al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, por el apoyo económico otorgado durante mi estancia en el programa de maestría, así como su hospitalidad dentro de las instalaciones.

# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL .....	1
ÍNDICE DE FIGURAS.....	3
ÍNDICE DE TABLAS.....	5
RESUMEN.....	7
ABSTRACT .....	8
<b>CAPÍTULO I PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>9</b>
1.1.- Antecedentes.....	9
1.1.1 Contexto nacional e internacional .....	9
1.1.2.- Estudios realizados en la cuenca del río Bravo.....	11
1.1.3.- Estudios realizados con el método ARF-LM .....	14
1.2.- Planteamiento del problema .....	16
1.3.- Objetivos.....	18
1.3.1.- Objetivo general .....	18
1.3.2.- Objetivos específicos .....	18
1.4.- Justificación .....	19
1.5.- Alcances y limitaciones .....	20
1.6.- Hipótesis .....	20
<b>CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>21</b>
2.1.- Fundamentación teórica.....	21
2.1.1.- Tipos y definiciones de sequías .....	21
2.1.2.- Métodos de análisis de sequías meteorológicas.....	22
2.1.3.- Análisis regional de frecuencias basado en el método de L-momentos.....	23
<b>CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>26</b>
3.1.- Descripción del área de estudio.....	26
3.2.- Descripción del análisis regional de frecuencia basado en L-momentos .....	28
3.2.1.- Revisión y control de calidad de los datos .....	30
3.2.2.- Identificación de regiones homogéneas .....	32
3.2.3.- Selección de la distribución de frecuencia .....	36
3.2.4.- Estimación de cuantiles .....	38
3.2.5.- Mapeo.....	39
3.3.- Paquetería Climatol .....	40

<b>CAPÍTULO IV ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	43
4.1.- Análisis de datos de las estaciones pertenecientes al área de estudio .....	43
4.2.- Relleno de datos faltantes y prueba de homogeneidad .....	46
4.3.- Identificación de regiones homogéneas .....	52
4.4.- Selección de la distribución de frecuencia de mejor ajuste .....	56
4.5.-Comparación del método de L-momentos con datos crudos vs rellenos .....	59
4.6.- Estimación de cuantiles .....	61
4.6.- Análisis de periodos secos .....	66
4.7.- Mapeo.....	72
4.8.- Discusión.....	78
<b>CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	80
<b>REFERENCIAS</b> .....	82
<b>ANEXOS</b> .....	87
A.- FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD .....	87
a) Distribución Kappa .....	87
b) Logística Generalizada (GLO).....	88
c) Generalizada Normal (GNO).....	89
d) General de Valores Extremos (GEV) .....	91
e) Generalizada de Pareto (GPA).....	93
f) Pearson Tipo III (P3) .....	95
B.- TABLAS DE L-MOMENTOS, PARÁMETROS DE FDP, CUANTILES Y PERIODOS DE RETORNO POR REGIÓN HOMOGÉNEA .....	98
C.- TABLAS DE LOS PERIODOS SECOS POR REGIÓN HOMOGÉNEA.....	102

# ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.1</i> Precipitación media anual de la Región Hidrológico-Administrativa VI Río Bravo (1960-2012). Tomada de CONAGUA (2014).....	13
<i>Figura 2.1</i> Diagrama de flujo de las etapas del ARF-LM. Adaptado de Núñez y Verbist (2010).....	24
<i>Figura 3.1</i> Ubicación de la Cuenca del Río Bravo, sección mexicana.....	26
<i>Figura 3.2</i> Representación gráfica del concepto de discordancia. Adaptada de Hosking y Wallis (1997).....	30
<i>Figura 3.3</i> Comparación entre datos observados y datos simulados. Adaptada de Hosking y Wallis (1997).....	34
<i>Figura 3.4</i> Curva de crecimiento regional.....	39
<i>Figura 3.5</i> En rojo, desviaciones de la recta de regresión lineal (azul) minimizadas por mínimos cuadrados en los tipos I (izquierda) y II (derecha). Tomada de Guijarro (2018).....	41
<i>Figura 3.6</i> Diagrama de flujo del funcionamiento de Climatol, mostrando sus procesos iterativos. Tomado de Guijarro (2018).....	42
<i>Figura 4.1</i> Ubicación de las estaciones empleadas para el ARF-LM.....	45
<i>Figura 4.2</i> Archivos de la región 1 para ingresarlos en R.....	46
<i>Figura 4.3</i> División de la cuenca para su aplicación con Climatol. En color rojo la región 1 y en color azul la región 2.....	47
<i>Figura 4.4</i> Disponibilidad de datos para el periodo 1984-2013, estaciones de la región 1 a la izquierda, estaciones de la región 2 a la derecha.....	48
<i>Figura 4.5</i> Valores de datos registrados para el mes de julio, a la izquierda la región 1, a la derecha la región 2.....	48
<i>Figura 4.6</i> Correlograma de las series que muestran el coeficiente de correlación vs la distancia entre estaciones. A la izquierda la región 1, a la derecha la región 2.....	49
<i>Figura 4.7</i> Ubicación de estaciones con similar variabilidad climática. A la izquierda la región 1, a la derecha la región 2.....	49
<i>Figura 4.8</i> Histograma de anomalías estandarizadas de los datos de la región 2 (a la izquierda), histograma de anomalías ajustado a 7 desviaciones (a la derecha) .....	50
<i>Figura 4.9</i> Reconstrucción de series completas para la estación “La rosa”, perteneciente a la RH2....	51
<i>Figura 4.10</i> Mapa que muestra la precipitación media anual de la cuenca, generado a partir de las series reconstruidas.....	52
<i>Figura 4.11</i> Distribución espacial de las regiones homogéneas.....	53
<i>Figura 4.12</i> Gráficas de L-CV vs L-Asimetría de las regiones homogéneas, RH1 lado superior izquierdo, RH2 lado superior derecho, RH3 medio izquierdo, RH4 medio derecho, RH5 parte inferior.....	55

<i>Figura 4.13</i> Diagramas de relación de L-momentos de las regiones homogéneas (RH), RH1 lado superior izquierdo, RH2 lado superior derecho, RH3 medio izquierdo, RH4 medio derecho, RH5 parte inferior.....	57
<i>Figura 4.14</i> Curvas de crecimiento regional por región homogénea.....	61
<i>Figura 4.15</i> Determinación de la probabilidad de ocurrencia de un año con una precipitación igual al 60% de la PMA en la RH3.....	62
<i>Figura 4.16</i> Determinación de la probabilidad de ocurrencia de un año con una precipitación igual 500 mm en la RH4.....	63
<i>Figura 4.17.</i> Mapa que muestra la precipitación media para el año 2011, el más seco del periodo estudiado.....	71
<i>Figura 4.18.</i> Mapa que muestra la precipitación media para el año 2010, el más húmedo del periodo estudiado.....	71
<i>Figura 4.19</i> Mapa del porcentaje de déficit para un periodo de retorno de 5 años.....	72
<i>Figura 4.20</i> Mapa del porcentaje de déficit para un periodo de retorno de 10 años.....	73
<i>Figura 4.21</i> Mapa del porcentaje de déficit para un periodo de retorno de 15 años.....	74
<i>Figura 4.22</i> Mapa del porcentaje de déficit para un periodo de retorno de 20 años.....	75
<i>Figura 4.23</i> Mapa del porcentaje de déficit para un periodo de retorno de 50 años.....	76
<i>Figura 4.24</i> Mapa del porcentaje de déficit para un periodo de retorno de 100 años.....	77

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 3.1</i> Valores críticos de discordancia $D_i$ . Adaptada de Hosking y Wallis (1997).....	31
<i>Tabla 3.2</i> Valores de heterogeneidad (H). Modificada de Hosking y Wallis (1997).....	36
<i>Tabla 4.1</i> Estaciones climatológicas seleccionadas.....	43
<i>Tabla 4.2</i> Valores de discordancia para cada una de las estaciones por región homogénea.....	54
<i>Tabla 4.3</i> Valores de H1 y PMA por región homogénea.....	55
<i>Tabla 4.4</i> L-momentos regionales.....	56
<i>Tabla 4.5</i> Valores para $Z^{\text{DIST}}$ por región homogénea.....	58
<i>Tabla 4.6</i> Parámetros de la FDP Gaucho para la RH1 y de la FDP GLO para las RH2, 3, 4 y 5.....	58
<i>Tabla 4.7</i> Comparación entre datos rellenados y datos crudos, en sus valores de H1 y PMA por región homogénea.....	59
<i>Tabla 4.8</i> Comparación entre datos rellenados y datos crudos, para los valores de $Z^{\text{DIST}}$ por región homogénea.....	60
<i>Tabla 4.9</i> Cuantiles por región homogénea.....	61
<i>Tabla 4.10</i> L-momentos y parámetros para cada región homogénea, y la $P_i$ para diferentes periodos de retorno.....	64
<i>Tabla 4.11</i> Porcentajes de déficit de $P_i$ para cada región homogénea en diferentes periodos de retorno.....	64
<i>Tabla 4.12</i> L-momentos y parámetros de la FDP GLO, que corresponden a las estaciones de la RH5.....	65
<i>Tabla 4.13</i> Cuantiles y periodos de retorno que corresponden a las estaciones de la RH5.....	66
<i>Tabla 4.14</i> Ejemplo de los datos utilizados para determinar los periodos secos (S-Amarillo) y húmedos (H-Azul).....	67
<i>Tabla 4.15</i> Periodos secos registrados en la RH1.....	68
<i>Tabla 4.16</i> Características de los periodos secos registrados en la RH1.....	68
<i>Tabla 4.17</i> Propuesta basada en cuantiles para la clasificación del grado de sequía.....	69
<i>Tabla 4.18</i> Periodos secos y grados de sequía por región homogénea.....	69
<i>Tabla B-1</i> L-momentos y parámetros de la FDP Gaucho que corresponden a las estaciones de la RH1.....	98
<i>Tabla B-2</i> Cuantiles y periodos de retorno que corresponden a las estaciones de la RH1.....	98
<i>Tabla B-3</i> L-momentos y parámetros de la FDP GLO que corresponden a las estaciones de la RH2.....	99
<i>Tabla B-4</i> Cuantiles y periodos de retorno que corresponden a las estaciones de la RH2.....	99
<i>Tabla B-5</i> L-momentos y parámetros de la FDP GLO que corresponden a las estaciones de la RH3.....	100
<i>Tabla B-6</i> Cuantiles y periodos de retorno que corresponden a las estaciones de la RH3.....	100
<i>Tabla B-7</i> L-momentos y parámetros de la FDP GLO que corresponden a las estaciones de la RH4.....	101



<i>Tabla B-8</i> Cuantiles y periodos de retorno que corresponden a las estaciones de la RH4.....	101
<i>Tabla B-9</i> L-momentos y parámetros de la FDP GLO que corresponden a las estaciones de la RH5.....	101
<i>Tabla B-10</i> Cuantiles y periodos de retorno que corresponden a las estaciones de la RH5.....	101
<i>Tabla C-1</i> Años secos (S-Amarillo) y húmedos (H-Azul) de la RH1.....	102
<i>Tabla C-2</i> Periodos secos registrados en la RH1.....	103
<i>Tabla C-3</i> Características de los periodos secos registrados en la RH1.....	103
<i>Tabla C-4</i> Años secos (S-Amarillo) y húmedos (H-Azul) de la RH2.....	104
<i>Tabla C-5</i> Periodos secos registrados en la RH2.....	105
<i>Tabla C-6</i> Características de los periodos secos registrados en la RH2.....	105
<i>Tabla C-7</i> Años secos (S-Amarillo) y húmedos (H-Azul) de la RH3.....	106
<i>Tabla C-8</i> Periodos secos registrados en la RH3.....	107
<i>Tabla C-9</i> Características de los periodos secos registrados en la RH3.....	107
<i>Tabla C-10</i> Años secos (S-Amarillo) y húmedos (H-Azul) de la RH4.....	108
<i>Tabla C-11</i> Periodos secos registrados en la RH4.....	109
<i>Tabla C-12</i> Características de los periodos secos registrados en la RH4.....	109
<i>Tabla C-13</i> Años secos (S-Amarillo) y húmedos (H-Azul) de la RH5.....	110
<i>Tabla C-14</i> Periodos secos registrados en la RH5.....	111
<i>Tabla C-15</i> Características de los periodos secos registrados en la RH5.....	111

## RESUMEN

Las sequías son eventos climatológicos extremos que afectan cualquier parte del mundo, la región norte de México es una de las zonas más afectadas del país debido a su ubicación geográfica, así como a su clima más árido en comparación con la zona sur del país. Se realizó un análisis regional de frecuencias de sequías meteorológicas en la cuenca del río Bravo, México, basado en la metodología de L-momentos (ARF-LM), la cual centra su atención en la estimación del periodo de recurrencia de eventos extremos a partir de una función de distribución de probabilidad (FDP) que se ajusta satisfactoriamente a los registros de una variable (precipitación) dentro de una unidad geográfica cuyas series locales son ajustadas por la misma FDP. Esto para identificar aquellas regiones que han sido afectadas en menor o mayor grado por este fenómeno. Se trabajó con datos de precipitación anual de 114 estaciones climatológicas ubicadas dentro de la cuenca del río Bravo, con series de registro de treinta años, considerando el periodo comprendido entre 1984 – 2013. La metodología utilizada corresponde a la empleada en Núñez y Verbist (2010), y considera la aplicación de cinco etapas: 1) Revisión y control de calidad de los datos, 2) Identificación de regiones homogéneas, 3) Selección de la distribución de frecuencia, 4) Cálculo de parámetros y estimación de la función de cuantiles y 5) Mapeo. Después de pasar los criterios de discordancia y homogeneidad, se determinaron cinco regiones homogéneas (RH) (RH1: 151 – 300 mm; RH2: 301 – 450 mm; RH3: 451 – 600 mm; RH4: 601 – 750 mm; RH5: 751 – 1000 mm) en las cuales las funciones de distribución que mejor se ajustaron de acuerdo al estadístico  $Z^{\text{DIST}}$  fueron la Gaucho para la región 1 (-1.58), y la Logística Generalizada (GLO) para las regiones 2 (1.21), 3 (0.31), 4 (1.03) y 5 (0.40). Para las regiones generadas se obtuvieron sus cuantiles para posteriormente calcular los valores estimados de precipitación de cada estación individualmente de acuerdo a una probabilidad de no excedencia del 50%, con lo cual se determinaron los periodos secos, así como su duración y ocurrencia dentro de la cuenca. De acuerdo a esto, el periodo 2011-2012 resultó ser el más seco de los registrados, así como el año 2010 el más húmedo. Finalmente, se determinaron los parámetros correspondientes con las FDP seleccionadas para la generación de los mapas con periodos de retorno de 5, 10, 15, 20, 50 y 100 años en donde se aprecia que la RH5 es la menos propensa a sufrir casos de sequía excepcional en comparación con el resto de la cuenca que muestra grados de sequía de severa a excepcional. El método del ARF-LM es un método útil a la hora de enfrentarse con los deficientes datos climatológicos, ya que compensa la carencia de datos en el tiempo por la abundancia en el espacio, y utiliza funciones de distribuciones más flexibles que los métodos de 1 o 2 parámetros, lo que lo hace un método más robusto en comparación de otros.

**Palabras clave:** Sequía meteorológica, análisis regional de frecuencias, L-momentos, cuenca del río Bravo.

## ABSTRACT

Droughts are extreme climatic events that affect any part of the world, the northern region of Mexico is one of the most affected areas of the country due to its geographical location, as well as its more arid climate compared to the southern part of Mexico. A regional analysis of meteorological drought frequencies was carried out in the Rio Grande basin, Mexico based on the methodology of L-moments (ARF-LM) which focuses on the estimation of the recurrence period of extreme events from a probability distribution function (FDP) that fits satisfactorily to the records of a variable (in our case precipitation) within a geographical unit whose local series are adjusted by the same FDP. This to identify those regions that have been affected to a lesser or greater degree by this phenomenon. We worked with annual rainfall data from 114 weather stations located within the Rio Grande basin, with thirty-year registration series, considering the period between 1984 - 2013. The methodology used corresponds to that used in Núñez and Verbist (2010), and considers the application of five stages: 1) Review and quality control of the data, 2) Identification of homogeneous regions, 3) Selection of the frequency distribution, 4) Calculation of parameters and estimation of the quantile function and 5) Mapping. After passing the criteria of discordance and homogeneity, five homogeneous regions (RH) (RH1: 151-300 mm; RH2: 301-450 mm; RH3: 451-600 mm; RH4: 601 - 750 mm; RH5: 751 - 1000 mm) in which the distribution functions that best fit according to the  $Z^{\text{DIST}}$  statistic were the Gaucho for region 1 (-1.58) and Generalized Logistics (GLO) for regions 2 (1.21), 3 (0.31), 4 (1.03) and 5 (0.40). For the regions generated, their quantiles were obtained to later calculate the estimated precipitation values of each station individually according to a probability of non-exceeding 50%, with which the dry periods were determined, as well as their duration and occurrence within the Basin, watershed, catchment area, socket, bowl, hollow. According to this, the period 2011-2012 turned out to be the driest of those registered, as well as the year 2010 the wettest. Finally, the corresponding parameters were determined with the FDP selected for the generation of the maps with return periods of 5, 10, 15, 20, 50 and 100 years where it is appreciated that the RH5 is the least prone to suffer cases of exceptional drought compared to the rest of the basin which shows degrees of drought from severe to exceptional. The ARF-LM method is a useful method when dealing with poor weather data, since it compensates for the lack of data over time due to abundance in space, and uses more flexible distribution functions than the methods of 1 or 2 parameters, which makes a more robust method compared to others.

**Keywords:** Meteorological drought, regional frequency analysis, L-moments, Rio Grande river basin.

# CAPÍTULO I

## PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

### 1.1.- Antecedentes

#### 1.1.1 Contexto nacional e internacional

Entre la gran cantidad de definiciones que se encuentran en la literatura sobre la sequía, se puede determinar un común denominador en este fenómeno, el cual es la deficiencia de la precipitación, frente a un comportamiento considerado como normal de un área determinada con respecto a sus valores históricos promedios.

La Organización Meteorológica Mundial, define a la sequía como un fenómeno climático recurrente, caracterizado por un periodo anormal de condiciones meteorológicas secas, suficientemente prolongado para que la falta de precipitaciones cause un grave desequilibrio hidrológico en la zona afectada.

En el mundo, la sequía ha afectado varios países principalmente de África, y se prevé un aumento de daños derivados del impacto del cambio climático en los diferentes sectores socioeconómicos y el medio ambiente (Arreguín-Cortés, López-Pérez, Ortega-Gaucin e Ibáñez-Hernández, 2016).

El periodo comprendido entre los años 2011 y 2015, ha sido considerado como el más cálido del que se tenga registro hasta la fecha en todo el mundo. Las temperaturas para el periodo fueron de 0.57 °C (1.03 °F), por encima de la media para el periodo de referencia estándar 1961–1990 (OMM, 2016).

De lo anterior, derivaron episodios de sequía en diferentes partes del mundo, como Australia (con déficit grave de precipitaciones), Brasil (con restricción grave de suministro de agua en São Paulo), África oriental (con aproximadamente 258 mil muertes adicionales en Somalia y 13 millones de personas necesitadas de asistencia humanitaria), África meridional (con 18 millones de personas necesitadas de asistencia humanitaria) y el suroeste de Estados Unidos (con más de 60 mil millones de dólares de pérdidas económicas) (OMM, 2016).

México también resultó afectado, registrando en 2011-2012 la peor sequía en siete décadas y, de acuerdo con la Comisión de Agricultura de la Cámara de Diputados de México (2014), se

estimaron pérdidas por un costo de 150 mil millones de pesos. La sequía afectó un 90% del territorio nacional. Prácticamente todo el país se encontraba con algún grado de sequía. Los estados más afectados fueron Aguascalientes, Chihuahua, Coahuila, Durango, Guanajuato, Jalisco, San Luis Potosí, Sinaloa, Sonora y Zacatecas (CONAGUA, 2012; Arreguín-Cortés *et al.*, 2016).

México es un país vulnerable a los efectos de las sequías. Por su ubicación geográfica, se encuentra en parte dentro del cinturón norte de los grandes desiertos del mundo, cuya existencia se debe fundamentalmente a la dinámica de la circulación general de la atmósfera, y a particularidades que presenta la geomorfología del globo terrestre, así como a los dos grandes cinturones de alta presión atmosférica localizados en latitudes cercanas a los 30° norte y sur, debido a esto, gran parte de su territorio es árido o semiárido (52%), por lo que percibe poca cantidad de lluvias (con precipitaciones entre 300-600 mm) principalmente en el norte del país; en contraste, el sureste es húmedo con precipitaciones que superan en ocasiones los 2 000 milímetros por año (Ortega-Gaucin y Velasco, 2013; Esparza, 2014; CONAGUA, 2016).

Velasco, Núñez, Muñoz, Reyes y Gadsden (2007), en base al Índice de Precipitación Estandarizado a escalas de tiempo de tres, seis y doce meses en eventos de sequía ocurridos en regiones del estado de Chihuahua para el periodo de 1970 a 2004, determinaron que entre el 23 y 31% de este periodo predominaron condiciones de sequía en estas regiones, destacando los ocurridos a mediados y finales de 1990, por su intensidad y duración, además de que repercutieron en la agricultura de temporal entre 1994 y 1995 con un reporte de siembra siniestrada de un 37 % por la sequía, el aumento de incendios forestales de 899 registrados en 1996 a 3655 de 1998 al 2000, así como en los niveles de almacenamiento de los principales embalses de la cuenca del río Conchos.

Cerano, Villanueva, Valdez, Méndez y Constante (2011), analizaron la variabilidad climática de los últimos 600 años (1400-2004) para el noreste de México (noreste de Coahuila y sur de Nuevo León), con base en técnicas dendrocronológicas, empleando como *proxy* los anillos de crecimiento de las especies *Pseudotsuga menziesi* y *Pinus cembroides*. Generando un modelo lineal entre el índice de anillo y la precipitación observada de estaciones cercanas. Mostrando eventos intensos de sequía a intervalos de 100 años (1450, 1560, 1660, 1750-1760, 1850-1870 y 1950-1960) que han causado estragos económicos y sociales en la población.

Por otra parte, un estudio realizado por Álvarez-Olguín y Escalante-Sandoval en 2016 referente a la zona noroeste de México (Baja California Norte, Baja California Sur, Sonora, Sinaloa, Chihuahua y Durango), con el análisis de 221 series de lluvia acumulada anual, sugieren que para el escenario del año 2044 habrá una disminución del 20% de la precipitación en diferentes zonas dentro de la península de California, Sonora y Sinaloa, lo que las convierte en zonas susceptibles de sequías.

Con base en estos estudios, el hecho de que México ha presentado este fenómeno climático con cierta periodicidad en su zona norte, y a que gran parte de la población del país se encuentra en esta región, así como la menor disponibilidad de agua, surge la importancia de generar estudios relacionados al tema de la sequía en esta área.

### **1.1.2.- Estudios realizados en la cuenca del río Bravo**

Hablar sobre la cuenca del río Bravo, conlleva el tratarla desde el punto de vista político hasta el científico, como lo dejan claro el gran número de estudios que se han realizado en ella, así como en la cuenca del río Conchos (Velasco, Aparicio, Valdés, Velázquez y Kim, 2004; Martínez e Irula, 2016; Pita, 2018), que pertenece a la parte mexicana de la cuenca del río Bravo.

La cuenca del río Bravo es uno de los sistemas hidrológicos más importantes de México, donde el problema de la sequía es un evento recurrente (Ortega-Gaucin, 2013). Sus condiciones climáticas definen a esta región transfronteriza como una zona árida y semiárida, la cual se caracteriza por presentar un alto grado de variación en la disponibilidad del recurso hídrico, debido a que la precipitación dentro de la cuenca es muy variable (Linares, 2004).

Partiendo del Tratado sobre distribución de aguas internacionales de 1944, entre los Estados Unidos Mexicanos y los Estados Unidos de América, donde se establece el uso del agua de los diferentes afluentes pertenecientes a la cuenca, correspondiendo a cada país cierto porcentaje de estas aguas, en caso de que México no pueda cubrir este porcentaje quinquenal con E.E.U.U. debido a eventos de sequías, se genera una deuda del líquido para el siguiente ciclo (DOF, 02/06/2011; CONAGUA, 2011; CONAGUA, 2014). De acuerdo con el Diario Oficial de la Federación (DOF, 02/06/2011), en cuatro ocasiones México no ha entregado el volumen acordado. La primera, en el ciclo octubre de 1953 a octubre de 1958; la segunda en el ciclo junio

de 1982 a junio de 1987, la tercera en septiembre de 1992 a septiembre de 1997, y la última de septiembre de 1997 a septiembre de 2002.

El efecto de las sequías en esta región ha sido muy significativo en los últimos 50 años, ya que se han presentado tres periodos críticos: 1948-1954, 1960-1964 y 1993-2010, con duración de 2 a 4 meses y con cierta frecuencia de 10 años (DOF, 02/06/2011).

Velasco *et al.* (2004) emplearon el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) y el Índice de severidad de Palmer (PDSI), utilizando datos de 21 estaciones meteorológicas para caracterizar la sequía dentro de la cuenca del río Conchos, a escalas temporales comparables. Para el año 1994 registrado como típicamente seco, se aprecia que la sequía fue más intensa en la parte media de la cuenca que la parte alta relativamente más húmeda, mostrando así un comportamiento similar entre ambos métodos a escala anual.

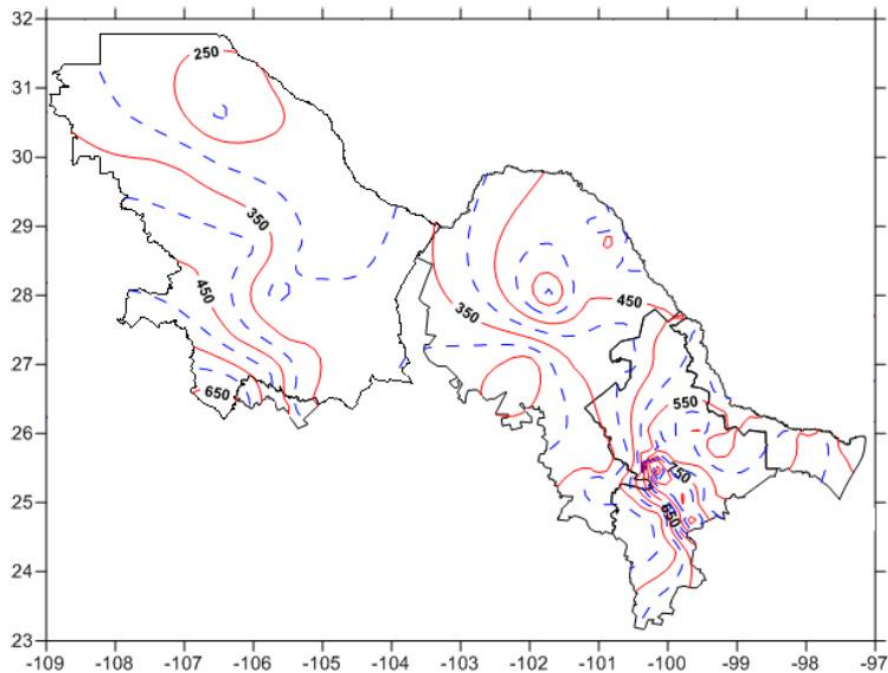
Sisto (2011), mediante el uso de un modelo inter-industrial de insumo-producto (I-P), aplicado en distritos de riego dentro de la cuenca del río Bravo, México, propone estimar el impacto de una sequía sobre distintos sectores económicos de esta región, en términos de producto, ingresos y empleo, ocasionados por una reducción en la actividad agrícola, tanto en las cosechas como en el volumen de riego; para así mejorar los planes para el manejo de las sequías y sus medidas de mitigación.

Ortega-Gaucin (2013), realizó la caracterización de los periodos de sequía hidrológica registrados históricamente en la sección mexicana de la cuenca del río Bravo, a partir del análisis de las aportaciones de agua a las presas de almacenamiento que se ubican en los principales afluentes mexicanos de este río. Los resultados indican que en más del 60% de los años analizados se presentó algún grado de sequía, con aportaciones inferiores a la media histórica de hasta menos del 97% y, periodos secos que van de uno a trece años consecutivos. Se concluye que en la mayor parte de la cuenca ocurrió un periodo de sequía hidrológica extraordinaria, que se extendió prácticamente a lo largo de catorce años (1992-2005), y fue el más severo y prolongado del cual se tiene registro.

Por otra parte, Núñez-López *et al.* (2013), ajustaron modelos de regresión múltiple para predecir la precipitación media mensual, a partir de la elevación, la complejidad del relieve, la proximidad de zonas marítimas y la localización geográfica de estaciones climáticas. Obteniendo resultados que muestran que la proximidad de las zonas de costa refleja un claro efecto de continentalidad, indicando una disminución de los valores de precipitación conforme más lejana

se encuentra la zona marítima; este mismo efecto se observó también en la variable de longitud geográfica, lo cual indica que la precipitación tiende a incrementarse en valores de longitud próximos al este de la cuenca (costa del Golfo de México). Las variables topográficas representadas a través de la elevación del relieve y del índice de rugosidad topográfica, mostraron significancia estadística de forma variable. Lo cual muestra una primera aproximación a la distribución espacial de la precipitación dentro de la cuenca, respecto con los aspectos mencionados.

La Comisión Nacional del Agua, con el *Programa de Medidas Preventivas y de Mitigación de la Sequía (PMPMS) del Consejo de cuenca del río Bravo* (2014), generaron el comportamiento histórico de la precipitación total anual, a partir de 81 estaciones seleccionadas por todo el territorio de la cuenca para el periodo de 1951 a 2013, en el que la cuenca presenta una precipitación promedio anual de 502 mm. De igual manera muestran la gran variabilidad mensual que existe entre las estaciones, desde un 39% de coeficiente de variación hasta un 78.9% en una de las estaciones analizadas. La Figura 1.1 muestra la precipitación media anual para el periodo 1960-2012 de la Región Hidrológico-Administrativa VI Río Bravo.



**Figura 1.1** Precipitación media anual de la Región Hidrológico-Administrativa VI Río Bravo (1960-2012).

Tomada de CONAGUA (2014).



Martínez e Irula (2016), revisaron la variabilidad histórica de la precipitación dentro de la cuenca del río Conchos, haciendo un análisis de tendencias empleando el SPI en tres estaciones climatológicas, en el cual se observa una disminución de la precipitación a partir de la década de los noventa, mostrando una tendencia a la sequedad hacia la parte baja de la cuenca.

Por su parte, Pita (2018), analizó seis índices propuestos por el Grupo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático en la cuenca del río Conchos, además de integrar análisis del Índice Normalizado de Precipitación (SPI) y del Índice Normalizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI), utilizando bases de datos de precipitación, temperatura máxima y mínima para el periodo 1951-2010; obteniendo indicios del aumento de la temperatura mínima hacia los últimos años y registrando periodos de sequía muy intensos en las décadas de 1950 y 1990, corroborando que los periodos extremos secos y húmedos han tendido a ser más recurrentes y duraderos en las últimas décadas.

### **1.1.3.- Estudios realizados con el método ARF-LM**

El análisis regional de frecuencias basado en la metodología de L-momentos, es considerado una técnica muy robusta para caracterizar de manera probabilística eventos extremos, siendo muy pocas veces utilizada en América Latina (Núñez y Verbist, 2010).

A nivel internacional esta técnica ha sido empleada para analizar la frecuencia y duración de precipitaciones extremas (Acuña, Felipe, Ordoñez y Arboleda, 2011; Acuña, Felipe, y Fernández, 2015; Báez, Prieto y Aroche, 2016), al igual que para temperaturas máximas (Núñez-Galeano y Giraldo-Osorio, 2016) así, como para caudales de ríos (Vich, 2014; Castillo y Ortiz, 2015).

En las regiones Valparaíso y Metropolitana de Chile, Naranjo (2011) usó este método para la generación de cartografía probabilística de la sequía meteorológica, con un déficit de 30% de la precipitación, obteniendo mayores probabilidades de déficit hídrico hacia las zonas más áridas.

Dentro de territorio venezolano, la principal región productora de cereales es impactada sucesivamente por sequías meteorológicas, lo que ocasiona pérdidas económicas y disminuye la producción de este rubro para abastecer el mercado nacional. Dada esta problemática, en una investigación realizada por Paredes, Cruz la y Guevara, E. (2014), se realizó un análisis regional de frecuencia de las sequías meteorológicas en los estados Anzoátegui, Cojedes, Portuguesa y

Guárico, que contempló inicialmente la identificación de las regiones homogéneas según la distribución de frecuencia de la precipitación anual. Resultando que las cuencas de los ríos Unare y Manzanares (norte de Anzoátegui), y el eje San Juan-Guanipa (noreste de Anzoátegui), la cuenca del río Manapire (Guárico) y la Mesa de Morichal Largo (sur de Anzoátegui) tienen el mayor riesgo de ocurrencia de años secos.

Cruz la (2015), generó índices basados en la desviación estándar de la precipitación media anual, para evaluar las sequías meteorológicas en Venezuela, aplicando un análisis regional de frecuencia basado en los L-momentos, identificó las regiones y años donde se han presentado diferentes grados de sequía dentro del país. Generando una curva de crecimiento regional por cada región homogénea creada (15 en total), que le ayudaron a determinar la probabilidad de ocurrencia de diferentes eventos. Obteniendo que el año 2002, seguido de los años 1989 y 2001 presentaron el mayor grado de sequía extrema, siendo el estado Cojedes uno de los más afectados.

Por su parte, Acuña et al. 2011 y 2015 realizaron un análisis regional de frecuencia de precipitación anual, en las zonas centro y norte del Perú, para determinar mapas de sequías de dichas regiones, con el propósito de mostrar el resultado de situaciones con deficiencias de 40%, 60% y 80% de precipitación esperada en un año normal y así determinar las zonas más vulnerables y los periodos de retorno bajo estas condiciones.

Uno de los aportes dentro de México empleando este método, fue realizado por Gutiérrez, Ruiz y Hallack (2016) quienes estimaron la frecuencia e intensidad de la sequía meteorológica en la cuenca del río Tijuana (cuenca binacional igual que la cuenca del río Bravo), a partir de registros históricos de lluvia mensual de 30 estaciones pluviométricas en el área de influencia de la cuenca. Utilizando el análisis regional de frecuencias basado en la metodología de L-momentos, así como el cálculo del Índice de Precipitación Estandarizado para determinar la magnitud de la sequía estimada bajo diferentes periodos de retorno. Los resultados indican que las cantidades de lluvia esperadas para las próximas décadas disminuirán, particularmente en el escenario dentro de 20 años, donde se esperan reducciones por debajo de la media anual actual, y que dicha sequía meteorológica tiene el potencial de comprometer los recursos hídricos para uso humano, agrícola y eco-sistémico.

Por otra parte, Cruz de la y Ortega-Gaucin (2018), estudiaron la probabilidad de ocurrencia de la sequía meteorológica a escala municipal en los Organismos de Cuenca Noroeste (zona árida y semiárida) y Frontera Sur (clima tropical húmedo y subhúmedo), ubicados en puntos extremos

de la república mexicana. Utilizando la variable de precipitación para el cálculo de esta probabilidad y empleando el método de L-momentos. Representando finalmente las zonas con más riesgo a través de mapas de peligro, en el que muestran que para el Organismo de Cuenca Noroeste la zona con mayor probabilidad de sequía es la franja paralela al océano pacífico; en tanto que, para el caso del Organismo de Cuenca Frontera Sur, la zona con alta probabilidad de sequía se ubica hacia la costa y su colindancia con la república de Guatemala, y la zona de los altos de Chiapas, Tabasco y Campeche.

## **1.2.- Planteamiento del problema**

A través de la historia, los eventos climáticos (sequías, inundaciones y huracanes) han tenido repercusiones importantes en la sociedad, cobrando vidas humanas y afectando económicamente las regiones afectadas. Por lo cual, la preocupación por el incremento del grado de frecuencia y severidad con que se han producido dichos fenómenos hidrometeorológicos ha ido en aumento.

Dentro de estos eventos uno de los que ha causado mayor impacto en los últimos años es, la sequía, ya que afecta de manera generalizada a la sociedad, debido a su distribución irregular a través del tiempo y el espacio. De lo cual, se deriva su complejidad a la hora de determinar su inicio y término, así como su duración y extensión geográfica. De acuerdo con la IFRC (2018), 2,000 millones de personas fueron afectadas por algún tipo de desastre natural en el periodo 2008-2017, de las cuales, aproximadamente 737 millones fueron afectadas por sequías, estimando un costo por daños de 79 300 millones de dólares.

La sequía ocurre cuando las lluvias son significativamente menores a los niveles normales registrados, lo que ocasiona graves desequilibrios hidrológicos (CONAGUA, 2016). Siendo los fenómenos naturales capaces de generar los desastres más costosos, pues afectan a un mayor número de personas que otras formas de desastres asociados a fenómenos climáticos, provocando una insuficiencia en el abastecimiento y suministro del agua para uso humano, así como para los ecosistemas.

La sequía es un problema a considerar, debido a que no es posible evitar su ocurrencia ni los efectos negativos que produce; sin embargo, cabe destacar el esfuerzo que varias organizaciones

implementan en su estudio para una mejor toma de decisiones y el tratar de mitigar sus consecuencias.

La determinación de la probabilidad de ocurrencia de una sequía meteorológica, puede ser abordada mediante la hidrología probabilística. Sin embargo, las características propias de regiones áridas y semiáridas, con gran variabilidad temporal y espacial de las precipitaciones, influencia de factores externos de variabilidad decadal, como los efectos ENSO, y la reducida disponibilidad de registros de adecuada extensión, imponen ciertas restricciones a la elección del método más adecuado para el ajuste probabilístico (Kalma y Franks, 2003). Es en este contexto que la implementación del análisis regional de frecuencias basado en L-momentos, ha sido considerado como una de las mejores alternativas para abordar las restricciones antes mencionadas, en la evaluación, estimación y mapeo de la probabilidad de ocurrencia de eventos de sequía (Núñez y Verbist, 2010).

Respecto al uso del ARF-LM en comparación con los métodos convencionales de ajuste probabilístico, como el de los momentos y máxima verosimilitud, los cuales presentan problemas de sesgo en las estimaciones de periodos de retorno y cuantiles con registros cortos, ya que estos requieren de momentos elevados a mayor potencia ( $^3$ ,  $^4$ ) causando grandes sesgos en las estimaciones, mientras que el ARF-LM con registros cortos provenientes de una región homogénea, lo que hace es, compensar la carencia de información en el tiempo, por su abundancia en el espacio, permitiendo así, encontrar la distribución correcta con mayor probabilidad (Hosking y Wallis, 1997; Núñez y Verbist, 2010).

Esta metodología ha sido utilizada en estudios como: la creación del atlas de sequía de América Latina y el Caribe (UNESCO, 2018); el análisis de la región cerealera de Venezuela para determinar las zonas con mayor riesgo de años secos (Paredes *et al.*, 2014); en la determinación de la magnitud para una sequía estimada bajo diferentes periodos de retorno, en la cuenca del río Tijuana apoyada también en el cálculo de SPI (Gutiérrez *et al.*, 2016); y en la determinación de mapas de sequías para las zonas norte y centro del Perú con diferentes periodos de retorno y estimación de no excedencia (Acuña *et al.*, 2011 y 2015); entre otros.

De aquí, la elección del análisis regional de frecuencia basado en L-momentos, considerado por varios autores como una técnica robusta para la determinación probabilística de la ocurrencia y frecuencia de una sequía meteorológica. Con el cual, en esta investigación se pretende conocer ¿Cuál es la probabilidad de ocurrencia de una sequía meteorológica en las diferentes regiones de

la cuenca del río Bravo? En base a una interrogante: ¿Qué zonas de la cuenca tendrán un periodo de retorno menor considerando los criterios de estacionalidad y precipitación media anual (PMA)?

### **1.3.- Objetivos**

#### **1.3.1.- Objetivo general**

Evaluar el comportamiento de las sequías meteorológicas en la cuenca del río Bravo, México, mediante la aplicación del método basado en L-momentos y, desarrollar mapas de probabilidad de ocurrencia de dichos eventos para diferentes periodos de retorno.

#### **1.3.2.- Objetivos específicos**

- a) Verificar la calidad de la información climatológica existente para la región bajo estudio, específicamente en lo relativo a los registros de precipitación.
- b) Determinar regiones homogéneas dentro del área de estudio, con base en el criterio de estacionalidad y magnitud de la precipitación media anual.
- c) Aplicar el método de L-momentos, para determinar la función de distribución de probabilidad de mejor ajuste a la serie de datos pertenecientes a cada región homogénea.
- d) Analizar los años secos presentes en el periodo estudiado.
- e) Determinar la probabilidad de ocurrencia y magnitud de sequía para cada región homogénea, y elaborar mapas probabilísticos.

## 1.4.- Justificación

El estudio de la sequía es un tema de interés mundial, ya que sin importar el área geográfica o las condiciones climáticas que presente la región, todas pueden ser afectadas en algún grado por este fenómeno climatológico.

Uno de los aspectos que cita consenso entre los autores es que, en general, las regiones áridas y semiáridas del mundo presentan un mayor grado de vulnerabilidad a los eventos de sequía que las regiones húmedas del planeta, en particular debido a que presentan niveles de precipitación muy limitantes y con una variabilidad temporal y espacial extremas. Registrándose los mayores desastres naturales asociados a eventos de sequía en regiones áridas y semiáridas, tales como el oeste de África y noreste de Brasil. Con respecto a América Latina, las sequías representan una enorme implicación social y económica debido a su impacto (Núñez y Verbist, 2010).

México es un país vulnerable a los efectos de las sequías, debido a que por su ubicación geográfica gran parte de su territorio se encuentra en la franja de alta presión de latitud norte, por lo que tiene zonas áridas y semiáridas que coinciden en latitud con las regiones de los grandes desiertos africanos, asiáticos y australianos (Ortega-Gaucin, 2013). Por lo que en estas zonas se percibe poca cantidad de lluvia al año, con precipitación media anual menor a los 500 milímetros en la parte centro-norte del país, mientras que en la parte sureste en ocasiones las precipitaciones superan los 2,000 milímetros por año (CONAGUA, 2016).

Los estados del territorio nacional que históricamente han sido afectados por las sequías y, donde se presenta con mayor frecuencia este fenómeno, se encuentran ubicados en el norte del país. De acuerdo con Ortega-Gaucin (2013), desde finales del siglo XX y principios del actual, han ocurrido varios años deficitarios de lluvias, principalmente en estas regiones. Por ejemplo, en la cuenca del río Bravo ocurrió un periodo de sequía hidrológica extraordinaria, que se extendió prácticamente a lo largo de 13 años consecutivos (1993-2005), siendo el más severo y prolongado del cual se tiene registro. Este periodo seco afectó principalmente a los distritos y unidades de riego que se ubican en los estados de Chihuahua, Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas, generando importantes repercusiones económicas y sociales en la región.

De lo mencionado, deriva la importancia de analizar el fenómeno de la sequía en la cuenca del río Bravo.

## **1.5.- Alcances y limitaciones**

Uno de los alcances, es la aplicación de un método robusto (Análisis regional de frecuencia de sequías basado en la metodología de L-momentos), para la evaluación de sequías en regiones de México donde no ha sido usado dicho método, específicamente en la cuenca del río Bravo.

Una de las limitaciones, será la disponibilidad de información completa y de calidad, sobre los registros históricos de precipitación pluvial en la cuenca bajo estudio.

## **1.6.- Hipótesis**

Las zonas más propensas a padecer en mayor grado y con un menor periodo de retorno, una sequía meteorológica, de acuerdo con la aplicación del método de L-momentos dentro de la cuenca del río Bravo, son aquellas que presentan una mayor variabilidad en su precipitación media anual.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1.- Fundamentación teórica**

##### **2.1.1.- Tipos y definiciones de sequías**

La sequía es un fenómeno climático recurrente, que se caracteriza por ser un periodo de condiciones meteorológicas anormalmente secas, suficientemente prolongado como para que la falta de precipitaciones cause un grave desequilibrio hidrológico (OMM, 1990).

Hay que tener en cuenta que sequía, aridez y desertificación son conceptos diferentes. Mientras la sequía es un déficit en la precipitación normal durante un periodo prolongado, la aridez es una condición climática, caracterizada por su temperatura y sus bajos índices de precipitación. La desertificación es la degradación de la tierra en las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, causada fundamentalmente por la actividad humana y las variaciones climáticas (Wilhite, 2000; Ortega-Gaucin, 2012; Troyo et al., 2014).

En la literatura se reconocen cuatro tipos de sequías, dependiendo de su origen e impactos que generan (Wilhite y Glantz, 1985; Wilhite, 2000; Valiente, 2001; OMM, 2006). Entonces se considera tratar la sequía desde diferentes enfoques como el meteorológico, el agrícola, el hidrológico y el socioeconómico. Mencionados a continuación:

*Sequía meteorológica:* Ausencia prolongada de precipitaciones con relación a la considerada normal y que puede llegar a producir serios desbalances hidrológicos. Este tipo de sequía es el causante de otros tipos de sequías.

*Sequía agrícola:* Escasez de agua en los suelos para satisfacer las necesidades de los cultivos, pudiendo ser considerado como el principal sector económico afectado por la sequía.

*Sequía hidrológica:* Deficiencia en el caudal o volumen de aguas superficiales o subterráneas (ríos, embalses, lagos, acuíferos, etc.) con respecto a los niveles considerados como normales.

*Sequía socioeconómica:* Escasez hídrica con consecuencias sociales y económicas desfavorables. Es una consecuencia en conjunto de los otros tipos de sequías.



La presente investigación estará centrada en el análisis específico de la sequía meteorológica, con base en los criterios de estacionalidad (cuándo llueve), y magnitud de la precipitación media anual (qué tanto llueve) dentro del área de estudio.

### **2.1.2.- Métodos de análisis de sequías meteorológicas**

Están orientados a determinar la ocurrencia de eventos anormales de precipitación (episodios secos), dentro de una región a través del tiempo. Se basan en un análisis estadístico de información meteorológica que permiten la identificación de eventos de sequía, su intensidad, duración, frecuencia e inclusive su distribución geográfica (Valiente, 2001; Ortega-Gaucin, 2013; Podestá, Skansi, Herrera y Veiga 2016). A continuación, se mencionan algunos de ellos:

*Porcentaje de la precipitación normal (PPN):* Se calcula como el cociente entre la precipitación observada en un periodo determinado, y el valor normal correspondiente al mismo mes y escala en el periodo de referencia, multiplicado por 100 para expresar los resultados en porcentajes. Los valores menores a 100% indican déficit, y los mayores a 100% indican excesos; mientras que los valores próximos al 100% sugieren valores cercanos al promedio histórico.

*Cuantiles (quintiles, deciles y percentiles):* Este método divide la distribución de las precipitaciones acumuladas, para un periodo suficientemente largo (de treinta a más de cincuenta años) con una probabilidad de ocurrencia aproximadamente igual, ya sea en intervalos de 20% (quintil), 10% (decil) o 1% (percentil) de su distribución. Considerando cada intervalo como un límite a la hora de determinar los valores de la precipitación y el grado que representan, desde muy secos hasta muy húmedos.

*Desviación estándar de la precipitación:* Este índice se calcula restando la precipitación total de un determinado periodo la media aritmética de dicho periodo, y dividiendo el resultado por su desviación típica. Mostrando valores próximos a cero para valores cercanos a la media, e igual a uno cuando la diferencia entre la lluvia registrada y la media del periodo sea próxima al valor de la desviación típica.

*Índice Estandarizado de Precipitación (SPI):* Este índice utiliza únicamente la precipitación para su cálculo y es efectivo para analizar los periodos húmedos y secos. Los registros de

precipitación se ajustan a una distribución de probabilidades y a continuación se transforman en una distribución normal. Los valores positivos o negativos del SPI indican que la precipitación es mayor o menor que la mediana. Se recomienda contar en promedio con valores mensuales de precipitación de 30 a 60 años para su cálculo. Permite evaluar la severidad de la sequía en periodos cortos y largos que van desde un mes hasta los 48 meses.

El método de los L-Momentos ha sido poco utilizado para la caracterización de este tipo de sequías en México, por lo cual, ha sido escogido para la realización del presente estudio, así como por las ventajas que presenta en su aplicación, como el poder no realizar un relleno de datos que se tiene que hacer con los otros métodos ya que, debido a su empleo por medio de los momentos convencionales o máxima verosimilitud, tienen un alto riesgo de sufrir sesgos en sus resultados debido a datos anómalos, por lo mismo requieren de un gran periodo para llevar a cabo el análisis, mientras que el ARF-LM cubre estos inconvenientes con la agrupación de estaciones en regiones homogéneas, lo que permite mejorar la determinación de la distribución para dicha región.

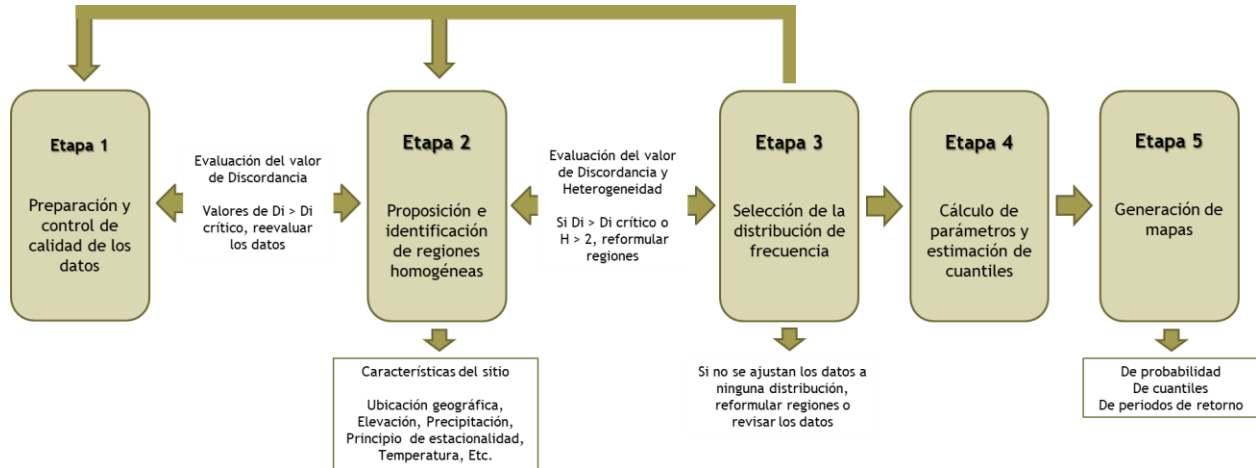
### **2.1.3.- Análisis regional de frecuencias basado en el método de L-momentos**

El ARF-LM asume que un conjunto de estaciones pluviométricas dentro de un área determinada forman una región homogénea, si y solo si, sus distribuciones de frecuencias son idénticas, variando únicamente por un factor de escala específico en cada estación, permitiendo agregar todas las estaciones que forman parte de una región homogénea, con el objeto de mejorar la precisión en las estimaciones de la función de probabilidad cuantílica en dichas estaciones (Hosking y Wallis, 1997; Wallis, Schaefer, Barker y Taylor, 2007).

Compensando la carencia de información en cuanto a longitud de registros por su abundancia espacial. El ARF-LM utiliza modelos de distribución de 3 o más parámetros, por tanto, es más robusto que los modelos de distribución empleados en la hidrología probabilística clásica, los cuales suelen ser de uno o dos parámetros (Hosking y Wallis, 1997).

La metodología del ARF-LM considera la aplicación de cinco etapas: 1) Revisión y control de calidad de los datos, 2) Identificación de regiones homogéneas, 3) Selección de la distribución de frecuencia, 4) Cálculo de parámetros y estimación de la función de cuantiles y 5) Mapeo, las

cuales, se realizaron con ayuda del programa L-RAP (Etapa 1 a 4), la paquetería Climatol del software R (Etapa 1) y ArcGis (Etapa 5). En la Figura 2.1 se representa la secuencia de las etapas del ARF-LM.



**Figura 2.1** Diagrama de flujo de las etapas del ARF-LM. Adaptado de Núñez y Verbist (2010).

1.- *Revisión y control de calidad de los datos*: Evaluación de la calidad de los datos. El objetivo es eliminar los registros dudosos asociados a errores de registro y/o transcripción, así como registros incompletos durante varios años, que no cumplan con la longitud de registro requerida para el estudio (a partir de 15 años con este método). Cabe destacar que por medio de este método no hace falta realizar un relleno de datos, sin embargo, hay que tener claro que las estaciones deben de tener por lo menos más del 80% en registros para poder ser consideradas.

2.- *Identificación de regiones homogéneas*: Este es un proceso iterativo y algunos de los métodos más utilizados para formularlas son: el análisis clúster, métodos multivariados, métodos basados en atributos geográficos y climáticos del área de estudio, región de influencia, lógica difusa, mapas autoorganizados e índice de estacionalidad.

3.- *Selección de la distribución de frecuencia*: Una vez que una región homogénea ha satisfecho la condición de homogeneidad, es posible determinar basados tanto en el uso del diagrama de los las relación de los L-momentos regionales, como en el uso de la prueba de bondad de ajuste  $Z^{\text{DIST}}$ , la distribución de probabilidad regional, así como estimar los parámetros de esta distribución.

4.- *Cálculo de parámetros y estimación de la función de cuantiles:* Una vez determinada la o las distribuciones de densidad de probabilidad con mejor ajuste a los datos observados, se calculan los parámetros de cada FDP seleccionada, y se estiman los cuantiles asociados a un cierto periodo de retorno.

5.- *Mapeo del periodo de retorno o probabilidad de ocurrencia de una sequía:* Una de las especiales ventajas que presenta el método de ARF basado en L-momentos, es la facilidad de implementar el mapeo espacial de los cuantiles, probabilidades o periodos de retorno, considerando aquellos sitios medidos y no medidos.

# CAPÍTULO III

## MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1.- Descripción del área de estudio

La cuenca del río Bravo tiene la característica de ser binacional, ya que está ubicada en la frontera entre México y Estados Unidos de América. Pertenece a la Región Hidrológica No. 24, la cual tiene la mayor extensión territorial en México con 229 740 km<sup>2</sup> lo que corresponde aproximadamente al 12% del total del territorio nacional. Geográficamente se ubica entre los 107° 45' y 97° 15' de longitud oeste, y los 31° 50' y 24° 55' latitud norte (Figura 3.1), abarcando parte del estado de Chihuahua, una porción de los estados de Durango y Tamaulipas, y gran parte de los estados de Coahuila y Nuevo León.

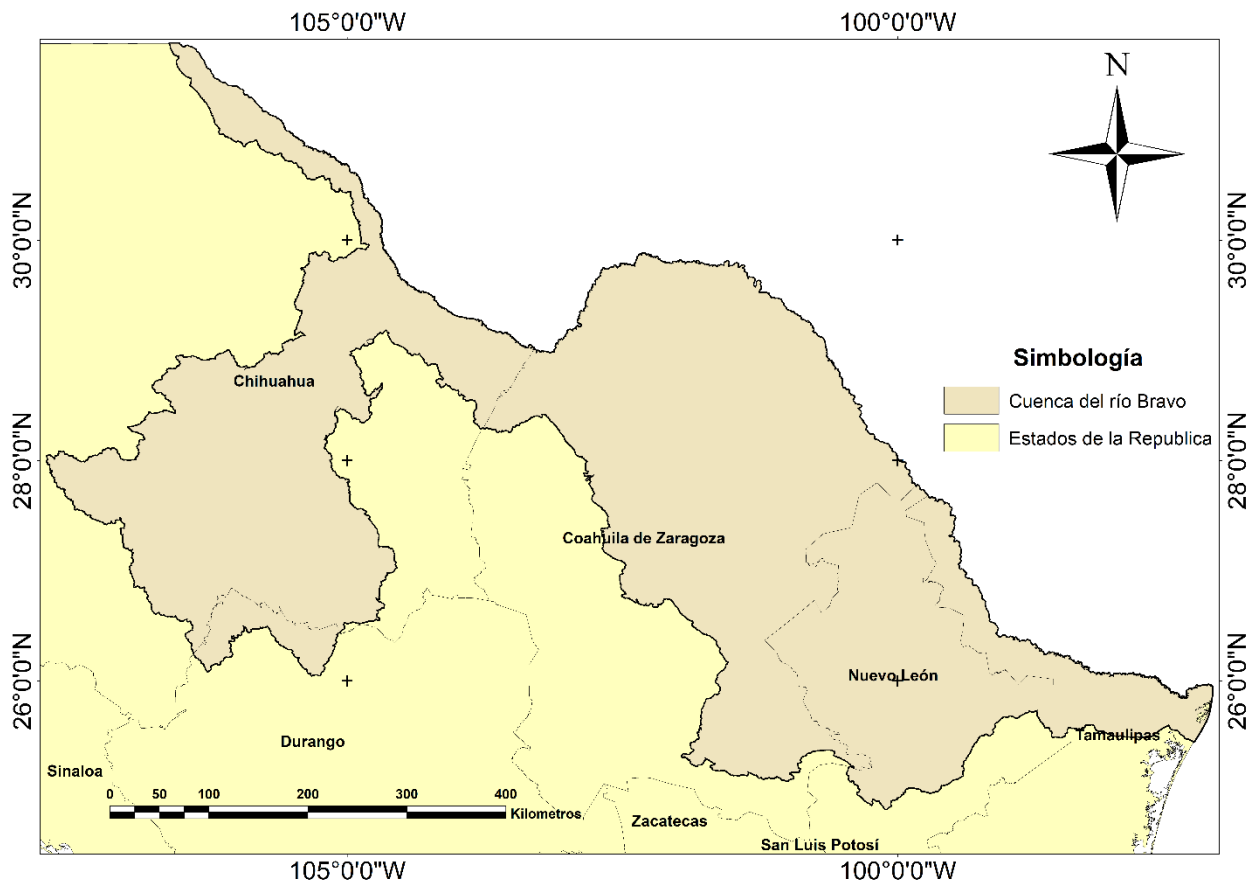


Figura 3.1 Ubicación de la cuenca del río Bravo, sección mexicana. Elaboración propia.

Debido a la gran área que abarca esta cuenca, cubre diferentes zonas climáticas y dentro del territorio mexicano, se localiza bajo la influencia del cinturón subtropical de altas presiones, que se caracteriza por la presencia de vientos descendentes que no favorecen la formación de nubes (CONAGUA, 2010). La distribución de su precipitación es irregular y escasa, características que son influenciadas por la continentalidad, ubicación geográfica, complejidad orográfica y factores globales de circulación atmosférica (CONAGUA, 2010; Núñez *et al.*, 2013).

Se divide en cuatro subregiones hidrológicas: Seis Tributarios, Alto, Medio y Bajo Bravo; y se integra a su vez por 37 subcuencas, mostrando una precipitación media anual de 399 mm, lo que corresponde al 53% de la PMA (740 mm) del país, de acuerdo al periodo 1981-2010 (DOF, 02/06/2011; CONAGUA, 2016).

El régimen de precipitación que ocurre en esta cuenca, se caracteriza por la presencia de un periodo de lluvias abundantes claramente definido en el verano, entre los meses de junio a septiembre, siendo agosto y septiembre los meses más húmedos del periodo. La precipitación media acumulada durante los meses lluviosos representa aproximadamente el 66% de la precipitación total anual captada en la cuenca (CONAGUA, 2010; Núñez *et al.*, 2013).

A su vez, pertenece a la región hidrológico-administrativa río Bravo (clave VI), la cual de acuerdo con CONAGUA (2016), cuenta con 199 estaciones climatológicas, de las cuales se tomarán aquellas que sean adecuadas para el estudio, encontrándose dentro de la cuenca y que cumplan con los requerimientos para ser consideradas.

De acuerdo con el DOF (02/06/2011), el río Bravo nace en las montañas San Juan, en la cordillera de las Rocallosas, en el estado de Colorado cerca del paralelo 38° norte en los Estados Unidos de América; su cauce principal sigue la dirección norte-sur hasta el límite con el territorio mexicano en Ciudad Juárez, Chihuahua, cambiando su dirección al sureste, hasta su desembocadura en el Golfo de México, cerca de la ciudad de Matamoros, Tamaulipas. Desde su nacimiento hasta su desembocadura, tiene un desarrollo de 2,896 kilómetros de los cuales 2,017 kilómetros son frontera internacional entre los Estados Unidos de América y México. Recibe en su paso hacia el Golfo de México afluentes de importancia como el río Pecos y Devil por el lado de los Estados Unidos de América y los ríos Conchos, Salado y San Juan por México, además de otros tributarios menores. Formando así un límite natural, el cual cuenta con importantes sistemas y unidades de riego en la porción mexicana, como presas a ambos lados de la cuenca.

### 3.2.- Descripción del análisis regional de frecuencia basado en L-momentos

Este análisis está basado en el denominado índice de avenida y el empleo de combinaciones de los primeros cuatro momentos lineales.

El índice de avenida, surge del método en el que se menciona como la distribución de los eventos máximos de una región considerada homogénea es idéntica, salvo por un factor de escala, que refleja las características propias de precipitación de cada estación (Dalrymple, 1960).

El método del índice de avenida supone una región con  $N$  estaciones, siendo cada una de ellas  $i$  con un tamaño muestral de  $n_i$ .  $Q_{ij}$  son los datos observados de cada estación  $i$ , donde  $j=1, \dots, i$ . El método se basa en que la función cuantil de la distribución de frecuencia de la estación  $i$  es:

$$Q_i(F) = \mu_i q(F), \quad i=1, \dots, N \quad (1)$$

$\mu_i$  es el valor del índice de avenida, establecido como el valor medio de la distribución de frecuencia de la estación  $i$  considerada. Por otro lado,  $q(F)$  es la curva de crecimiento regional, función adimensional común a todas las estaciones  $i$  de la región, y representa la función cuantílica de la distribución regional de frecuencias.

El empleo de los L-momentos, supone el uso de un sistema alternativo a los métodos tradicionales a la hora de describir las formas de las funciones de distribución. Surgen por combinaciones lineales de momentos ponderados probabilísticamente (MPP), que fueron introducidos por primera vez en Greenwood et al. (1979).

Los momentos ponderados por probabilidad se definen como el valor esperado del producto de tres términos: la variable aleatoria ( $x$ ) elevada a una potencia  $p$ , la función de distribución acumulada elevada a un exponente  $k$  y el complemento de esta función elevado a un exponente  $s$ . De esta manera, el MPP de orden  $p, k, s$  se calcula mediante la siguiente expresión:

$$M_{pks} = E [ X^p \{F(x)\}^k \{1 - F(x)\}^s ] \quad (2)$$

$E$  hace referencia al valor de la esperanza,  $p, k$  y  $s$  son números reales y  $F(x)$  hace alusión a la función de distribución acumulada.

En los supuestos en los que  $p = 1$  con  $k = 0$  y  $p = 1$  con  $s = 0$ , denotados desde ahora como  $\alpha_r = M_{1,0,r}$  y  $\beta_r = M_{1,r,0}$ , respectivamente, siendo  $r = 0, 1, 2, \dots$  son muy útiles.

Los cuatro primeros momentos lineales  $\lambda_i$  se definen de la siguiente manera:

$$\lambda_1 = \alpha_0 = \beta_0, \quad (3)$$

$$\lambda_2 = \alpha_0 - 2\alpha_1 = 2\beta_1 - \beta_0, \quad (4)$$

$$\lambda_3 = \alpha_0 - 6\alpha_1 + 6\alpha_2 = 6\beta_2 - 6\beta_1 + \beta_0, \quad (5)$$

$$\lambda_4 = \alpha_0 - 12\alpha_1 + 30\alpha_2 - 20\alpha_3 = 20\beta_2 - 30\beta_1 + 12\beta_0 - \beta_0, \quad (6)$$

donde el momento lineal de primer orden ( $\lambda_1$ ), es la media de la variable localización, el segundo momento ( $\lambda_2$ ), se refiere a la escala de distribución en el que se indica el grado de dispersión de los datos, el momento lineal de tercer orden ( $\lambda_3$ ), representa la asimetría y finalmente el cuarto momento lineal ( $\lambda_4$ ), se refiere al apuntamiento de la distribución, kurtosis.

La comparación de estaciones se realiza por contraste de los L-momentos de manera adimensional. Esto se obtiene dividiendo aquellos momentos lineales de mayor escala ( $\lambda_3$  y  $\lambda_4$ ), por la escala de distribución ( $\lambda_2$ ) (Hosking y Wallis, 1997).

De esta manera se obtiene una forma de la distribución independiente a su escala de medida, lo que permite evaluar equitativamente estaciones con diferentes registros de series. Los valores más importantes son los siguientes:

$$L - CV... \quad \tau_2 = \lambda_2 / \lambda_1, \quad (7)$$

$$L - Asimetría... \quad \tau_3 = \lambda_3 / \lambda_2, \quad (8)$$

$$L - Kurtosis... \quad \tau_4 = \lambda_4 / \lambda_2, \quad (9)$$

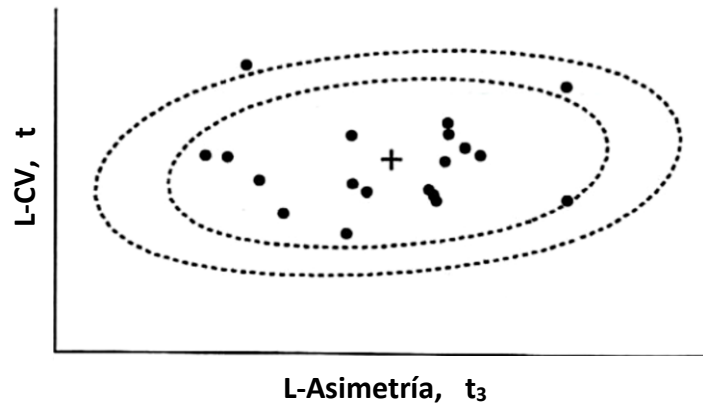
La metodología utilizada en este trabajo, corresponde a la empleada en la “*Guía metodológica para la aplicación del análisis regional de frecuencia de sequías basado en L-momentos y resultados de aplicación en América Latina*” que se basa en los trabajos realizados por Hosking y Wallis (1997), Wallis et al. (2007) y Schaefer et al. (2007), y consta de los apartados mencionados en el capítulo II y que a continuación se describen cada una de estas etapas a detalle.



### 3.2.1.- Revisión y control de calidad de los datos

Como otros métodos, el ARF-LM requiere de una revisión y control de calidad de los datos, para corregir aquellos valores anómalos o erróneos con el fin de obtener una región homogénea representativa con respecto a la variable a estudiar, en este caso la precipitación media anual.

Posteriormente se requiere identificar aquellas estaciones que son discordantes con el resto, esto se puede realizar mediante la comparación de valores de los L-momentos de estaciones próximas o la inspección individualizada de los mismos. En este análisis se comparan, uno a uno, todos los valores de los L-momentos de cada una de las estaciones, con el resto de valores de las otras estaciones y con los valores medios del conjunto. Tomando como discordantes aquellas estaciones que más se alejen del centro de la nube de puntos.



**Figura 3.2** Representación gráfica del concepto de discordancia. Adaptada de Hosking y Wallis (1997).

En la Figura 3.2, se representan gráficamente los valores de L-CV frente a los valores de L-Asimetría. El símbolo representado con una cruz (+), hace referencia al valor medio del grupo, mientras que los valores de cada una de las estaciones se representan en círculos. En torno al punto central de la región, se construyen elipses concéntricas, de modo que los valores que quedan fuera de la elipse más externa son aquellos considerados como discordantes.

La apreciación gráfica es un método subjetivo, por lo que se propone un método numérico que determine la discordancia. Suponiéndose que la región presenta  $N$  estaciones, donde  $u_i = [t^{(i)} \ t_3^{(i)} \ t_4^{(i)}]^T$  son  $N$  vectores columna, que contiene los valores de  $t$ ,  $t_3$  y  $t_4$  de los L-momentos de cada estación  $i$ , donde el superíndice  $T$  indica la transposición del vector. Siendo el vector promedio:

$$\bar{u} = \frac{\sum_{i=1}^N u_i}{N} \quad (10)$$

la matriz de sumas de cuadrados y productos cuadrados,

$$A = \sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u})(u_i - \bar{u})^T \quad (11)$$

se define la media de las discordancias ( $Di$ ), de cada estación  $i$ , como:

$$D_i = \frac{1}{3} N (u_i - \bar{u})^T A^{-1} (u_i - \bar{u}) \quad (12)$$

Para evaluar si la estación es discordante o no Hosking y Wallis (1997), establecen unos valores de referencia de  $Di$  que se presentan en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1** Valores críticos de discordancia  $Di$ . Adaptada de Hosking y Wallis (1997).

No. de estaciones por región	Valor crítico
5	1.333
6	1.648
7	1.917
8	2.140
9	2.329
10	2.491
11	2.632
12	2.757
13	2.869
14	2.917
>15	3.000

En aquellas estaciones en las que el valor de  $Di$  sea superior al establecido, se recomienda realizar un análisis más exhaustivo en el filtrado de datos de partida, tratando de detectar valores atípicos o errores.

### 3.2.2.- Identificación de regiones homogéneas

El objetivo de este apartado es el de formar regiones (regionalizar) que satisfagan la condición de homogeneidad, es decir, que todas las estaciones de la región presenten una distribución de frecuencias idéntica, salvo por un factor de escala específico (Dalrymple, 1960). En este estudio, esta región será aquella donde se puede asumir que la distribución de frecuencias que rige la precipitación es la misma en cada una de sus diferentes zonas.

El establecimiento de las regiones se realiza mediante el cálculo de diversos estadísticos, de cada estación. Estos valores son cotejados con los valores del resto de estaciones, de modo que pueden calcularse valores de homogeneidad para las regiones generadas. Una buena herramienta para su cálculo es el empleo de los L-momentos.

Al compararse características físicas con escalas de medición diferentes, éstas se estandarizan con el fin de lograr un escenario de dispersión idéntico, ya que los algoritmos de clúster miden las distancias euclídeas en el espacio. Como cada variable no influye de igual modo se les otorga diferentes pesos de ponderación (Hosking y Wallis, 1997). La estandarización y ponderación se realiza según la siguiente ecuación:

$$Y = P \frac{X}{s(x)} \quad (13)$$

donde;  $P$  representa el valor de ponderación asignado,  $X$  la variable y  $s(x)$  la desviación estándar de la variable.

El número de clústers está en función de las necesidades de la región. Los resultados que se obtienen por medio del análisis clúster no tienen por qué ser definitivos. Se pueden realizar ajustes subjetivos con el fin de reducir la heterogeneidad de las regiones, como:

- Mover estaciones de una región a otra

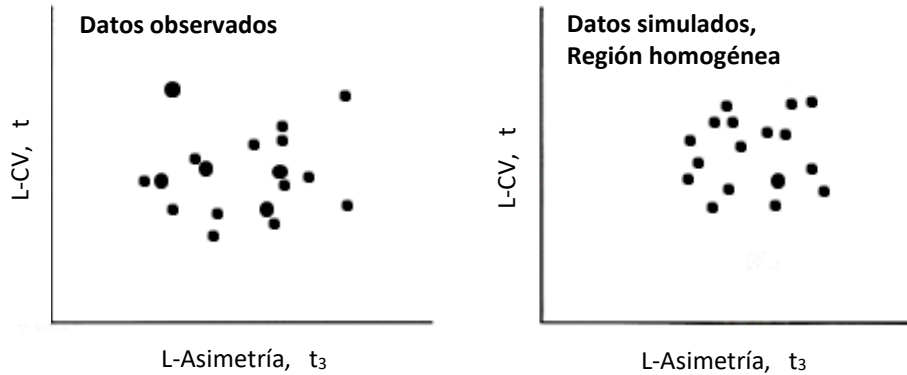
- Eliminar estaciones
- Subdividir regiones
- Romper regiones por medio de traslados de estaciones de un clúster a otro
- Fusionar regiones entre si
- Obtener nuevos datos y redefinir las regiones

Tras definirse el conjunto de las regiones, se evalúa si éstas cumplen con el criterio de homogeneidad. Precisa de una cantidad  $\hat{\delta}$  que mide un aspecto de la distribución de frecuencias, siendo constante para toda la región. En este caso se trata de una combinación de L-CV, L-Asimetría y L-Kurtosis (Hosking y Wallis, 1997). Se calculan las estimaciones para  $\hat{\delta}$ :  $\hat{\delta}(i)$  que es la estimación local de la estación  $i$  en base a sus observaciones y  $\hat{\delta}(R)$  que es la estimación regional de todas las estaciones asumiéndose homogeneidad. Por medio del estadístico  $S$  se determina la diferencia entre estimaciones locales y regionales:

$$S = \sum_{i=1}^N (\hat{\delta}(i) - \hat{\delta}(R))^2 \quad (14)$$

Se compara el valor observado de  $S$  con el que tendría si la distribución fuese homogénea, lo que implica asumir una determinada forma para la distribución de frecuencias. En el ARF-LM se recomienda asumir una distribución Kappa.

Se considera una región homogénea si las estaciones de la región tienen los mismos valores de L-momentos poblacionales, aunque no tengan los mismos valores para los L-momentos muestrales como consecuencia del muestreo. La Figura 3.3, plantea si la dispersión entre L-momentos observados es mayor que los L-momentos simulados.



**Figura 3.3** Comparación entre datos observados y datos simulados. Adaptada de Hosking y Wallis (1997).

Mediante la comparación de los valores de L-Asimetría vs L-CV y L-Kurtosis, se representan de manera gráfica los valores de los L-momentos de las estaciones. La media se obtiene por la distancia media del punto de una estación al punto de la media grupal.

Para medir la dispersión de los valores de las estaciones se realiza una representación gráfica de los L-momentos, en las que se comparan los valores de L-CV vs L-Asimetría y los valores de L-CV vs L-Kurtosis.

Para obtener los valores de la media y de la desviación estándar de la región simulada, se emplean simulaciones repetidas de regiones homogéneas con una longitud de registros idéntica y con el mismo número de estaciones que para el caso real. La comparación entre los datos simulados y los datos observados, se realiza por medio de la siguiente operación (15), aplicándola a los valores obtenidos de ambos datos.

$$\frac{(Dispersión\ observada) - (Media\ Dispersión)}{Desviación\ estándar\ Dispersión} \quad (15)$$

Valores elevados indican que los L-momentos observados están más dispersos que los correspondientes a una región simulada.

Hosking y Wallis (1997), recomiendan el uso de la distribución Kappa como parámetro a la hora de establecer que distribución será utilizada para la generación de los datos simulados.

Numéricamente la metodología se define, suponiendo que la región propuesta tiene  $N$  estaciones, para cada estación  $i$ , con una longitud de registros de  $n_i$  y con las relaciones de L-

momentos definidos como  $t^{(i)}$ ,  $t_3^{(i)}$  y  $t_4^{(i)}$ . Siendo  $t^R$ ,  $t_3^R$  y  $t_4^R$  los valores de los L-momentos regionales de L-CV, L-Asimetría y L-Kurtosis respectivamente, ponderados proporcionalmente en función de la longitud muestral

$$t^R = \frac{\sum_{i=1}^N n_i t^{(i)}}{\sum_{i=1}^N n_i} \quad (16)$$

la desviación estándar ponderada de los *L-CV* locales es:

$$V = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N n_i (t^{(i)} - t^R)^2}{\sum_{i=1}^N n_i} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

Se ajusta la distribución Kappa a las relaciones medias regionales, 1,  $t^R$ ,  $t_3^R$  y  $t_4^R$ . Se establece un valor de 1 para la media regional ya que la media de los valores reescalados  $q_y$  de cada una de las estaciones es también 1. Se realizan  $n$  simulaciones ( $nsim$ ) de una región con  $N$  estaciones, teniendo en cuenta para cada una de ellas la función de distribución de frecuencias Kappa. Para cada región simulada se calcula la desviación estándar ponderada de L-CV ( $V$ ). Además, para cada simulación se calcula la media ( $\mu_v$ ) y la desviación estándar ( $\sigma_v$ ) de los valores de  $nsim$ . La heterogeneidad  $H$  se calcula como:

$$H = \frac{(V - \mu_v)}{\sigma_v} \quad (18)$$

La comparación entre valores observados y simulados se realiza por medio del estadístico  $H$ , realizando 500 simulaciones como recomiendan los autores. Los límites para determinar si una región pasa la prueba de homogeneidad se muestran en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2** Valores de heterogeneidad (H). Modificada de Hosking y Wallis (1997).

Heterogeneidad (H)	Hosking y Wallis (1997)	Wallis et al. (2007)
Homogénea	$H < 1$	$H < 2$
Posiblemente heterogénea	$1 < H < 2$	$2 < H < 3$
Heterogénea	$H > 2$	$H > 3$

El determinar H por medio de la formula anterior, se basa en que los L-CV tienen un poder discriminatorio mayor que L-Asimetría y L-Kurtosis, y en que tienen mayor capacidad de comparación de estaciones por el método del índice de avenida.

Si la región no es calificada como “aceptablemente homogénea”, se debe considerar la posibilidad de volver a regionalizar o repetir el proceso.

### 3.2.3.- Selección de la distribución de frecuencia

Una vez que una región homogénea ha satisfecho la condición de homogeneidad, es posible determinar basados tanto en el uso del diagrama de las relaciones de L-momentos regionales, como en el uso de la prueba de bondad de ajuste  $Z^{\text{DIST}}$ , la distribución de probabilidad regional, así como estimar los parámetros de esta distribución.

Para establecer que distribución de frecuencias regional es la más adecuada, Hosking y Wallis (1997), proponen diversas funciones candidatas: Logística Generalizada (GLO), General de Valores Extremos (GEV), Generalizada Normal (GNO), Pearson tipo III (PE3) y Generalizada de Pareto (GPA). El emplear distribuciones de tres a cinco parámetros (como las mencionadas), permite tener una mayor fiabilidad que en los métodos clásicos, con distribuciones de dos parámetros, en los que los cuantiles estimados más extremos aumentan su error.

Si más de una distribución se ajustara, se elegiría aquella que mejor se ajuste a valores futuros, en función de los parámetros de bondad de ajuste.

Siendo una región aceptablemente homogénea, las relaciones de los L-momentos de las estaciones que forman la región se resumen en los L-momentos regionales. Los parámetros de ubicación y escala de la distribución que se evalúa se calculan igualándolos con los valores de la

media y L-CV de la región respectivamente. La bondad de ajuste determina cuanto se acercan los valores de L-Asimetría y de L-Kurtosis de la distribución a los de la región.

El procedimiento consiste de una región de  $N$  estaciones, en la que cada estación  $i$ , con una longitud muestral  $n_i$ , tiene como relaciones de L-momentos  $t^{(i)}$ ,  $t_3^{(i)}$  y  $t_4^{(i)}$ , donde  $t^R$ ,  $t_3^R$  y  $t_4^R$  son las relaciones medias regionales de L-CV, L-Asimetría y L-Kurtosis, ponderados proporcionalmente en función de la longitud muestral.

Cada una de las regiones es ajustada por separado a las relaciones medias regional,  $1$ ,  $t^R$  y  $t_3^R$ , denotándose como  $\tau_4^{DIST}$  al coeficiente de L-Kurtosis de la distribución ajustada, en el que DIST hace referencia a las distribuciones GNO, GEV, GPA, PE3 y GLO.

Paralelamente se ajusta una distribución Kappa a las relaciones medias regionales  $1$ ,  $t^R$ ,  $t_3^R$  y  $t_4^R$  realizándose  $N_i$  simulaciones para una región de  $N$  estaciones cada una. Para la  $j$ -ésima región simulada se obtiene el valor regional de L-Asimetría,  $t_3^{[j]}$ , y de L-Kurtosis,  $t_4^{[j]}$ . El sesgo de  $t_4^R$  se calcula:

$$B_4 = N_{sim}^{-1} \sum_{j=1}^{N_{sim}} (t_4^{[j]} - t_4^R) \quad (19)$$

y la desviación estándar de  $t_4^R$

$$\sigma^4 = \left[ (N_{sim} - 1)^{-1} \left\{ \sum_{j=1}^{N_{sim}} (t_4^{[j]} - t_4^R)^2 - N_{sim} B_4^2 \right\} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

para cada distribución candidata la medida de bondad de ajuste viene dada por

$$Z^{DIST} = \frac{(t_4^{DIST} - t_4^R - B_4)}{\sigma_4} \quad (21)$$

El ajuste es adecuado si  $Z^{DIST}$  es cercano al cero, y si se establece dentro de los límites de  $Z^{DIST} \leq |1.64|$  que proponen Hosking y Wallis (1997). Son aceptables todas aquellas estaciones que



cumplan con este criterio. Para cada una de ellas se calcula la curva regional de frecuencias. Si las curvas son iguales, cualquiera de las distribuciones puede considerarse como adecuada, aunque se opta por determinarla por el método más robusto.

### 3.2.4.- Estimación de cuantiles

Seleccionadas las regiones y las distribuciones de frecuencia más apropiadas para cada caso, se proceden a determinar los parámetros necesarios para el cálculo de los cuantiles, o la función de cuantiles completa para un sitio específico. La relación entre las distribuciones de las estaciones de una región aceptablemente homogénea, permite estimar con mayor precisión los valores de los cuantiles obtenidos de todas las estaciones.

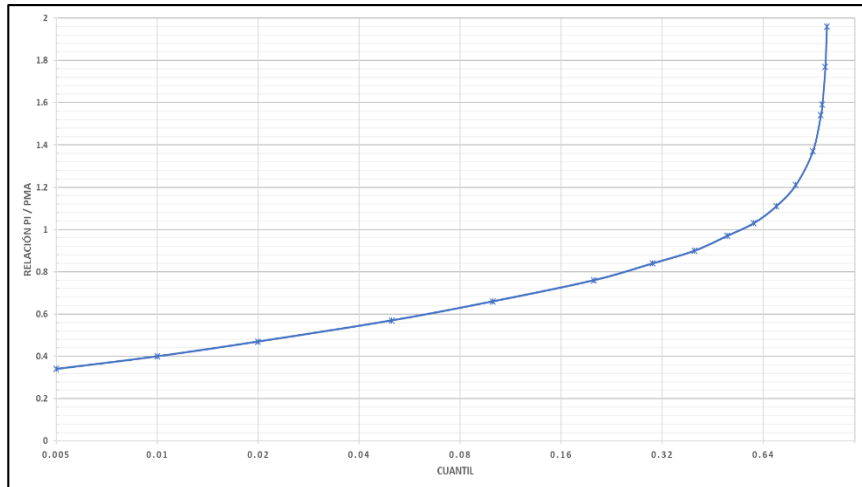
De acuerdo con el principio de índice de avenidas, la función de cuantiles de la variable aleatoria  $X$ , asociada a un evento específico (por ejemplo, el cuantil de interés corresponda a una precipitación anual de 50% de la precipitación media anual), es función de la curva de crecimiento regional y de un factor de escala. Esto es:

$$Q_i(F) = \mu_i q(F) \quad (22)$$

Es decir, la función de cuantiles del sitio de interés ( $Q_i(F)$ ), se determina a partir de  $q(F)$  que es la función de cuantiles regional adimensional (curva de crecimiento regional) estimada mediante el análisis regional de frecuencias y multiplicada por un factor de escala ( $\mu_i$ ), que puede ser el promedio de la variable analizada para el sitio de interés (Núñez y Verbist 2010).

Mediante esta curva de crecimiento regional, se muestra la relación entre la precipitación media local / precipitación media regional y la probabilidad de no excedencia anual. A partir de la cual se puede estimar la probabilidad de no excedencia o el periodo de retorno de cualquier evento de interés a escala anual (Cruz la, 2015).

En la Figura 3.4, se muestra un ejemplo de una curva de crecimiento regional, los valores de cada cuantil representan la relación mencionada en el párrafo anterior, expresada como  $P_i / PMA$ .



**Figura 3.4** Curva de crecimiento regional. Elaboración propia.

El uso de estas curvas de crecimiento regional, permite determinar la probabilidad de ocurrencia de un año cuya precipitación sea de un porcentaje definido de la precipitación media anual, o especificar la precipitación esperada ( $P_i$ ) en un año para alguna de las estaciones estudiadas.

### 3.2.5.- Mapeo

El análisis regional de frecuencias basado en L-momentos, presenta como ventaja la facilidad en la implementación del mapeo espacial de los cuantiles, probabilidades o periodos de retorno, declarando los sitios medidos y no medidos; a través de varios ejemplos de aplicación y extendiéndose significativamente en las capacidades vinculadas al procedimiento, lo que resulta en un análisis probabilístico robusto y productos de gran valor para la toma de decisiones (Núñez y Verbist, 2010).

De acuerdo al tipo de información obtenida del ARF-LM, existen tres tipos de productos:

- *Mapa de probabilidades*, como representación de un medio cartográfico oportuno de la probabilidad de ocurrencia de un evento especificado.
- *Mapa de cuantiles*, como representación de la magnitud de un evento asociado en una determinada probabilidad de ocurrencia.

- *Mapa de periodos de retorno*, como representación del periodo de frecuencia medio para un evento con determinada magnitud.

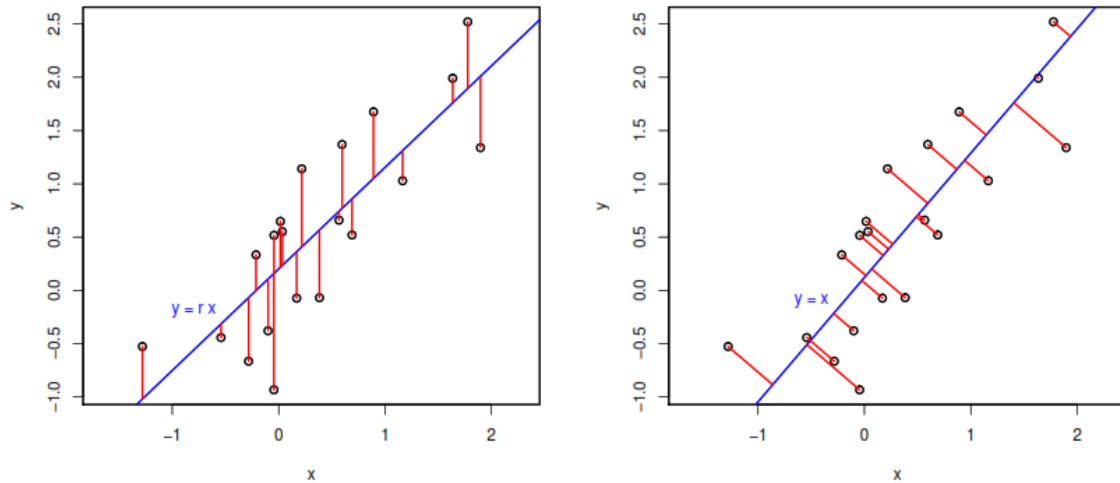
### 3.3.- Paquetería Climatol

La metodología empleada por este software, parte de los inicios de relleno de datos que se realizaba mediante las estimaciones calculadas a partir de series próximas, adaptando el método de Paulhus y Kohler (1952) para rellenar precipitaciones diarias mediante promedios de valores cercanos. Climatol normaliza los datos mediante una serie de procesos iterativos que normalizan los datos, mediante la división por sus valores medios ( $x=X/mX$ ), además de restar las medias ( $x=X-mX$ ) o mediante una estandarización completa ( $x=(X-mX)/sX$ ), denominando  $mX$  y  $sX$  a la media y desviación típica de una serie  $X$  respectivamente (Guijarro, 2018).

El principal problema de esta metodología, es que las medias de las series en el periodo de estudio no se conocen si estas no están completas, lo que es común en bases de datos reales. Para resolver este problema, Climatol calcula primero estos parámetros con los datos disponibles en cada serie, rellena los datos ausentes usando las medias y desviaciones típicas provisionales, y vuelve a calcular con las series rellenadas. Posteriormente se vuelven a calcular los datos inicialmente ausentes, obteniendo nuevas medias y desviaciones típicas, repitiendo hasta que ninguna media cambia al redondear con la precisión inicial de los datos (Guijarro, 2018). Una vez estabilizadas las medias, se normalizan todos los datos y se procede a estimarlos por medio de la siguiente expresión:

$$\hat{y} = \frac{\sum_{j=1}^{j=n} w_j x_j}{\sum_{j=1}^{j=n} w_j} \quad (24)$$

En la que  $\hat{y}$  es un dato estimado mediante los correspondientes  $n$  datos  $x_j$  más cercanos disponibles en el paso de tiempo, y  $w_j$  es el peso asignado a cada uno de ellos. Estadísticamente  $\hat{y}_i = x_i$  es un modelo de regresión lineal denominado Eje Mayor Reducido o Regresión Ortogonal, donde la recta se ajusta minimizando las distancias de los puntos medidas en dirección perpendicular a la misma (regresión tipo II), en lugar de una dirección vertical (regresión tipo I) como generalmente se realiza (Guijarro, 2018) esto se puede apreciar en la Figura 3.5.



**Figura 3.5** En rojo, desviaciones de la recta de regresión lineal (azul) minimizadas por mínimos cuadrados en los tipos I (izquierda) y II (derecha). Tomada de Guijarro (2018).

Las series estimadas a partir de las demás, sirven como referencias para sus correspondientes series observadas, de forma que el siguiente paso es obtener series de anomalías restando los valores estimados a los observados (siempre en forma normalizada). Estas series de anomalías van a permitir:

- Controlar la calidad de las series y eliminar aquellas anomalías que superen un umbral prefijado.
- Comprobar su homogeneidad mediante la aplicación del Standard Normal Homogeneity Test (SNHT: Alexandersson, 1986).

Cuando los máximos valores SNHT de las series son mayores que un umbral predefinido, la serie se divide por el punto de máximo SNHT, pasando todos los datos antes del cambio a una nueva serie que se añade a las demás con las mismas coordenadas, pero añadiendo un sufijo numérico al código y al nombre de la estación. Este procedimiento se realiza de forma iterativa, partiendo solo las series con mayores valores SNHT en cada ciclo, hasta que no se encuentren más inhomogeneidades. Además, como SNHT es una prueba originalmente ideada para encontrar un solo punto de ruptura en una serie, la existencia de dos o más saltos en la media de un tamaño similar podría enmascarar sus resultados. Para minimizar este problema, en una primera pasada se aplica SNHT sobre ventanas temporales solapadas, y después en una segunda pasada se aplica

SNHT a las series completas, que es cuando la prueba tiene más poder de detección. Finalmente, una tercera pasada se dedica a rellenar todos los datos ausentes en todas las series y subseries homogéneas con el mismo procedimiento de estimación de datos explicado anteriormente. En la Figura 3.6 se muestran los pasos que sigue Climatol en todo su proceso.

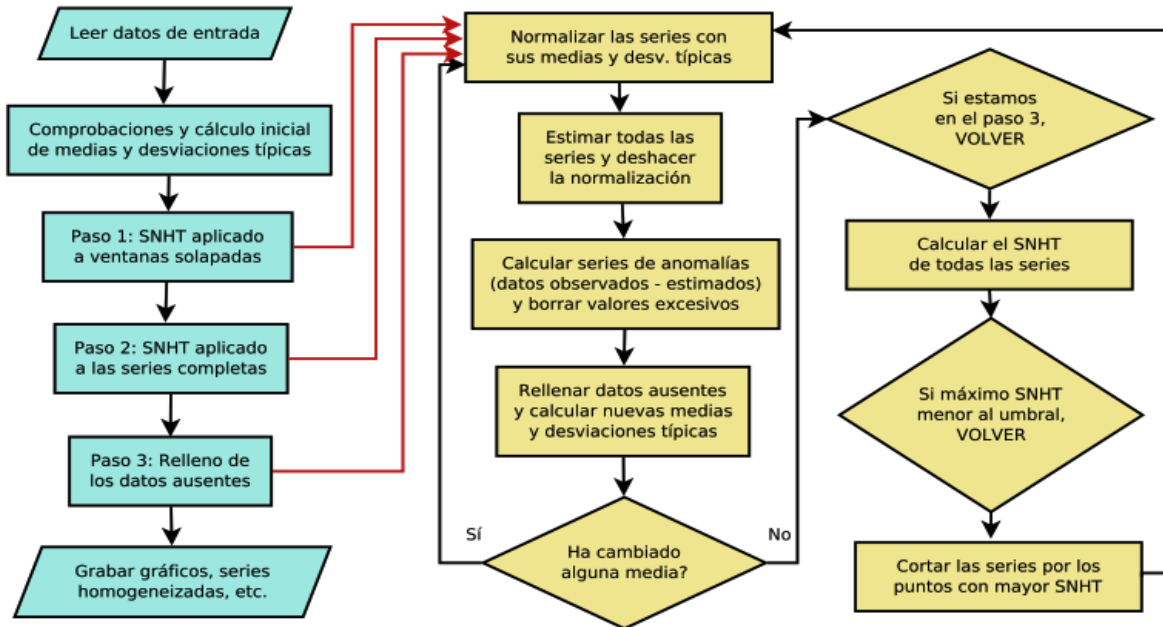


Figura 3.6 Diagrama de flujo del funcionamiento de Climatol, mostrando sus procesos iterativos. Tomado de Guijarro (2018).

# CAPÍTULO IV

## ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1.- Análisis de datos de las estaciones pertenecientes al área de estudio

Los datos utilizados fueron tomados de la página del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Lo cual en un primer análisis arrojó 147 estaciones climatológicas funcionales al momento del estudio, de las cuales solamente se consideraron 114 que fueron las que contaban con datos suficientes para ser analizadas.

De estas estaciones, se analizaron los registros históricos de datos mensuales de precipitación, debido a que varias de ellas no cuentan con un registro constante de años con datos completos, se consideró elegir aquellas que en un periodo de 30 años contaran con por lo menos un 80% de datos completos.

Para la selección del periodo a estudiar, se tomaron en cuenta los aspectos mencionados en el párrafo anterior, lo que resultó en la elección del periodo de 1984-2013, resultando en la disminución de estaciones para finalmente contar con un total de 90, que serán utilizadas para realizar el análisis regional de frecuencias con base en la metodología de L-momentos, en la cuenca del río Bravo, México.

En la Tabla 4.1 se concentran las estaciones climatológicas elegidas, y en la Figura 4.1 se muestra su distribución espacial, las cuales, aunque se encuentran en cierto grado distribuidas dentro de la región de estudio, se puede apreciar una significativa ausencia de ellas en la parte central y en los extremos de la cuenca.

**Tabla 4.1** Estaciones climatológicas seleccionadas. Elaboración propia.

ID	CLAVE	NOMBRE	ESTADO	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	PMA
1	5002	ALLENDE (SMN)	COAHUILA	28.333	-100.833	374	463.8
2	5011	EJIDO REATA	COAHUILA	26.128	-101.076	936	262.3
3	5013	EJIDO SAN MIGUEL	COAHUILA	28.637	-102.948	1060	256.9
4	5016	GENERAL CEPEDA	COAHUILA	25.383	-101.476	1400	347.9
5	5020	MUZQUIZ (DGE)	COAHUILA	27.869	-101.519	490	624.8
6	5022	OCAMPO	COAHUILA	27.313	-102.396	1100	252.2
7	5030	PRESA VENUSTIANO CARRANZA	COAHUILA	27.519	-100.620	272	323.4
8	5031	PROGRESO	COAHUILA	27.422	-101.002	360	358.0
9	5033	SABINAS (DGE)	COAHUILA	27.847	-101.123	339	501.2
10	5038	SANTA TERESA	COAHUILA	26.393	-101.353	1010	286.0
11	5044	CUATRO CIENEGAS (SMN)	COAHUILA	26.986	-102.067	740	218.0
12	5045	JUAREZ	COAHUILA	27.614	-100.725	280	304.1

ID	CLAVE	NOMBRE	COAHUILA	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	PMA
13	5048	SALTILLO (DGE)	COAHUILA	25.433	-101.000	1700	344.2
14	5140	RAMOS ARIZPE (DGE)	COAHUILA	25.539	-100.951	1400	300.0
15	5142	HIPOLITO	COAHUILA	25.698	-101.405	1150	148.8
16	5145	SAN JUAN DE LA VAQUERIA	COAHUILA	25.255	-101.220	1840	403.2
17	5148	POTRERO DE ABREGO	COAHUILA	25.284	-100.343	1740	453.2
18	5149	CIENEGA DE LA PURISIMA	COAHUILA	25.338	-100.530	2420	600.0
19	5151	ALTO DE NORIAS	COAHUILA	25.977	-101.249	920	195.6
20	5152	BAJAN	COAHUILA	26.531	-101.259	820	289.8
21	5155	LAMADRID	COAHUILA	27.046	-101.793	640	337.4
22	5156	PALAU	COAHUILA	27.887	-101.402	430	425.9
23	5158	EL TANQUITO	COAHUILA	26.621	-101.313	920	272.5
24	5163	EL GATO	COAHUILA	27.229	-101.726	640	359.7
25	5164	SAN FRANCISCO NADADORES	COAHUILA	27.142	-101.652	500	300.4
26	5167	EL MARQUEZ	COAHUILA	26.641	-101.358	660	337.7
27	5170	LA ROSA	COAHUILA	25.518	-101.386	1680	335.2
28	5171	SACRAMENTO	COAHUILA	27.004	-101.724	1275	312.2
29	8044	DELICIAS (DGE)	CHIHUAHUA	28.194	-105.464	1173	301.3
30	8049	LUIS L. LEON	CHIHUAHUA	28.979	-105.312	1080	299.3
31	8052	EL MULATO	CHIHUAHUA	29.394	-104.169	774	43.0
32	8081	JIMENEZ (DGE)	CHIHUAHUA	27.133	-104.917	1370	363
33	8085	LA BOQUILLA	CHIHUAHUA	27.544	-105.412	1323	343.2
34	8099	MAJALCA	CHIHUAHUA	28.803	-106.485	2119	115.4
35	8153	VALLE DE ZARAGOZA (DGE)	CHIHUAHUA	27.454	-105.807	1350	143.0
36	8156	VILLA CORONADO	CHIHUAHUA	26.739	-105.160	1516	220.9
37	8162	CAMARGO (DGE)	CHIHUAHUA	27.700	-105.183	1250	336.5
38	8185	PRESA CHIHUAHUA (DGE)	CHIHUAHUA	28.583	-106.167	1548	470.2
39	8194	VILLA LOPEZ	CHIHUAHUA	27.003	-105.036	1424	251.2
40	8202	PRESA FRANCISCO I. MADERO	CHIHUAHUA	28.167	-105.628	1242	286.9
41	8213	JUAREZ (DGE)	CHIHUAHUA	31.736	-106.486	1135	168.8
42	8247	COYAME (DGE)	CHIHUAHUA	29.450	-105.250	1220	182.3
43	8254	OJINAGA (DGE)	CHIHUAHUA	29.550	-104.400	800	217.0
44	8267	EL VERGEL (DGE)	CHIHUAHUA	26.476	-106.388	2740	650.7
45	8270	LA MESA	CHIHUAHUA	28.773	-105.964	1250	276.7
46	8311	COLINA	CHIHUAHUA	27.577	-105.371	1214	472.0
47	8322	EL VERGEL (CFE)	CHIHUAHUA	26.483	-106.383	2740	570.9
48	10141	CANUTILLO	DURANGO	26.526	-105.373	1700	528.9
49	19002	AGUA BLANCA	NUEVO LEON	25.544	-100.523	2193	704.2
50	19003	ALLENDE	NUEVO LEON	25.284	-100.020	454	1026.8
51	19007	CABEZONES	NUEVO LEON	24.991	-99.742	460	880.9
52	19009	CASILLAS	NUEVO LEON	25.196	-100.214	1279	565.7
53	19010	CERRALVO (DGE)	NUEVO LEON	26.090	-99.618	280	731.4
54	19012	CIENEGA DE FLORES	NUEVO LEON	25.952	-100.172	380	537.5
55	19013	CIENEGA DEL TORO	NUEVO LEON	25.085	-100.333	2140	490.1
56	19015	EL CERRITO	NUEVO LEON	25.510	-100.193	510	998.0
57	19016	EL CUCHILLO	NUEVO LEON	25.718	-99.256	145	534.1
58	19018	EL PAJONAL	NUEVO LEON	25.490	-100.389	2576	544.6
59	19021	GARZA AYALA	NUEVO LEON	26.491	-100.058	257	534.7
60	19022	GENERAL BRAVO (DGE)	NUEVO LEON	25.801	-99.176	106	528.8
61	19024	ANAHUAC	NUEVO LEON	27.238	-100.131	194	512.6
62	19028	LAMPAZOS (SMN)	NUEVO LEON	27.078	-100.491	285	399.8
63	19031	LA CRUZ	NUEVO LEON	25.546	-100.523	2224	793.9
64	19033	LAGUNA DE SANCHEZ	NUEVO LEON	25.346	-100.280	1879	634.9
65	19042	LOS RAMONES	NUEVO LEON	25.691	-99.631	210	598.6
66	19045	MINA	NUEVO LEON	26.002	-100.533	590	305.1
67	19047	MIMBRES	NUEVO LEON	24.974	-100.259	2331	613.0

ID	CLAVE	NOMBRE	ESTADO	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	PMA
68	19048	MONTEMORELOS	NUEVO LEON	25.182	-99.832	230	866.7
69	19053	RAYONES	NUEVO LEON	25.021	-100.077	848	445.2
70	19054	RINCONADA	NUEVO LEON	25.681	-100.718	1000	225.3
71	19055	SALINILLAS	NUEVO LEON	27.429	-100.374	240	428.7
72	19056	SAN JUAN	NUEVO LEON	25.543	-99.840	260	746.5
73	19063	VALLECILLO (DGE)	NUEVO LEON	26.658	-99.986	265	471.0
74	19069	LA BOCA	NUEVO LEON	25.429	-100.129	460	1054.2
75	19096	LA HUASTEQUITA	NUEVO LEON	25.639	-100.455	720	396.8
76	19104	LA ESCONDIDA	NUEVO LEON	26.258	-99.761	300	661.0
77	19105	DOCTOR GONZALEZ	NUEVO LEON	25.854	-99.943	370	588.0
78	19117	EJIDO MARIN	NUEVO LEON	25.859	-100.022	403	533.3
79	19124	HIGUERAS (DGE)	NUEVO LEON	25.962	-100.016	494	577.3
80	19131	PUERTO DEL EBANO	NUEVO LEON	26.349	-100.044	310	561.4
81	19133	SABINAS HIDALGO	NUEVO LEON	26.501	-100.154	291	570.7
82	19134	SALINAS VICTORIA	NUEVO LEON	25.959	-100.293	445	474.1
83	19140	TEPEHUAJE	NUEVO LEON	25.505	-99.771	250	715.8
84	19141	VILLALDAMA	NUEVO LEON	26.501	-100.422	420	502.3
85	19146	CONGREGACION CALLES	NUEVO LEON	25.215	-99.938	455	874.0
86	19158	RANCHO DE GOMAS	NUEVO LEON	26.170	-100.464	565	408.3
87	19165	CHUPADEROS DEL INDIIO	NUEVO LEON	25.814	-100.790	900	245.5
88	19170	EL HOJASE	NUEVO LEON	26.115	-100.361	500	446.2
89	19173	PALMITOS (GE)	NUEVO LEON	25.417	-99.997	368	790.6
90	19178	SIERRA MORENA	NUEVO LEON	26.537	-100.533	500	490.1

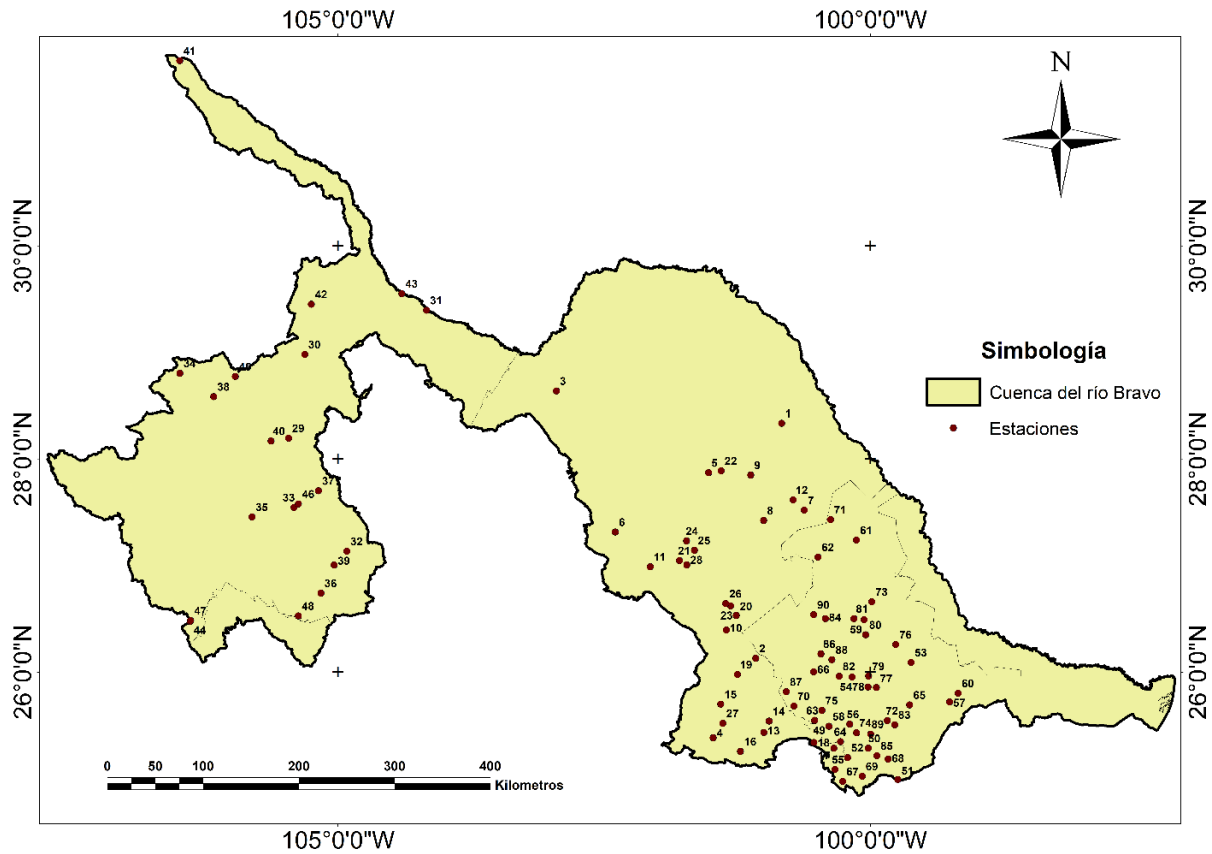


Figura 4.1 Ubicación de las estaciones empleadas para el ARF-LM. Elaboración propia.



## 4.2.- Relleno de datos faltantes y prueba de homogeneidad

Una vez definidas las estaciones aptas para el estudio, se procedió a tratar las series de tiempo mediante la paquetería Climatol, en el que se realizó la prueba de homogeneidad y relleno de datos faltantes, mediante una serie de procesos iterativos que dan como resultado nuevas series que posteriormente fueron analizadas y aceptadas para su uso en el ARF-LM por medio del software L-RAP, el cual emplea el método de L-momentos hasta la etapa cuatro de la metodología establecida por Hosking y Wallis (1997).

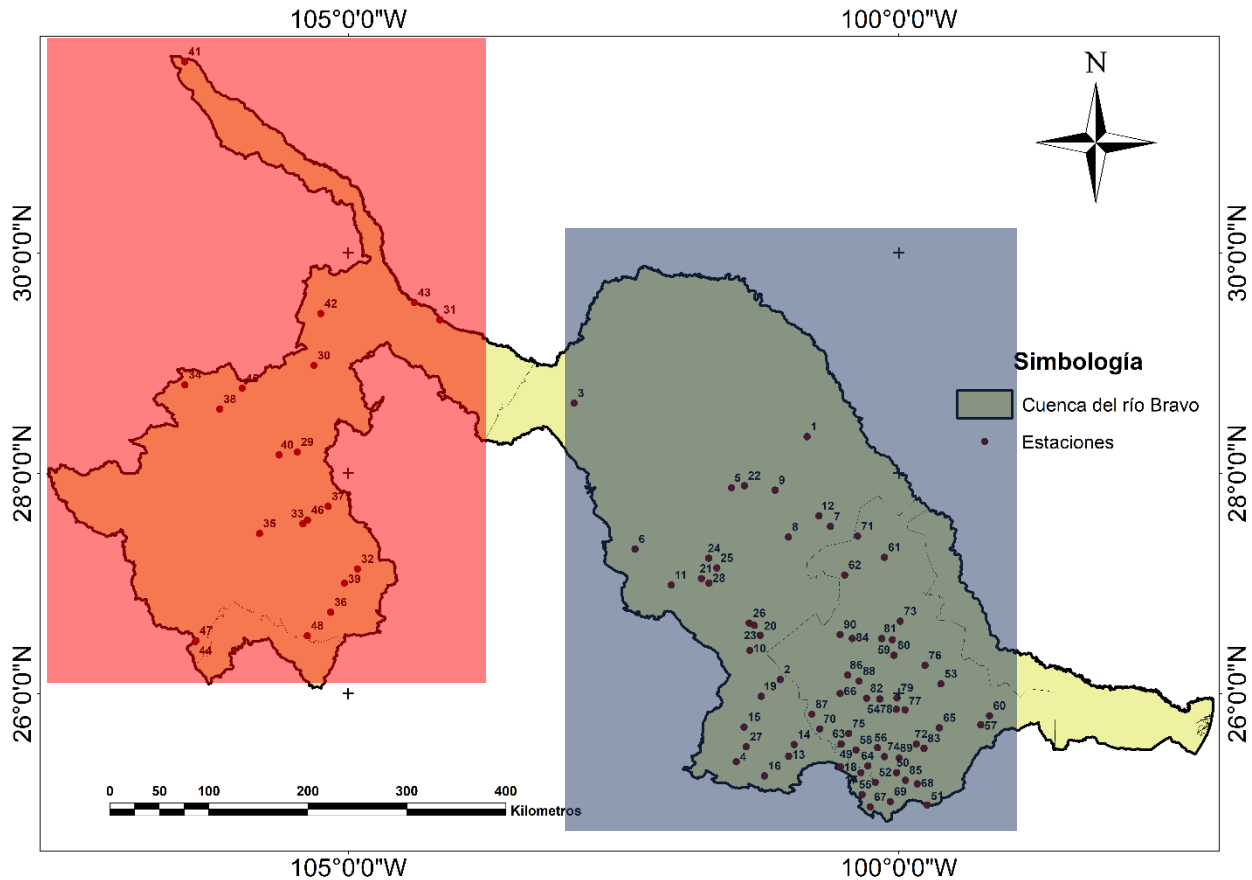
Esta paquetería necesita de dos archivos de entrada para poder ejecutarse (Figura 4.2), uno de los cuales consiste en una lista de coordenadas [longitud (grados decimales) y latitud (grados decimales)], elevación (msnm), clave de identificación de la estación y finalmente su nombre. El otro archivo consiste en los datos agrupados de todas las estaciones (los datos ausentes tendrán que ser representados con un NA), lo que genera una columna por cada mes registrado (12) y una fila por cada año de registro (30), teniendo así 360 datos por cada estación de enero de 1984 a diciembre de 2013.

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda	Estación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
-105.464	28.194	1173	"8044"	"DELICIAS (DGE)"	16	113.5	80	60	60.5	16	9.5	31					
-105.312	28.979	1080	"8049"	"LUIS L. LEON"	7	2.5	0	33	22.2	74	46	98.7	22	17.5	34.5		
-104.169	29.394	774	"8052"	"EL MULATO"	1.5	1.5	0	86.5	54	35	77	97	59	18	3.5	0	
-104.917	27.133	1370	"8081"	"JIMENEZ (DGE)"	1	0	0	9.5	2.1	97.5	87.2	111.5	26	20	0	4	
-105.412	27.544	1323	"8085"	"LA BOQUILLA"	3.5	9.5	1.5	0	0	10.5	39.5	78.5	1	16.75	3.5	0	
-106.485	28.803	2119	"8099"	"MAJALCA"	NA	0	0	0	0	0	140.5	155.5	158.6	0	4	0.5	
-105.807	27.454	1350	"8153"	"VALLE DE ZARAGOZA (DGE)"	10.3	5.6	0	0	0.2	2.5	140.5	102.5	46.5	0	18	37.5	
-105.160	26.739	1516	"8156"	"VILLA CORONADO"	75	22.5	2	9	64.3	8	14.5	36.5	31.5	3	8	5.5	
-105.183	27.700	1250	"8162"	"CAMARGO (DGE)"	5	2.5	0	0	1.7	18.6	123	89.5	97.5	0	1	2	
-106.167	28.583	1548	"8185"	"PRESA CHIHUAHUA (DGE)"	0.5	3.5	1	0	4	49.5	35.5	30.5	24.5	0.5	4	0.5	
-105.036	27.003	1424	"8194"	"VILLA LOPEZ"	0	0	0	0	0	123.5	33.5	95	41	5.5	18	0	
-105.628	28.167	1242	"8202"	"PRESA FRANCISCO I. MADERO"	4	8	12.5	17	24.5	20	54	24	53.5	13.5	4.5	11	
-106.486	31.736	1135	"8213"	"JUAREZ (DGE)"	0	0	0	0	0	2	14.5	43	48.5	77.5	12.5	0	
-105.250	29.450	1220	"8247"	"COYAME (DGE)"	NA	0	6	0	0	26	49	67	9.75	0	0	0	
-104.400	29.550	800	"8254"	"OJINAGA (DGE)"	3.5	19.5	0	0	4.5	16	62.8	38	26	0	0	0	
-106.388	26.476	2740	"8267"	"EL VERGEL (DGE)"	0	11	3	0	42.5	10.5	186.5	90.5	1	20.5	4	2.5	
-105.964	28.773	1250	"8270"	"LA MESA"	17.2	29.5	0	6	39	5	14.5	28.5	14	20.5	0	17.2	
-105.371	27.577	1214	"8311"	"COLINA"	16.5	14	26.5	21	1	48	99.5	79.4	84.5	64.5	88	16.5	
-106.383	26.483	2740	"8322"	"EL VERGEL (CFE)"	24.5	0	1.5	0	33	64.5	100	74	45.5	1	12	24.5	
-105.373	26.526	1700	"10141"	"CANUTILLO"	1	0	0.5	0	9	23	133.5	196	80.7	36.5	0	0	

Figura 4.2 Archivos de la región 1 para ingresarlos en R. Elaboración propia.

Por medio del test preliminar de las series y sugerencias del autor, el área de estudio fue analizada en 2 procesos diferentes, generando así 2 regiones y 2 archivos por región, un archivo que incluye toda la información de las estaciones (PP1\_1984-2013.est) y otro en el que se registraron los datos mensuales de los 30 años a evaluar (PP1\_1984-2013.dat).

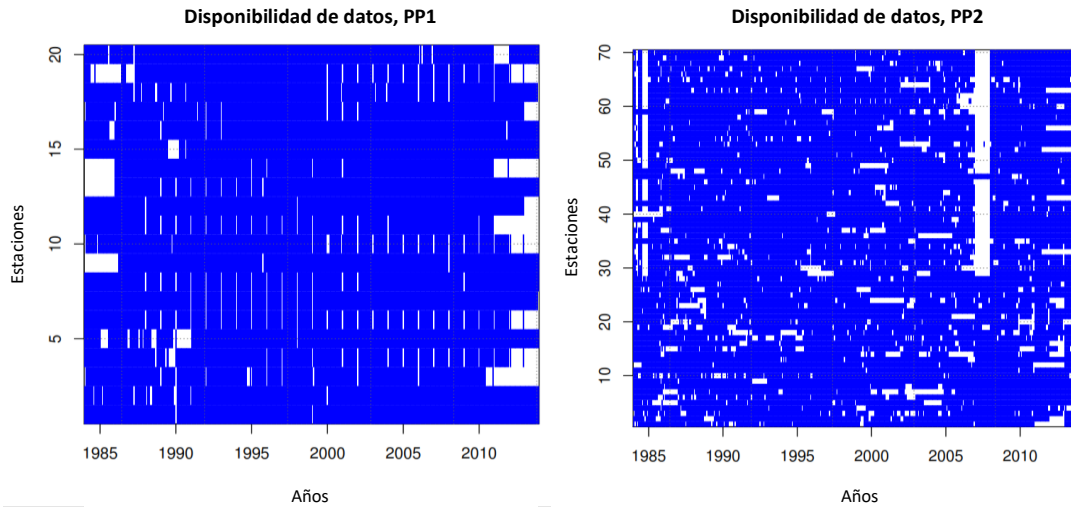
En la Figura 4.3 se muestran las regiones consideradas en este punto para llevar a cabo un mejor ajuste de las series. Las 90 estaciones ingresadas se dividieron de la siguiente manera, 20 pertenecen a la región 1 y 70 a la región 2.



**Figura 4.3** División de la cuenca para su aplicación con Climatol. En color rojo la región 1 y en color azul la región 2.  
Elaboración propia.

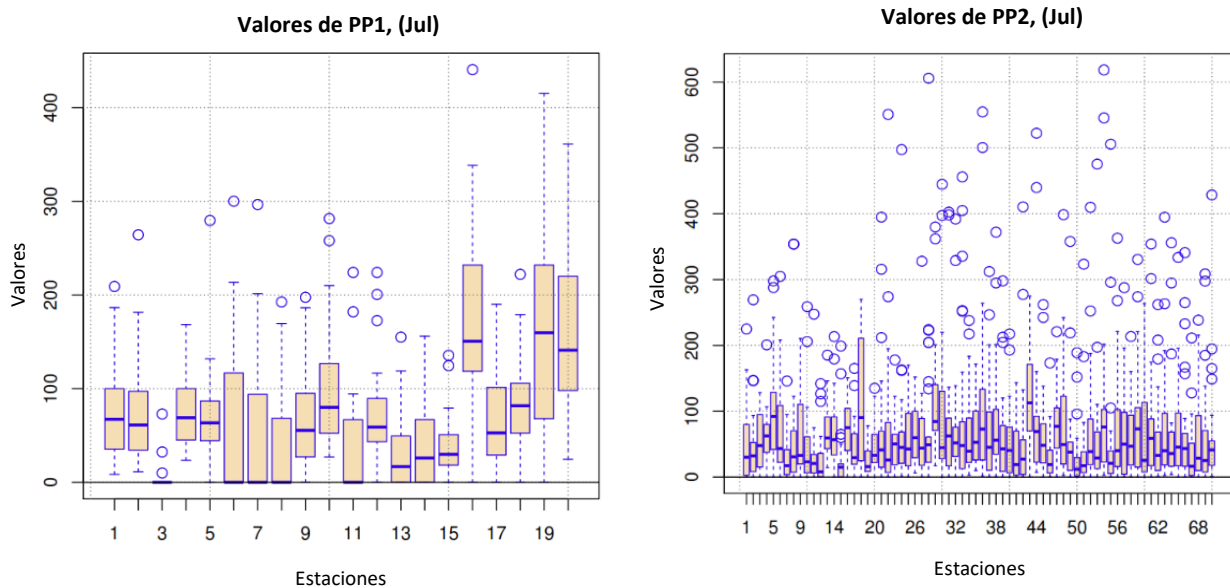
Al ingresar los archivos a la paquetería Climatol se genera un archivo pdf, en el cual se muestran diferentes gráficos que sirven para el análisis de datos anómalos.

En la Figura 4.4 se muestra el primer gráfico generado, el cual presenta la disponibilidad de datos en el periodo de estudio (1984-2013) por estación y región generadas, como se puede apreciar en las 90 estaciones utilizadas para este análisis se observa algún grado de datos ausentes.



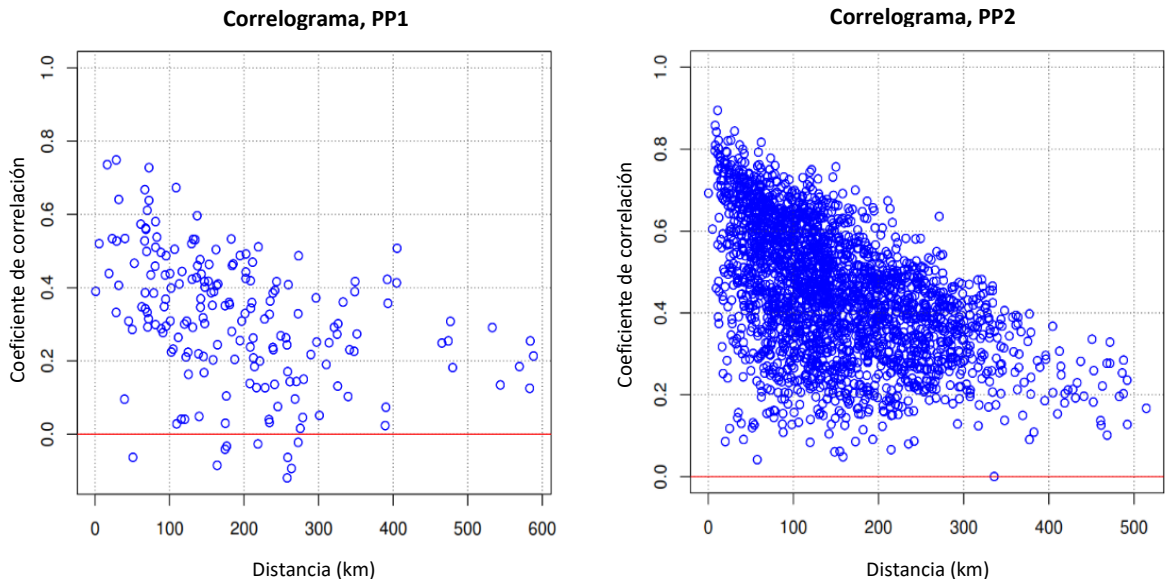
**Figura 4.4** Disponibilidad de datos para el periodo 1984 – 2013, estaciones de la región 1 a la izquierda, estaciones de la región 2 a la derecha. Elaboración propia.

En la Figura 4.5 se muestran diagramas de caja de los datos mensuales de cada una de las estaciones en el que contiene los valores medios, percentil 25 y 75 de la distribución de los datos, así como los valores máximos y mínimos; además se muestra un histograma de frecuencias de todos los datos; en estos gráficos puede hacerse evidente la presencia de valores atípicos.

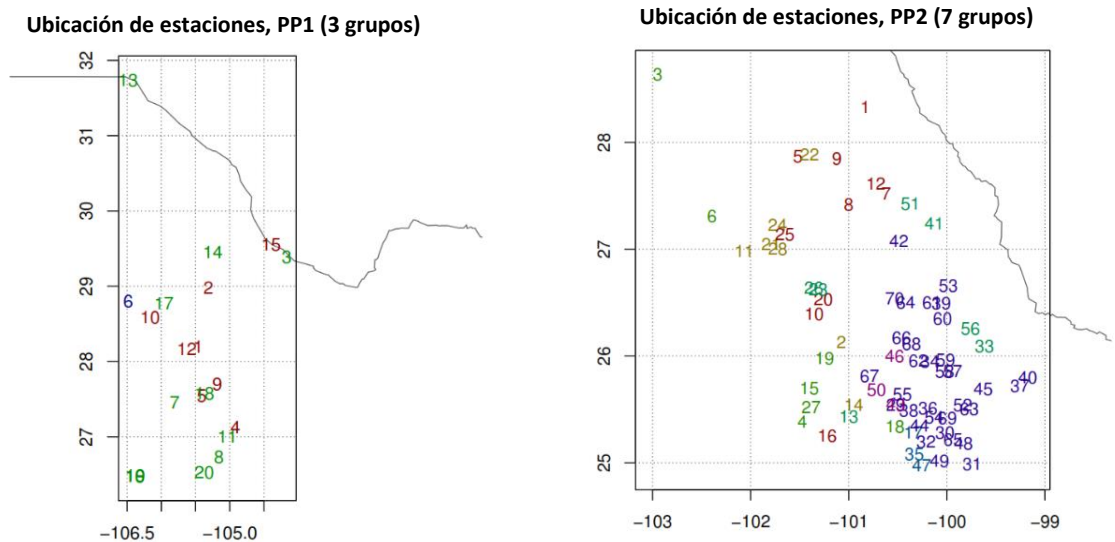


**Figura 4.5** Valores de datos registrados para el mes de julio, a la izquierda la región 1, a la derecha la región 2. Elaboración propia.

En la Figura 4.6 se muestran los gráficos que se centran en las correlaciones entre las series. En cuanto a la Figura 4.7, muestra la clasificación en grupos con una variabilidad similar de acuerdo al coeficiente de correlación de la Figura 4.6, representado las estaciones de un mismo color sobre un mapa. Las correlaciones generalmente son más bajas cuando la distancia entre estaciones es mayor (Guijarro, 2018). Cuanto más alta sean las correlaciones, mayor será la fiabilidad de la homogeneización y el relleno de los datos ausentes.

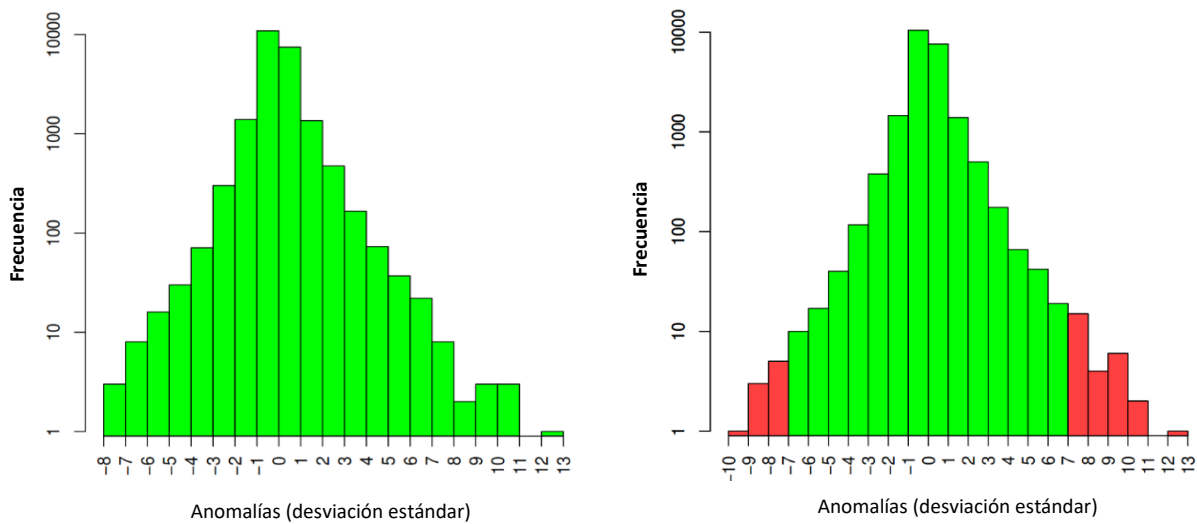


**Figura 4.6** Correlograma de las series que muestran el coeficiente de correlación vs la distancia entre estaciones. A la izquierda la región 1, a la derecha la región 2. Elaboración propia.



**Figura 4.7** Ubicación de estaciones con similar variabilidad climática. A la izquierda la región 1, a la derecha la región 2. Elaboración propia.

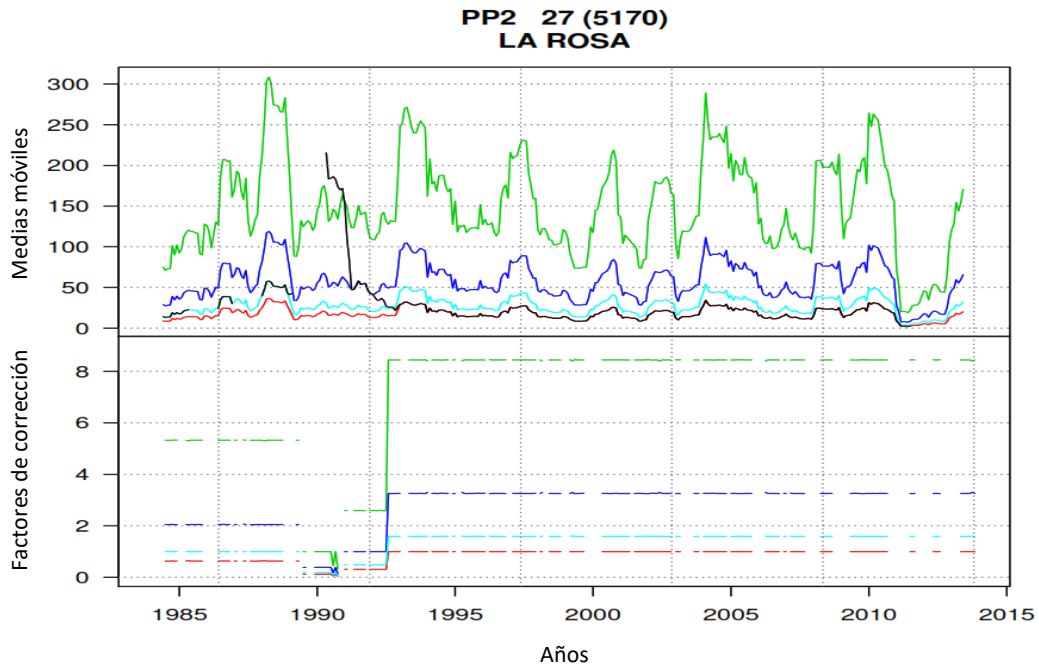
Finalmente se muestra un histograma de las frecuencias de anomalías estandarizadas (Figura 4.8), el cual en el análisis exploratorio sirve para identificar los valores anómalos del conjunto de datos. Dando la posibilidad de ajustar las desviaciones máximas y mínimas, así como los valores máximos para SNHT permitidos para tratar de corregir los valores sospechosos.



**Figura 4.8** Histograma de anomalías estandarizadas de los datos de la región 2 (a la izquierda), histograma de anomalías ajustado a 7 desviaciones (a la derecha). Elaboración propia.

Después del análisis de los gráficos mencionados, un nuevo test arroja las series reconstruidas de acuerdo a los ajustes definidos.

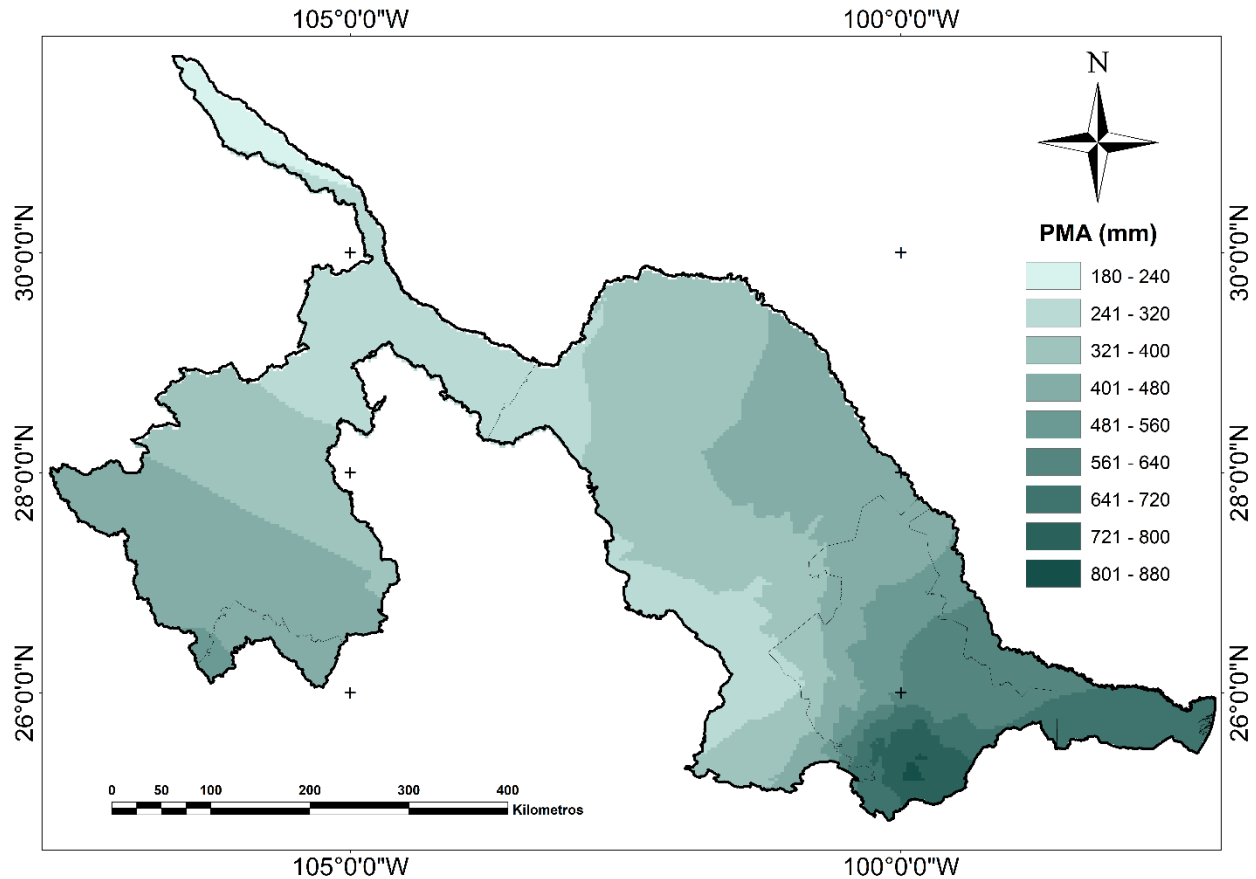
Estas reconstrucciones pueden mostrar más de una serie generada, mostrando en color negro los datos originales, y en color rojo, verde y azul aquellas series generadas a partir de los datos originales. En la figura 4.9 se muestra un ejemplo en el que se aprecian las medias móviles de las series (parte de arriba), y las correcciones aplicadas a las series generadas (parte de abajo). Es importante mencionar que se utilizarán aquellas series que representen de mejor manera los valores originales con los cuales fue cargada la paquetería Climatol.



**Figura 4.9.** Reconstrucción de series completas para la estación “La rosa”, perteneciente a la RH2. Elaboración propia.

Además de contar con estos gráficos que sirven para la verificación de los datos, también el programa genera archivos en Excel los cuales contienen todas las series generadas a partir de la reconstrucción de las mismas. Una vez comprobadas las series obtenidas, se procede a seguir las etapas consideradas en la metodología de los L-momentos, de aquí en adelante con ayuda del programa L-RAP.

En la Figura 4.10, se muestra un mapa que presenta la distribución de la precipitación media anual dentro de la cuenca del río Bravo, México, para el periodo de estudio, generado a partir de las series reconstruidas con Climatol. En ella se aprecia como varía la precipitación de la zona sureste al noroeste de la cuenca, presentando los valores más altos en la parte baja del estado de Nuevo León (720-880 mm de PMA), de esta misma manera, pero en sentido sur-norte varía en la región perteneciente a la cuenca del río Conchos. Valores por debajo de los 400 mm de precipitación media anual, se aprecian en la zona centro y noroeste de la cuenca.



**Figura 4.10** Mapa que muestra la precipitación media anual de la cuenca, generado a partir de las series reconstruidas.

Elaboración propia.

### 4.3.- Identificación de regiones homogéneas

Al partir de la idea de considerar a todas las estaciones dentro de una super-región heterogénea, se obtuvo un valor para  $H1$  de 27.90, con valores de discordancia que varían entre 0.08 y 6.42, siendo 7 estaciones las que presentan  $D_i$  mayor a 3. De las funciones de distribución evaluadas, la Generalizada Normal (GNO) y General de Valores Extremos (GEV) fueron las que se ajustaron a este primer análisis de los datos dando valores de  $Z^{DIST}$  para GNO = 1.34 y GEV = 1.50.

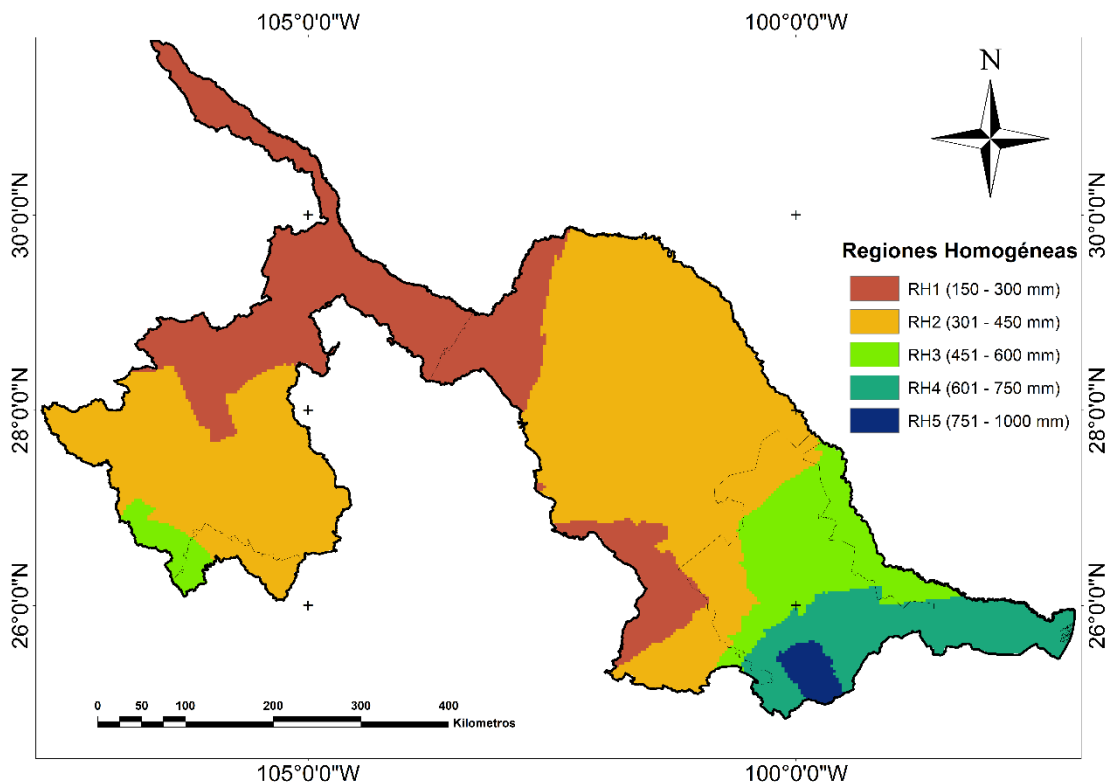
En este primer paso, se descartó la idea de considerar a todas las estaciones dentro de una sola región homogénea, debido a que el valor obtenido para  $H1$  sobrepasa el límite establecido para considerarse una región homogénea ( $H1 < 2$ ), y a estaciones que superaron el valor de

discordancia ( $Di_{critico} < 3$ ). Por lo cual, se procedió a determinar las diferentes regiones homogéneas de acuerdo al principio de estacionalidad y de precipitación media anual.

En un primer intento de dividir las estaciones por regiones, los datos muestran que la principal concentración de precipitación se presenta entre los meses de julio a septiembre, lo que descarta la idea de hacer una división de acuerdo al principio de estacionalidad.

Por otra parte, tomando en cuenta la precipitación media anual como criterio de división, se observan valores que van de los 182 mm a 1055 mm anuales, por lo cual se consideró el dividir las estaciones en regiones con un mismo intervalo de precipitación, en que cada una de ellas contuviera al menos 5 estaciones para obtener un adecuado valor crítico de discordancia, fue así como se propusieron 5 regiones homogéneas.

Los valores de H1 y discordancia de las estaciones en cada región se calcularon con el software L-RAP de forma iterativa, las estaciones discordantes fueron reevaluadas con el fin de reducir su heterogeneidad como lo indican Hosking y Wallis (1997), aquellas que no lograron pertenecer a ninguna de las regiones homogéneas propuestas fueron eliminadas. Al igual que ninguna de las estaciones fue forzada a pertenecer a una determinada RH en función de su ubicación, ya que no se requiere que sean geográficamente continuas.



**Figura 4.11** Distribución espacial de las regiones homogéneas. Elaboración propia.

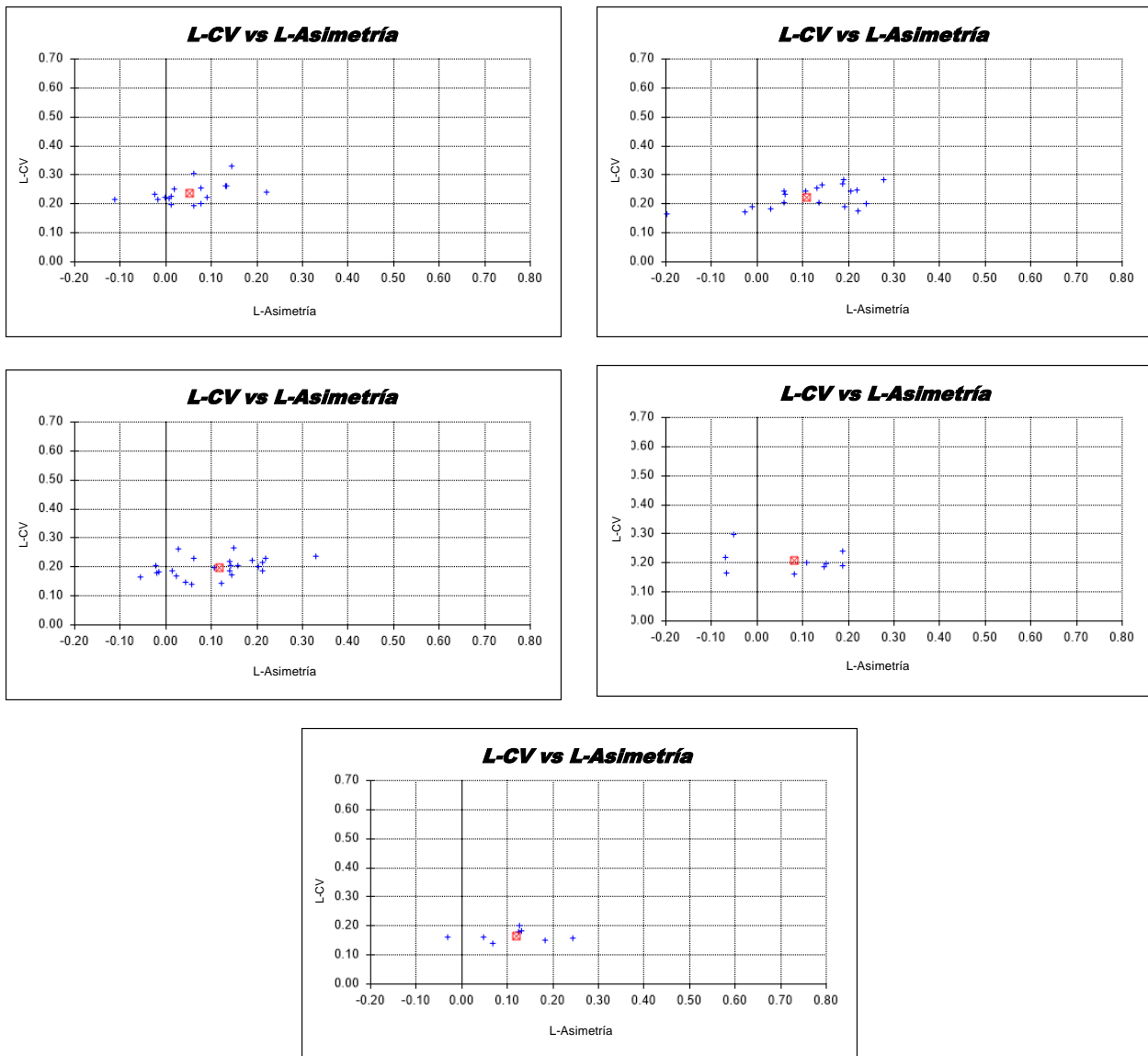


Con estos valores se obtuvieron las regiones homogéneas definitivas para el análisis (Figura 4.11), las cuales son: RH1 de 150 a 300 mm con 17 estaciones, RH2 de 301 a 450 mm con 20 estaciones, RH3 de 451 a 600 mm con 24 estaciones, RH4 de 601 a 750 mm con 9 estaciones y RH5 de 751 a 1055 mm con 8 estaciones. En la Tabla 4.2 se muestran las estaciones y valores de discordancia para cada una de las RH consideradas.

**Tabla 4.2** Valores de discordancia para cada una de las estaciones por región homogénea. Elaboración propia.

REGIÓN 1		REGIÓN 2		REGIÓN 3		REGIÓN 4		REGIÓN 5	
ESTACIÓN	Di	ESTACIÓN	Di	ESTACIÓN	Di	ESTACIÓN	Di	ESTACIÓN	Di
5151	0.67	8044	0.67	5002	0.57	19002	0.64	19003	1.63
5152	0.91	5163	0.37	19024	0.09	19010	1.68	19007	0.85
19165	0.25	19170	0.70	10141	1.96	8267	2.24	19146	0.24
8247	1.61	5167	1.92	19009	0.89	19104	0.04	19015	0.60
5044	0.62	5016	2.66	19012	2.32	19033	1.04	19069	1.15
5011	1.38	8081	1.33	5149	2.63	19047	1.34	19031	1.55
5013	0.50	19096	0.96	19013	1.36	5020	1.31	19048	0.46
5158	0.45	5170	0.13	19105	1.12	19056	0.41	19173	1.51
8270	0.49	5155	1.36	19117	0.77	19140	0.29		
8049	0.77	19028	0.51	19016	1.08				
5022	0.66	19045	0.99	19018	0.14				
8254	0.64	5156	0.72	19021	0.43				
8202	2.02	5030	0.32	19022	1.02				
5140	2.06	5031	0.24	19124	0.49				
19054	0.39	19158	0.69	19042	1.06				
5164	0.59	19053	1.84	5148	0.38				
5038	2.99	5171	2.19	8185	1.59				
		19055	1.25	19131	1.40				
		5048	0.61	5033	0.12				
		5145	0.52	19133	0.18				
				19134	0.74				
				19178	0.92				
				19063	2.39				
				19141	0.34				

En la Figura 4.12 se muestran las gráficas empleadas por el software L-RAP, que sirven de ayuda para corroborar que las estaciones dentro de cada región, caen dentro de un valor concéntrico aceptable de acuerdo con el punto medio de sus L-momentos de L-CV frente a L-Asimetría. Lo que da un acercamiento visual para aquellas estaciones que podrían no pertenecer a una región homogénea específica. De igual manera, se proporciona la Tabla 4.3 que contiene los datos de H1 para cada región homogénea, así como su precipitación media anual.



**Figura 4.12** Gráficas de L-CV vs L-Asimetría de las regiones homogéneas, RH1 lado superior izquierdo, RH2 lado superior derecho, RH3 medio izquierdo, RH4 medio derecho, RH5 parte inferior. Elaboración propia.

**Tabla 4.3.** Valores de H1 y PMA por región homogénea. Elaboración propia.

REGIÓN	PMA	H1
1	256.9	1.23
2	368.8	1.39
3	526.3	0.94
4	675.8	1.92
5	910.6	-0.63

#### 4.4.- Selección de la distribución de frecuencia de mejor ajuste

Una vez que una región homogénea ha aprobado la condición de homogeneidad es posible determinar, basados tanto en el uso del diagrama de las relaciones regionales de L-momentos, como en el uso de la prueba de bondad de ajuste  $Z^{DIST} (\leq |1.64|)$ , la distribución de probabilidad de mejor ajuste, así como estimar los parámetros de esta distribución.

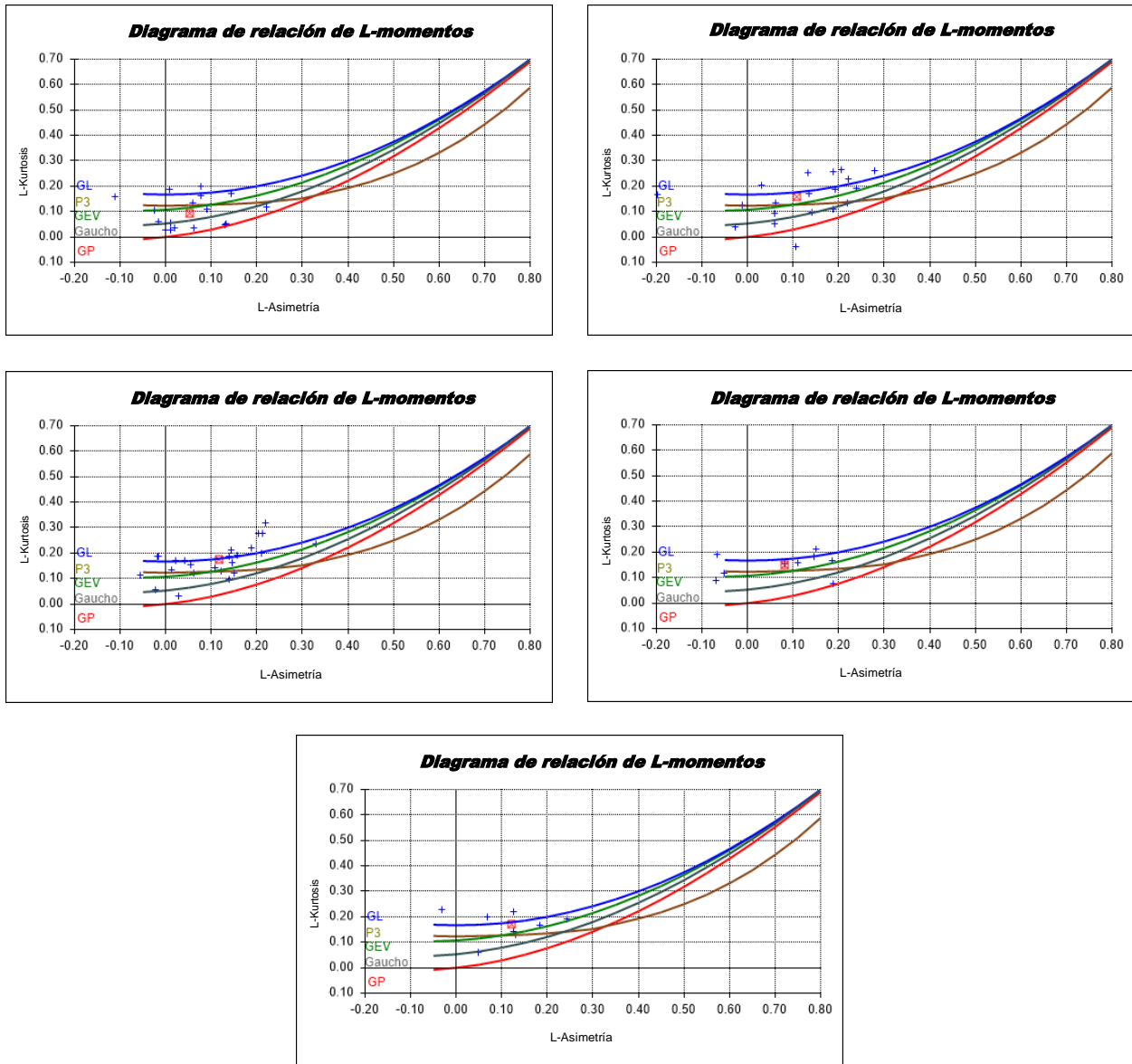
Las funciones de distribución de probabilidad (FDP) sugeridas por Hosking y Wallis, y empleadas en el software L-RAP son: Logística Generalizada (GLO), General de Valores Extremos (GEV), Generalizada Normal (GNO), Gaucho, Pearson Tipo III (PE3) y Generalizada de Pareto (GPA).

Lo primero es determinar cada uno de los L-momentos regionales, los cuales se muestran en la Tabla 4.4 para cada una de las regiones homogéneas.

**Tabla 4.4** L-momentos regionales. Elaboración propia.

<b>RH1</b>	<b>L-CV</b>	<b>L-ASIMETRÍA</b>	<b>L-KURTOSIS</b>
	0.237	0.053	0.097
<b>RH2</b>	<b>L-CV</b>	<b>L-ASIMETRÍA</b>	<b>L-KURTOSIS</b>
	0.221	0.102	0.156
<b>RH3</b>	<b>L-CV</b>	<b>L-ASIMETRÍA</b>	<b>L-KURTOSIS</b>
	0.197	0.108	0.169
<b>RH4</b>	<b>L-CV</b>	<b>L-ASIMETRÍA</b>	<b>L-KURTOSIS</b>
	0.205	0.077	0.148
<b>RH5</b>	<b>L-CV</b>	<b>L-ASIMETRÍA</b>	<b>L-KURTOSIS</b>
	0.165	0.113	0.165

En la Figura 4.13 se muestran los diagramas que relacionan los coeficientes de Asimetría vs Kurtosis, donde se puede apreciar una nube de puntos que corresponde al número de estaciones en la región y un valor central (punto rojo), que representa la coordenada dada por el L-Asimetría y L-Kurtosis regional; según su ubicación se infieren las posibles distribuciones de probabilidad que podrían ajustarse a los datos observados de las estaciones que conforman la región.



**Figura 4.13** Diagramas de relación de L-momentos de las regiones homogéneas (RH), RH1 lado superior izquierdo, RH2 lado superior derecho, RH3 medio izquierdo, RH4 medio derecho, RH5 parte inferior. Elaboración propia.

Según los diagramas de relación de L-momentos, los L-momentos regionales (punto rojo) se comportan de la siguiente manera: en las regiones 2, 3, 4 y 5 se localiza cerca de las distribuciones GLO y GEV; y en cuanto a la región 1, el valor medio se ubica entre las distribuciones GEV y Gaucho. Es decir que, el diagrama refleja un panorama inicial para encontrar las distribuciones que se ajustan aceptablemente a los datos, sin embargo, la decisión final no depende sólo del análisis del diagrama de los L-momentos.

Mediante la prueba de bondad de ajuste basada en el  $Z^{DIST}$ , se comprueba objetivamente cuando un conjunto de distribuciones se ajusta a los datos de manera correcta. El  $Z^{DIST}$  determina si la medida del L-Asimetría y L-Kurtosis simulados de una determinada región homogénea, se ajustan adecuadamente al L-Asimetría y L- Kurtosis de los datos observados.

La Tabla 4.5, muestra los valores obtenidos para el estadístico  $Z^{DIST}$  de cada región homogénea. En ella, se puede corroborar lo obtenido de las gráficas de relación de L-momentos, que no hay una única función de distribución que se ajuste a todas las regiones homogéneas, sin embargo, la función Logística Generalizada se ajusta a las RH2, 3, 4 y 5, mientras que la FDP Gaucho únicamente con la RH1. Esto es comprobable en la tabla, ya que los valores obtenidos para cada una de las regiones están por debajo de  $|1.64|$ , límite establecido por Hosking y Wallis.

**Tabla 4.5** Valores para  $Z^{DIST}$  por región homogénea. Elaboración propia.

FDP	GAUCHO	GEV	PE3	GNO	GPA	GLO
REGIÓN 1	<b>-1.58</b>	1.95	2.5	2.62	-5.13	5.68
REGIÓN 2	-4.88	-1.85	-2.04	-1.66	-8.02	<b>1.21</b>
REGIÓN 3	-5.74	-2.71	-3.03	-2.59	-8.88	<b>0.31</b>
REGIÓN 4	-3.29	<b>-1.16</b>	<b>-1.05</b>	<b>-0.89</b>	-5.46	<b>1.03</b>
REGIÓN 5	-3.08	<b>-1.33</b>	<b>-1.56</b>	<b>-1.28</b>	-4.89	<b>0.40</b>

Luego de identificar la FDP correspondiente a cada región se calcularon sus parámetros de ubicación, escala y forma, usando las relaciones sugeridas por Hosking y Wallis (1997) (ver Anexo A).

**Tabla 4.6.** Parámetros de la FDP Gaucho para la RH1 y de la FDP GLO para las RH 2, 3, 4 y 5. Elaboración propia.

RH1	UBICACIÓN	ESCALA	FORMA 1
	0.6745	0.6292	0.4408
RH2	UBICACIÓN	ESCALA	FORMA 1
	0.9606	0.2165	-0.1091
RH3	UBICACIÓN	ESCALA	FORMA 1
	0.9622	0.1922	-0.1176
RH4	UBICACIÓN	ESCALA	FORMA 1
	0.9722	0.2024	-0.08294
RH5	UBICACIÓN	ESCALA	FORMA 1
	0.9673	0.1607	-0.1217

Con los valores de estos parámetros que se muestran en la Tabla 4.6 y las funciones de distribución seleccionadas, se podrá realizar la estimación de cuantiles y posteriormente el análisis de los periodos secos dentro de la cuenca.

Como se mencionó desde un principio, una de las ventajas que mencionan los autores de este método (ARF-LM), es que no es necesario realizar un relleno de datos faltantes debido a que lo consideran un método robusto, ya que compensa la carencia de datos en el tiempo por su abundancia en el espacio. Por lo cual, se hicieron los pasos antes descritos hasta este punto que corresponden al control de calidad de los datos, generación de regiones homogéneas y selección de la función de distribución de mejor ajuste, esto con los datos crudos tomados de la página del Servicio Meteorológico Nacional. Los resultados de esta comparación se exponen a continuación.

#### 4.5.-Comparación del método de L-momentos con datos crudos vs rellenos

Como se expuso en el apartado 4.3.- *Identificación de regiones homogéneas*, se tomaron en cuenta los mismos criterios y la misma forma de dividir el área de estudio, lo cual para ambos casos (datos rellenos y datos crudos), las estaciones que conforman cada una de las 5 regiones homogéneas son las mismas, así como sus valores de discordancia (ver Tabla 4.2).

En la Tabla 4.7 se muestran los valores de H1 y precipitación media por RH, donde se puede observar que no hay una variación significativa entre estos valores, ya sea con datos rellenos o crudos.

**Tabla 4.7** Comparación entre datos rellenos y datos crudos, en sus valores de H1 y PMA por región homogénea.  
Elaboración propia.

VALORES CON DATOS RELLENADOS			VALORES CON DATOS CRUDOS		
REGIÓN	PMA	H1	REGIÓN	PMA	H1
1	256.9	1.23	1	256.9	1.28
2	368.8	1.39	2	368.8	1.25
3	526.3	0.94	3	526.3	1.03
4	675.8	1.92	4	675.8	1.96
5	910.6	-0.63	5	910.6	-0.51

Por otra parte, respecto a los diagramas de relación de L-momentos para cada región, así como las gráficas de L-CV vs L-Asimetría de las regiones homogéneas, son idénticos (ver Figuras 4.12 y 4.13).

En cuanto a la elección de la FDP de mejor ajuste, considerando el criterio para  $Z^{\text{DIST}}$ , nuevamente se puede observar una ligera variación en estos valores, pero al final indican las mismas FDP tanto para los datos crudos como para los rellenados, como se aprecia en la Tabla 4.8. No hay una sola FDP que coincida con todas las RH, sin embargo, se puede ver que las regiones 2, 3, 4 y 5 coinciden con la FDP Logística Generalizada (GLO), mientras que la región 1 únicamente lo hace con la FDP Gaucho.

**Tabla 4.8.** Comparación entre datos rellenados y datos crudos, para los valores de  $Z^{\text{DIST}}$  por región homogénea.

Elaboración propia.

VALORES CON DATOS RELLENADOS						
FDP	GAUCHO	GEV	PE3	GNO	GPA	GLO
REGIÓN 1	<b>-1.58</b>	1.95	2.5	2.62	-5.13	5.68
REGIÓN 2	-4.88	-1.85	-2.04	-1.66	-8.02	<b>1.21</b>
REGIÓN 3	-5.74	-2.71	-3.03	-2.59	-8.88	<b>0.31</b>
REGIÓN 4	-3.29	<b>-1.16</b>	<b>-1.05</b>	<b>-0.89</b>	-5.46	<b>1.03</b>
REGIÓN 5	-3.08	<b>-1.33</b>	<b>-1.56</b>	<b>-1.28</b>	-4.89	<b>0.40</b>

VALORES CON DATOS CRUDOS						
FDP	GAUCHO	GEV	PE3	GNO	GPA	GLO
REGIÓN 1	<b>-1.64</b>	2.02	2.59	2.72	-5.32	5.89
REGIÓN 2	-4.84	-1.87	-2.06	-1.68	-7.90	<b>1.12</b>
REGIÓN 3	-5.93	-2.81	-3.14	-2.68	-9.17	<b>0.31</b>
REGIÓN 4	-3.24	<b>-1.12</b>	<b>-1.01</b>	<b>-0.85</b>	-5.41	<b>1.07</b>
REGIÓN 5	-3.05	<b>-1.29</b>	<b>-1.52</b>	<b>-1.24</b>	-4.88	<b>0.45</b>

Como se mencionó, no existe una diferencia significativa entre los puntos expuestos en este apartado (identificación de regiones homogéneas y elección de la FDP de mejor ajuste), sin embargo muestran mejores valores en cuanto a  $H1$  y  $Z^{\text{DIST}}$  los datos rellenados que los datos crudos, esta ligera diferencia permite darse cuenta por lo menos con el uso de la paquetería Climatol, que la metodología del ARF-LM como sugieren sus autores es un método que puede abstenerse de hacer el rellenado previo de datos faltantes, como se tiene que hacer de manera obligatoria con otros métodos de análisis relacionados a sequías.

Por lo observado en esta comparación, no cabe duda que es una gran ventaja contar con esta herramienta, ya que la principal desventaja de hacer estos análisis es la falta de series completas continuas dentro de las áreas de estudio.

#### 4.6.- Estimación de cuantiles

Con las FDP seleccionadas, se estimaron los cuantiles 0.002, 0.005, 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 0.95, 0.96, 0.98, 0.99, 0.995, 0.998 y 0.999 para cada una de las regiones homogéneas (Tabla 4.9), generando así las curvas de crecimiento regional (Figura 4.14).

Tabla 4.9 Cuantiles por región homogénea. Elaboración propia.

	F(x)	0.005	0.01	0.02	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.95	0.96	0.98	0.99
RH-1	GAUCHO	0.23	0.25	0.29	0.37	0.46	0.61	0.74	0.86	0.97	1.1	1.23	1.38	1.58	1.72	1.75	1.85	1.91
RH-2	GEN. LOGISTIC	0.09	0.18	0.27	0.42	0.54	0.68	0.79	0.87	0.96	1.05	1.15	1.28	1.5	1.71	1.78	2.01	2.25
RH-3	GEN. LOGISTIC	0.21	0.28	0.36	0.48	0.59	0.72	0.81	0.89	0.96	1.04	1.13	1.25	1.44	1.64	1.7	1.91	2.13
RH-4	GEN. LOGISTIC	0.1	0.2	0.3	0.44	0.57	0.71	0.81	0.89	0.97	1.06	1.15	1.27	1.46	1.65	1.71	1.9	2.1
RH-5	GEN. LOGISTIC	0.34	0.4	0.47	0.57	0.66	0.76	0.84	0.9	0.97	1.03	1.11	1.21	1.37	1.54	1.59	1.77	1.96

Los cuantiles 0.005, 0.01, 0.02 y 0.05 están asociados a la presencia de eventos pluviométricos más secos con periodos de retorno de 200, 100, 50 y 20 años respectivamente.

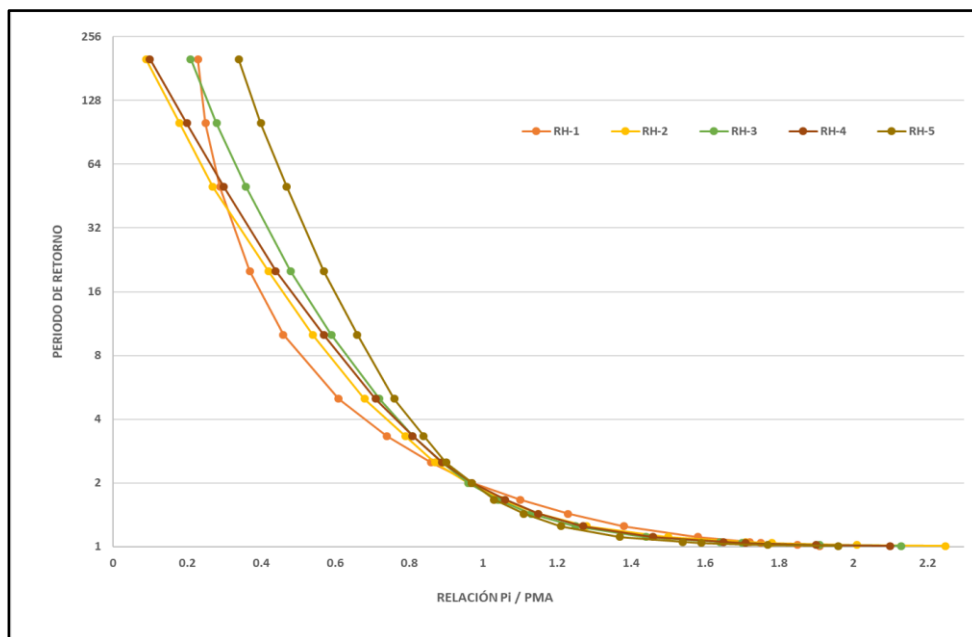
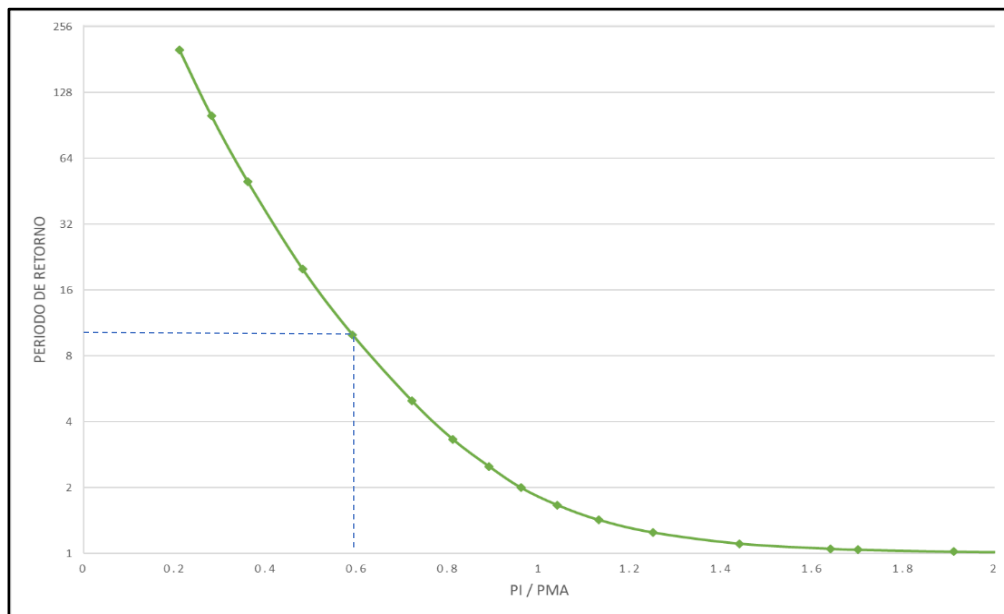


Figura 4.14 Curvas de crecimiento regional por región homogénea. Elaboración propia.

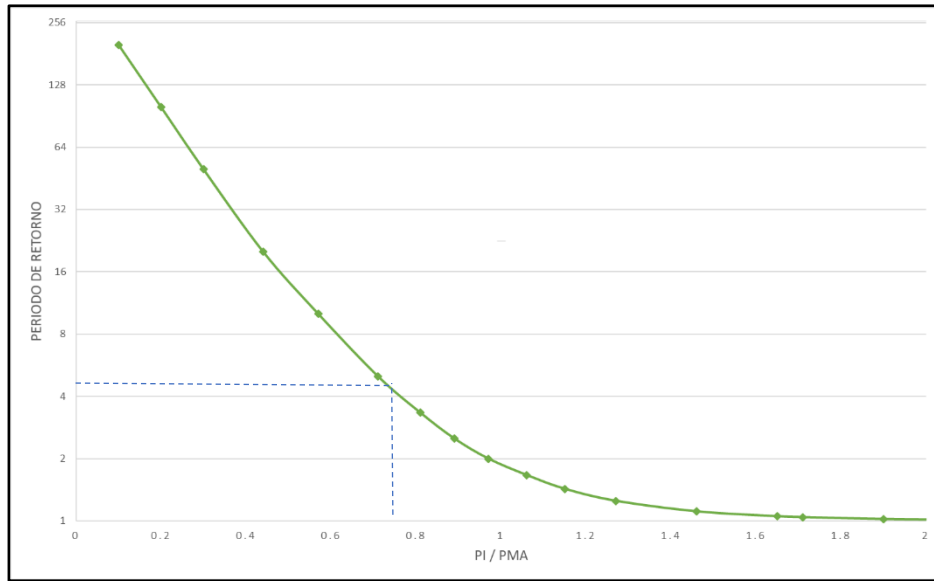


A continuación, se presentan 2 ejemplos del uso de las curvas de crecimiento regional. Tomando para la prueba la estación 5148 (Potrero de Abrego) y esperando una precipitación correspondiente al 60% de su PMA, lo primero que se tiene que hacer es identificar la región homogénea a la que pertenece (RH3) de la cual se toma la curva de crecimiento regional (Figura 4.15), lo siguiente es determinar la relación  $P_i/PMA$  ( $60\% / 100\% = 0.6$ ), esta relación será la que se utilice en la curva de crecimiento regional para determinar el periodo de recurrencia de un evento con estas características. Con lo que se concluye que en la estación 5148 (Potrero de Abrego), el periodo de retorno de un año cuya precipitación sea del 60% la precipitación media anual es de 10 años aproximadamente.



**Figura 4.15** Determinación de la probabilidad de ocurrencia de un año con una precipitación igual al 60% de su PMA en la RH3. Elaboración propia.

Para el caso de querer determinar la probabilidad de ocurrencia de una precipitación en específico, en este ejemplo de 500 mm/año en la estación 19002 (Agua blanca). Siguiendo los pasos como en el ejemplo anterior, se identifica que la estación pertenece a la RH4, determinando la relación de  $P_i/PMA$  ( $(500 \text{ mm/año}) / (675.8 \text{ mm/año}) = 0.74$ ). Utilizando esta información con la curva de crecimiento regional de la RH4 (Figura 4.16) nos indica que este evento puede tener un periodo de retorno de 4.5 años aproximadamente.



**Figura 4.16** Determinación de la probabilidad de ocurrencia de un año con una precipitación igual 500 mm en la RH4.  
Elaboración propia.

Por otra parte, el empleo de los cuantiles junto con los L-momentos y los parámetros de las FDP seleccionadas, pueden ser utilizados para determinar de mejor manera la probabilidad de no excedencia de precipitación respecto a la media anual para diferentes periodos de retorno.

De acuerdo con la Tabla 4.10, para un periodo de retorno de 20 años se espera en la región 1 por lo menos un evento tan bajo como 94.78 mm de la precipitación media anual, para el mismo periodo de retorno se espera en la región 5 por lo menos un evento tan bajo como 518.70 mm de la precipitación media anual. Considerando este periodo a 20 años podemos notar en la Tabla 4.11 que la región 1 tendría un déficit respecto a su media anual de más del 60%, las regiones 2, 3 y 4 rondarían en un rango del 50 al 60% de déficit, mientras que para la región homogénea No. 5 se presentaría el valor más bajo de toda la cuenca con aproximadamente un 40% de déficit.

**Tabla 4.10** L-momentos y parámetros para cada región homogénea, y la Pi para diferentes periodos de retorno.

Elaboración propia.

RH	PMA	FDP	Parámetros de FDP				Periodos de retorno (Precipitación mm)					
			Ubicación	Escala	Forma (k)	Forma (h)	Tr 5	Tr 10	Tr 15	Tr 20	Tr 50	Tr 100
1	256.9	GAUCHO	0.6745	0.6292	0.4408	0.5	156.69	119.03	103.65	94.78	74.59	64.82
2	368.8	GLO	0.9606	0.2165	-0.1091	-----	251.54	198.27	171.21	153.19	101.07	65.72
3	526.3	GLO	0.9622	0.1922	-0.1176	-----	377.01	310.54	276.94	254.66	190.51	147.31
4	675.8	GLO	0.9722	0.2024	-0.08294	-----	477.89	382.27	332.87	299.67	202.05	134.39
5	910.6	GLO	0.9673	0.1607	-0.1217	-----	694.15	598.70	550.57	518.70	427.20	365.77

**Tabla 4.11** Porcentajes de déficit de Pi para cada región homogénea en diferentes periodos de retorno. Elaboración propia.

RH	Periodos de retorno (Porcentaje de precipitación esperada)					
	Tr 5	Tr 10	Tr 15	Tr 20	Tr 50	Tr 100
1	39.01	53.67	59.65	63.11	70.96	74.77
2	31.79	46.24	53.58	58.46	72.59	82.18
3	28.37	41.00	47.38	51.61	63.80	72.01
4	29.29	43.43	50.74	55.66	70.10	80.11
5	23.77	34.25	39.54	43.04	53.09	59.83

Como se puede observar en las Tablas 4.10 y 4.11, los episodios de sequía se acentúan con mayor intensidad con el paso del tiempo y afectan en mayor grado las regiones con niveles de precipitación media anual menores. Obteniéndose valores de déficit de 31.79 para un Tr 5 hasta 82.18 para un Tr 100 en la RH2, mientras que para la RH5 en los mismos periodos de retorno los valores de déficit oscilan de 23.77 a 59.83.

Lo anterior considerando únicamente los valores obtenidos por región homogénea, sin embargo, en esta parte se determinaron los parámetros de cada una de las estaciones de acuerdo a las FDP que le corresponde, por lo que ahora además de afectar a todas las estaciones dentro de la misma RH se podrá hacer con sus propios parámetros de ubicación, escala y forma. Además, que el software utilizado proporciona esta información y los L-momentos para cada una de las estaciones analizadas, con lo que se estimaron los cuantiles por estación y posteriormente la precipitación media anual esperada, aplicando los mismos periodos de retorno que para las regiones homogéneas.

Con los datos de la Tabla 4.12 y sustituyendo dentro de la FDP Logística Generalizada (ver Anexo B) para cada una de las estaciones, se obtienen los valores de los cuantiles deseados. Para finalmente multiplicar este valor por la PMA de cada uno de los puntos, y así obtener un valor para una precipitación esperada en los diferentes periodos de retorno. Estos cálculos se realizaron en una hoja de cálculo en Excel en donde se sustituyeron los valores de las funciones de probabilidad de mejor ajuste por estación y del que se muestra un ejemplo a continuación.

**Tabla 4.12** L-momentos y parámetros de la FDP GLO, que corresponden a las estaciones de la RH5. Elaboración propia.

REGIÓN HOMÓGENEA No. 5							
Estación	Media	L-CV	L-SKEW	L-KURT	Ubicación	Escala	Forma
19003	1026.77	0.1585	0.0494	0.0584	0.9871	0.1579	-0.0494
19007	880.88	0.1388	0.0688	0.1955	0.9843	0.1377	-0.0688
19146	874	0.1769	0.1262	0.1393	0.9636	0.1723	-0.1262
19015	997.98	0.1474	0.1851	0.1646	0.9559	0.1392	-0.1851
19069	1054.19	0.1546	0.244	0.1909	0.9397	0.1399	-0.244
19031	793.9	0.1601	-0.0297	0.2251	1.0078	0.1599	0.0297
19048	866.71	0.1809	0.132	0.1268	0.9611	0.1758	-0.132
19173	790.65	0.2001	0.1281	0.2193	0.9582	0.1947	-0.1281

$$x(F) = \xi + (\alpha / k) * (1 - ((1 - F(x)) / (F(x))) ^ k \quad (24)$$

$$x(F) = 0.9871 + (0.1579 / -0.0494) * (1 - ((1 - 0.05) / (0.05)) ^ -0.0494 \quad (25)$$

$$x(F) = 0.55 \quad (26)$$

$$\text{Tr } 10 = x(F) * \text{Media} \quad (27)$$

$$\text{Tr } 10 = 569.25 \text{ mm / año} \quad (28)$$

El ejemplo mostrado pertenece a la estación 19003 ubicada en la RH5 que corresponde con la FDP Logística Generalizada.

Donde:

$\xi$ : valor de ubicación para la estación

$\alpha$ : valor de escala para la estación

$k$ : valor de forma para la estación

$(x)F$ : probabilidad de no excedencia

Tr 10: valor esperado de precipitación para un periodo de retorno de 10 años

El uso de la hoja de cálculo permitió generar una fórmula para sustituir con los valores de las diferentes estaciones, y así obtener los valores de precipitación que serán utilizados como base para la generación de mapas, concentrando estos valores por región homogénea como se muestra en la Tabla 4.13.

**Tabla 4.13** Cuantiles y periodos de retorno que corresponden a las estaciones de la RH5. Elaboración propia.

R E G I Ó N H O M O G E N E A N o . 5													
Estación	Media	Cuantil						Periodos de retorno (Precipitación mm)					
		0.2	0.1	0.0667	0.05	0.02	0.01	Tr 5	Tr 10	Tr 15	Tr 20	Tr 50	Tr 100
19003	1026.77	0.78	0.66	0.60	0.55	0.43	0.34	796.29	675.95	612.46	569.25	439.50	347.04
19007	880.88	0.80	0.70	0.65	0.62	0.51	0.44	706.67	619.70	574.37	543.75	452.90	389.19
19146	874	0.74	0.63	0.58	0.54	0.43	0.36	650.67	553.22	504.23	471.84	379.11	317.09
19015	997.98	0.79	0.70	0.67	0.64	0.57	0.53	784.11	703.18	663.98	638.63	568.64	524.06
19069	1054.19	0.78	0.70	0.67	0.65	0.59	0.55	817.16	739.79	703.69	680.86	620.04	583.17
19031	793.9	0.78	0.64	0.57	0.52	0.35	0.22	620.44	511.86	451.67	409.48	276.36	175.09
19048	866.71	0.74	0.63	0.57	0.53	0.43	0.36	639.97	542.39	493.51	461.26	369.27	308.05
19173	790.65	0.71	0.59	0.52	0.48	0.36	0.28	562.07	462.79	412.95	380.01	285.83	222.94

#### 4.6.- Análisis de periodos secos

De la generación de cuantiles, se seleccionó el correspondiente al 50% de déficit de precipitación (0.5), para hacer un análisis en cada una de las estaciones e identificar aquellos periodos secos que se han presentado dentro de la cuenca durante el periodo de estudio (1984-2013) y así determinar la frecuencia y duración promedio de dichos eventos en las regiones.

Para este procedimiento se creó un archivo en Excel donde para cada una de las estaciones analizadas, así como una para cada RH se generó una hoja de cálculo para su análisis, las tablas generadas para cada una de las regiones homogéneas se muestran en el Anexo C.

Como se aprecia en la Tabla 4.14, se enlistaron los 30 años estudiados junto a la precipitación media anual ocurrida en cada uno de ellos. Para obtener el umbral que serviría de referencia a la hora de obtener el tipo de periodo (seco o húmedo) ocurrido durante ese año, se decidió considerar la mediana de la serie completa con respecto al cuantil de 0.5 respecto a cada región homogénea.

$$M * C (0.5) = \text{Umbral} \quad (29)$$

$$259.45 * 0.97 = 251.67 \quad (30)$$

Donde:

M: Mediana de la RH o estación a analizar.

C (0.5): Cuantil correspondiente al 50% de probabilidad de no excedencia.

De esta manera al comparar la PMA con el umbral correspondiente, se obtiene una diferencia que puede ser positiva o negativa, lo cual señala la presencia de los periodos secos o húmedos presentes a lo largo del registro.

**Tabla 4.14** Ejemplo de los datos utilizados para determinar los periodos secos (S-Amarillo) y húmedos (H-Azul).

Elaboración propia.

<b>AÑOS SECOS Y HÚMEDOS DE LA RH - 1</b>				
<b>Año</b>	<b>Precipitación</b>	<b>Umbral</b>	<b>Diferencia</b>	<b>S / H</b>
1984	290.24	251.67	51.13	H
1985	319.21	251.67	82.12	H
1986	342.26	251.67	102.28	H
1987	337.48	251.67	69.09	H
1988	314.94	251.67	43.94	H
1989	182.44	251.67	-77.41	S
1990	318.16	251.67	44.90	H
1991	281.00	251.67	33.45	H
1992	265.86	251.67	18.37	H
1993	241.56	251.67	-3.65	S
1994	174.29	251.67	-75.69	S
1995	168.24	251.67	-90.30	S
1996	211.48	251.67	-32.52	S
1997	304.96	251.67	57.28	H
1998	178.62	251.67	-74.02	S
1999	143.24	251.67	-105.62	S
2000	227.19	251.67	-3.22	S
2001	188.40	251.67	-58.32	S
2002	238.40	251.67	-15.42	S
2003	297.54	251.67	39.30	H
2004	396.18	251.67	145.28	H
2005	217.31	251.67	-28.53	S
2006	253.05	251.67	-3.41	S
2007	310.78	251.67	46.98	H
2008	309.12	251.67	63.30	H
2009	226.92	251.67	-13.28	S
2010	355.64	251.67	109.32	H
2011	106.19	251.67	-130.35	S
2012	187.26	251.67	-48.53	S
2013	323.32	251.67	76.43	H

En la Tabla 4.15 se registraron los periodos secos que se presentaron por RH, junto a su duración, periodo en que se presentó, la ocurrencia entre dichos eventos, así como su déficit

acumulado e intensidad. La fila resaltada con color naranja es aquella que presenta el periodo seco con un mayor déficit acumulado a lo largo de los años registrados.

**Tabla 4.15** Periodos secos registrados en la RH1. Elaboración propia.

PERIODOS SECOS DE LA RH1					
Periodo seco	Duración años	Periodo	Periodicidad años	Déficit acum (mm)	Intensidad mm / año
1	1	1989 - 1989		77.41	77.41
2	4	1993 - 1996	4	202.17	50.54
3	5	1998 - 2002	5	256.61	51.32
4	2	2005 - 2006	7	31.94	15.97
5	1	2009 - 2009	4	13.28	13.28
6	2	2011 - 2012	2	178.88	89.44
Media	2.50		4.40	126.72	49.66
Desv. Est.	1.64		1.82	99.57	31.03
Cv	0.66		0.41	0.79	0.62

Como se mencionó, este procedimiento se realizó para cada una de las estaciones dentro de las cinco diferentes regiones homogéneas. Para posteriormente concentrar los periodos secos que más afectaron en cada una de ellas y así obtener las características principales de cada RH, como se muestra en la Tabla 4.16.

**Tabla 4.16** Características de los periodos secos registrados en la RH1. Elaboración propia.

CARACTERÍSTICAS DE LOS PERIODOS SECOS DE LA REGIÓN No. 1								
Estación		Número de años con registro	Periodos de sequías		Periodo de sequía más larga		Años secos	
Clave	Nombre		Duración promedio (años)	Periodicidad promedio (años)	Periodo	Duración (años)	Año más seco	% respecto a la media
5151	ALTO DE NORIAS	30	1.86	4.50	1998 - 2002	5	2011	32.4
5152	BAJAN	30	1.75	3.86	1994 - 1999	3	1999	3.6
19165	CHUPADEROS DEL INDIO	30	2.50	5.00	1990 - 1996	7	1998	38.4
8247	COYAME (DGE)	30	2.50	4.40	1998 - 2003	6	1989	21.7
5044	CUATRO CIENEGAS (SMN)	30	1.86	4.00	1994 - 1996	3	2011	32.9
5011	EJIDO REATA	30	1.71	3.67	1996 - 1999	4	1998	28.6
5013	EJIDO SAN MIGUEL	30	2.00	4.40	1994 - 1996	3	2011	25.3
5158	EL TANQUITO	30	1.75	3.86	2001 - 2003	3	1989	33.9
8270	LA MESA	30	2.33	4.80	1996 - 2001	6	1993	7.7
8049	LUIS L. LEON	30	1.86	3.67	1992 - 1995	4	2011	19.4
5022	OCAMPO	30	2.50	5.60	1999 - 2003	5	1999	30.2
8254	OJINAGA (DGE)	30	2.33	4.20	2009 - 2012	4	2011	35.4
8202	PRESA FRANCISCO I. MADERO	30	2.00	3.83	1993 - 1995	3	2011	50.2
5140	RAMOS ARIZPE (DGE)	30	2.00	9.00	1998 - 2000	3	2000	8.1
19054	RINCONADA	30	2.33	4.40	1994 - 1996	3	2011	24.0
5164	SAN FRANCISCO NADADORES	30	2.00	4.50	1998 - 2002	5	2011	25.3
5038	SANTA TERESA	30	2.60	4.75	1992 - 1996	5	2012	5.9
TODAS		30	2.50	4.40	1998 - 2002	5	2011	41.3

Con ayuda de esta información, se puede concluir que dentro de la cuenca del río Bravo se presentan eventos de sequía con duración promedio entre 1.75-2.5 años y con una periodicidad promedio de 3.86-4.50 años. También se observó que los principales periodos secos presentes en

las regiones homogéneas 2, 3 y 4, corresponden al periodo 2011-2012 como el de menor lamina disponible respecto a la media después de dicho evento.

Con ayuda de estas tablas de características de periodos secos por RH, se procedió a determinar los diferentes grados de sequía presentes en estos periodos a lo largo de la cuenca del río Bravo. Por lo cual, se propuso una clasificación del grado de sequía de acuerdo a quintiles (Tabla 4.17).

**Tabla 4.17** Propuesta basada en quintiles para la clasificación del grado de sequía. Elaboración propia.

<i>% déficit respecto a la media</i>	<i>Grado de sequía</i>
≤ 20	LIGERA
> 20 - 40	MODERADA
> 40 - 60	SEVERA
> 60 - 80	EXTREMA
> 80	EXCEPCIONAL

Para este análisis se consideró a la lámina disponible ante el déficit por periodo seco, la cual es comparada respecto a la media de la región homogénea para así asignarle algún grado de sequía.

**Tabla 4.18** Periodos secos y grados de sequía por región homogénea. Elaboración propia.

<b>R H 1</b>	<i>Periodos secos</i>	<i>Déficit acum. (mm)</i>	<i>Intensidad (mm / año)</i>	<i>Lamina disp. ante déficit (mm)</i>	<i>% déficit respecto a la media</i>	<i>Grado de sequía</i>
	1989 - 1989	77.41	77.41	179.63	30.12	MODERADA
	1993 - 1996	202.17	50.54	54.88	78.65	EXTREMA
	1998 - 2002	256.61	51.32	0.43	99.83	EXCEPCIONAL
	2005 - 2006	31.94	15.97	225.10	12.43	LIGERA
	2009 - 2009	13.28	13.28	243.76	5.17	LIGERA
	2011 - 2012	178.88	89.44	78.16	69.59	EXTREMA

<b>R H 2</b>	<i>Periodos secos</i>	<i>Déficit acum. (mm)</i>	<i>Intensidad (mm / año)</i>	<i>Lamina disp. ante déficit (mm)</i>	<i>% déficit respecto a la media</i>	<i>Grado de sequía</i>
	1984 - 1984	5.24	5.24	363.72	1.42	LIGERA
	1989 - 1989	88.64	88.64	280.32	24.02	MODERADA
	1993 - 1996	231.13	57.78	137.83	62.64	EXTREMA
	1998 - 2001	211.91	52.98	157.05	57.43	SEVERA
	2006 - 2006	2.39	2.39	366.57	0.65	LIGERA
	2009 - 2009	69.84	69.84	299.12	18.93	LIGERA
2011 - 2012	301.42	150.71	67.54	81.70	EXCEPCIONAL	



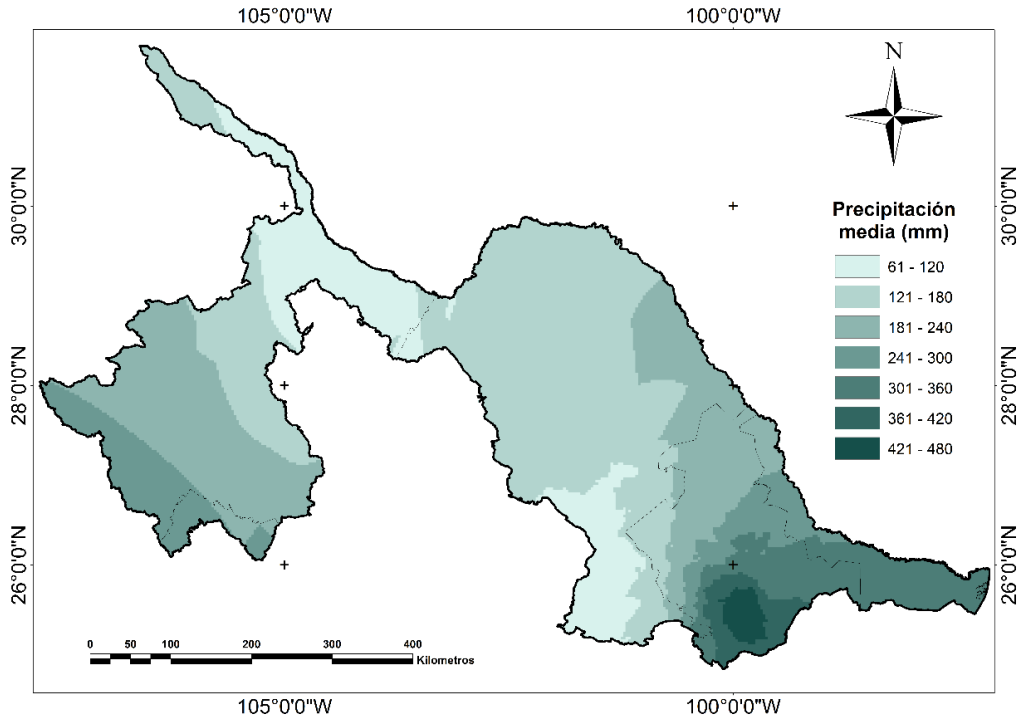
<b>R H 3</b>	<b>Periodos secos</b>	<b>Déficit acum. (mm)</b>	<b>Intensidad (mm / año)</b>	<b>Lamina disp. ante déficit (mm)</b>	<b>% déficit respecto a la media</b>	<b>Grado de sequía</b>
	1989 - 1989	114.34	114.34	412.02	21.72	MODERADA
	1991 - 1991	26.16	26.16	500.20	4.97	LIGERA
	1994 - 1996	294.41	98.14	231.94	55.93	SEVERA
	1998 - 2001	286.10	71.53	240.25	54.36	SEVERA
	2009 - 2009	104.67	104.67	421.68	19.89	LIGERA
	2011 - 2012	404.24	202.12	122.11	76.80	EXTREMA

<b>R H 4</b>	<b>Periodos secos</b>	<b>Déficit acum. (mm)</b>	<b>Intensidad (mm / año)</b>	<b>Lamina disp. ante déficit (mm)</b>	<b>% déficit respecto a la media</b>	<b>Grado de sequía</b>
	1989 - 1991	264.54	88.18	411.28	39.14	MODERADA
	1993 - 1996	385.64	96.41	290.18	57.06	SEVERA
	1998 - 2000	150.23	50.08	525.59	22.23	MODERADA
	2006 - 2006	27.21	27.21	648.61	4.03	LIGERA
	2009 - 2009	57.48	57.48	618.33	8.51	LIGERA
	2011 - 2012	410.47	205.23	265.35	60.74	EXTREMA

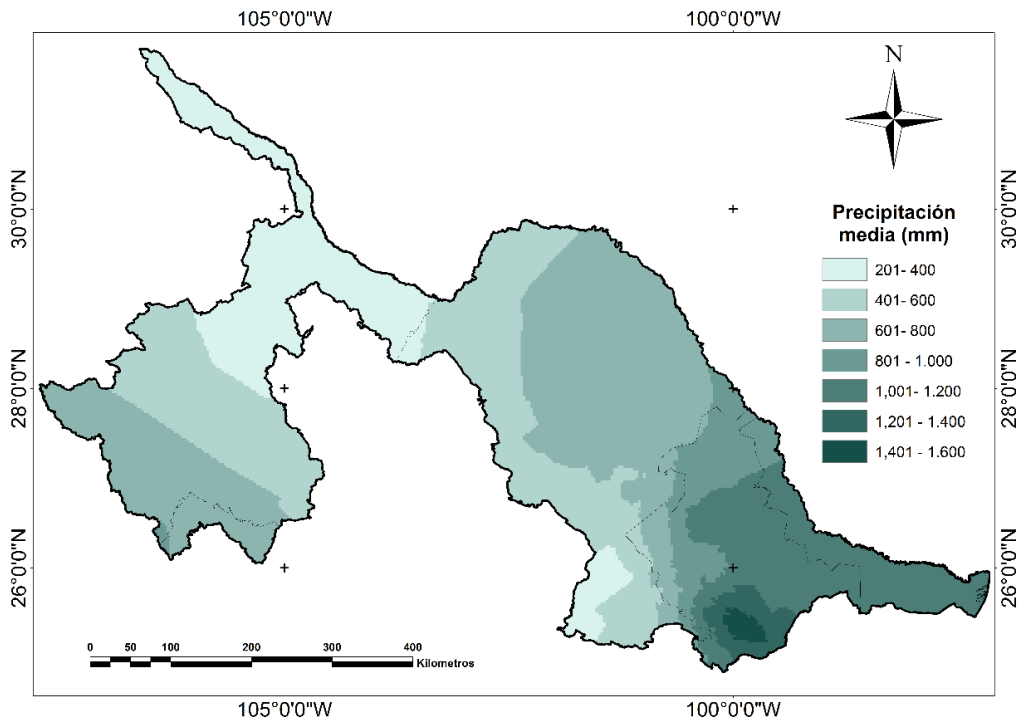
<b>R H 5</b>	<b>Periodos secos</b>	<b>Déficit acum. (mm)</b>	<b>Intensidad (mm / año)</b>	<b>Lamina disp. ante déficit (mm)</b>	<b>% déficit respecto a la media</b>	<b>Grado de sequía</b>
	1984 - 1985	128.41	64.20	782.23	14.10	LIGERA
	1989 - 1989	105.83	105.83	804.81	11.62	LIGERA
	1991 - 1991	6.33	6.33	904.31	0.69	LIGERA
	1994 - 1994	87.85	87.85	822.78	9.65	LIGERA
	1996 - 2000	503.22	100.64	407.42	55.26	SEVERA
	2006 - 2006	101.10	101.10	809.53	11.10	LIGERA
	2009 - 2009	105.55	105.55	805.08	11.59	LIGERA
	2011 - 2012	467.97	233.98	442.67	51.39	SEVERA

Al analizar el grupo de tablas de la Tabla 4.18, se verifica que el periodo 2011-2012 considerado en otras publicaciones como uno de los eventos de sequía más severos de los últimos años, se encuentra presente en este estudio, inclusive considerando al año 2011 en muchas de las estaciones como uno de los años con mayor déficit en precipitación. También se observa como la RH5 ha presentado grados de sequía de ligera a severa únicamente, en comparación con las demás RH que han presentado grados de sequía superiores.

De acuerdo a los datos de precipitación media anual registrados de todas las estaciones, se determinó el año en que la precipitación fue menor dentro del periodo estudiado (1984-2013) así como el año en que se presentó la mayor precipitación. A continuación, se muestran mapas generados con esta información.



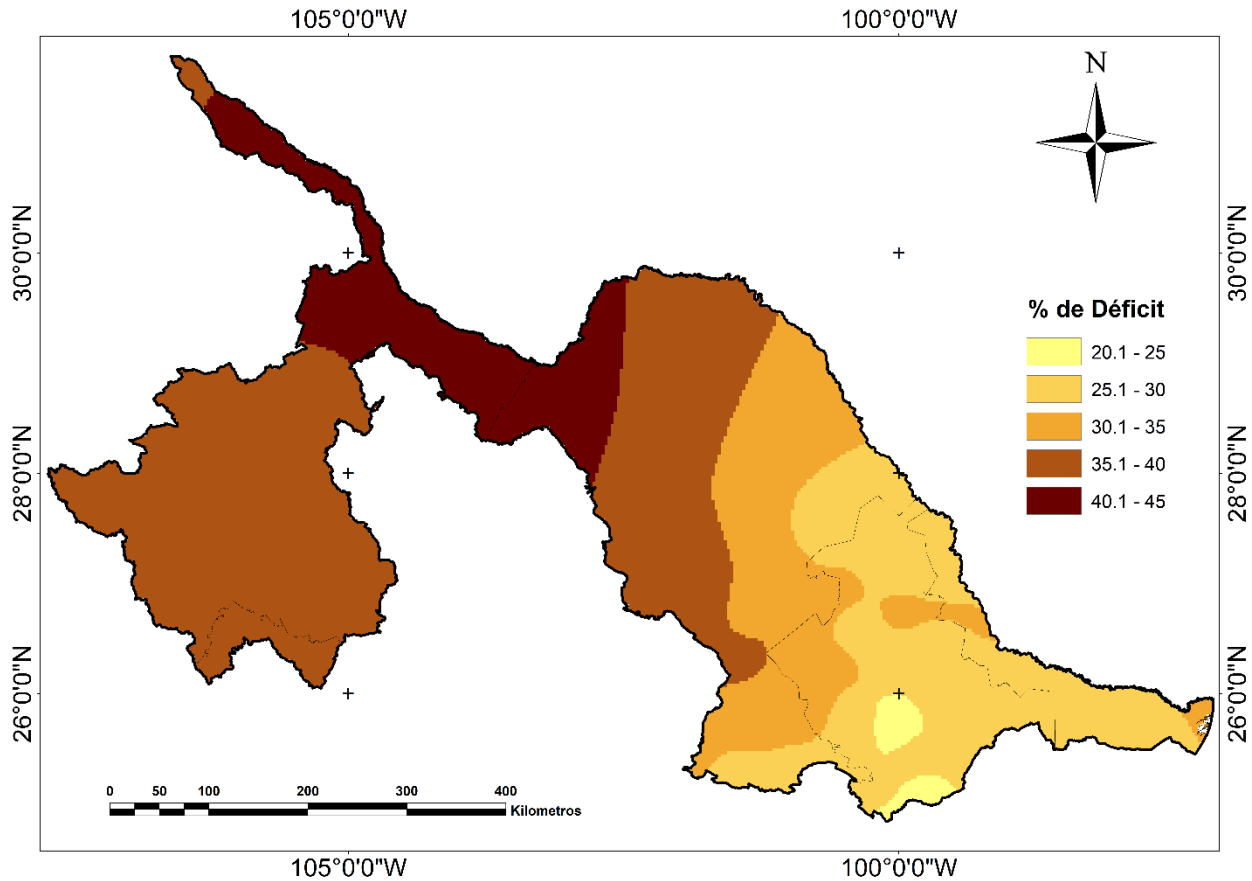
**Figura 4.17** Mapa que muestra la precipitación media para el año 2011, el más seco del periodo estudiado.  
Elaboración propia.



**Figura 4.18** Mapa que muestra la precipitación media para el año 2010, el más húmedo del periodo estudiado.  
Elaboración propia.

## 4.7.- Mapeo

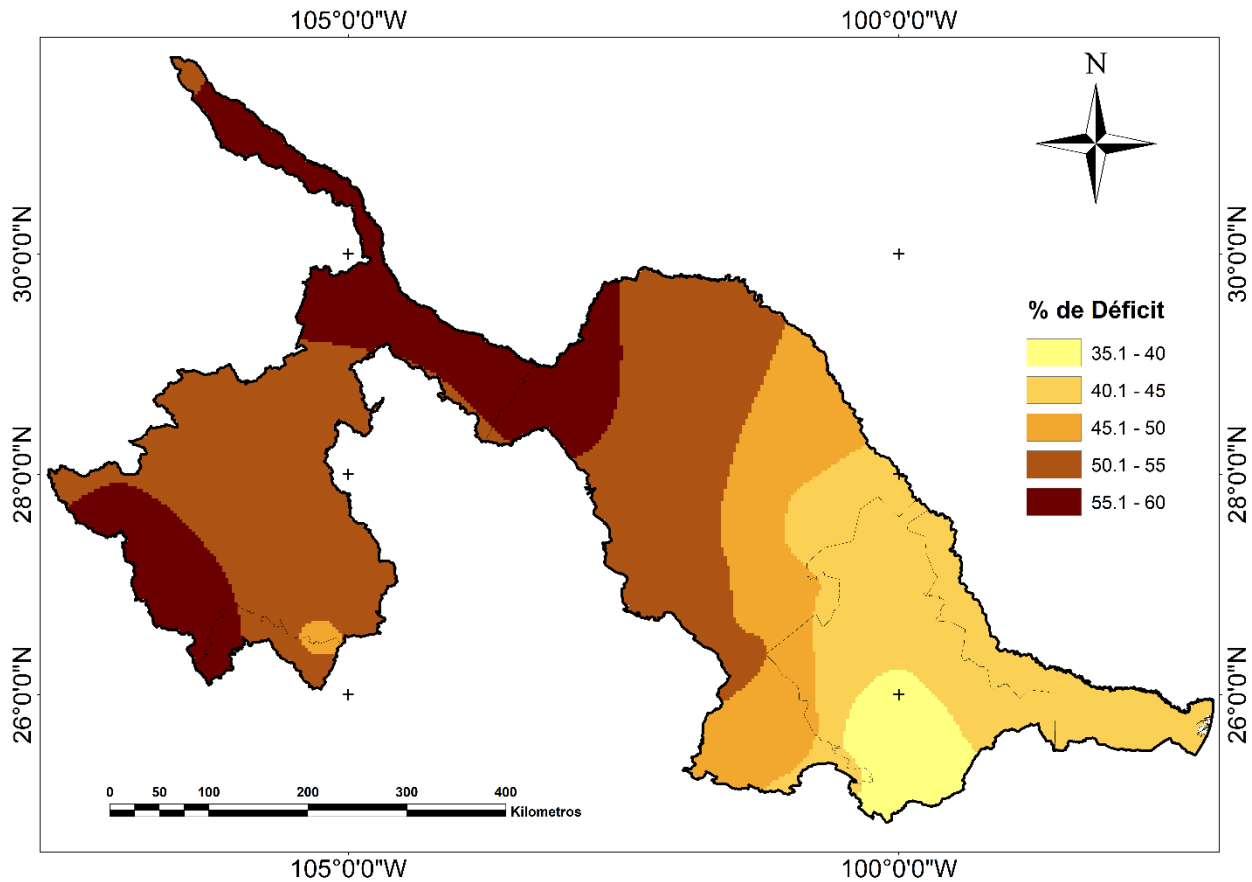
Para una mejor comprensión e interpretación de la magnitud y, distribución espacio-temporal de la sequía meteorológica asociada a diferentes periodos de retorno (5, 10, 15, 20, 50 y 100 años), se generaron mapas de déficit de precipitación por cada periodo de retorno en la cuenca del río Bravo, México, con ayuda del programa ArcGis mediante interpolación Kriging.



**Figura 4.19** Mapa del porcentaje de déficit de precipitación para un periodo de retorno de 5 años. Elaboración propia.

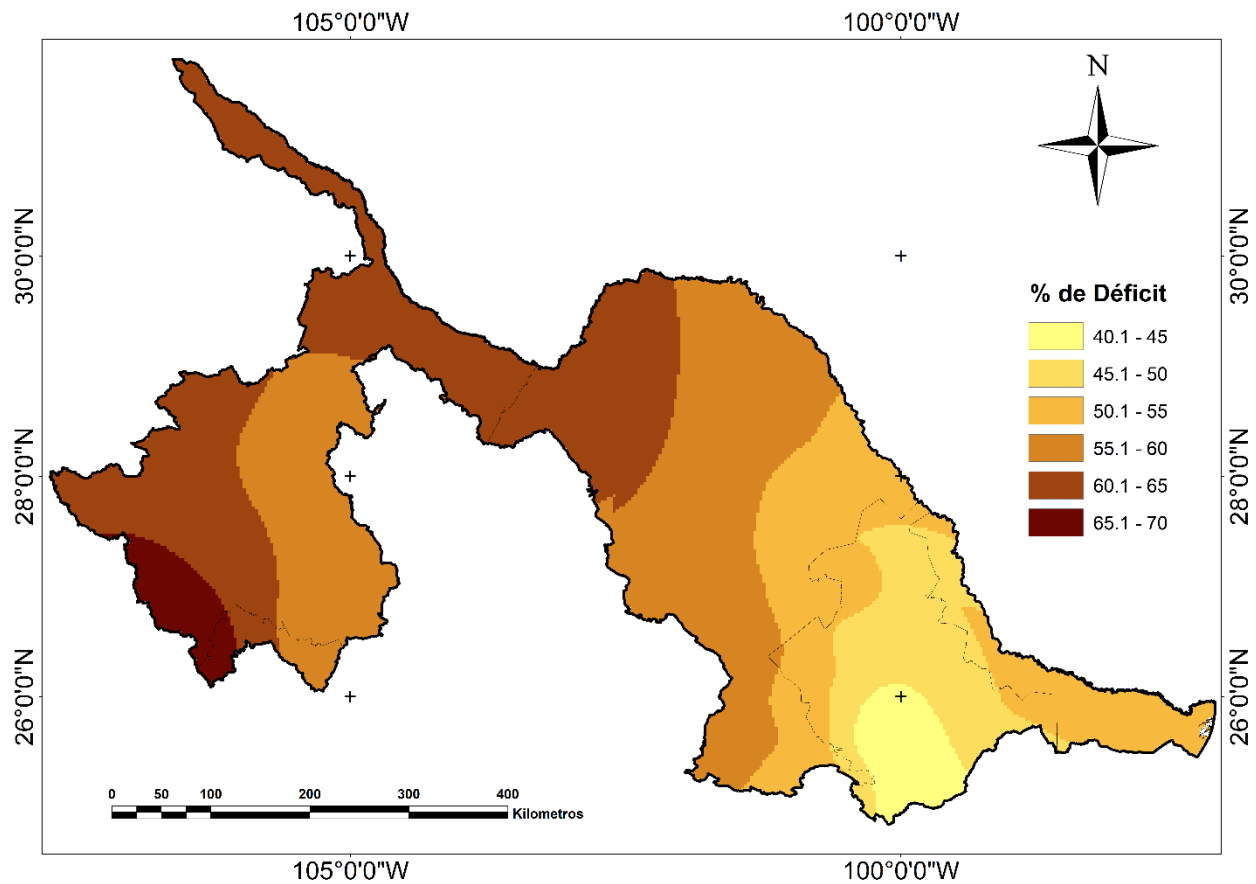
Para un periodo de retorno de 5 años dentro de la cuenca (Figura 4.19), se aprecia una disminución significativa de la precipitación que va de 30.1-45% de déficit lo cual indicaría sequías de moderadas a severas en la parte centro y oeste de la cuenca. Mientras que el área que corresponde a gran parte de los estados de Nuevo León y Tamaulipas presentaría sequías de grado moderado, mostrando que la parte baja del estado de Nuevo León donde se localiza la región homogénea No. 5 la cual presenta una condición climática más húmeda que el resto de las

regiones, muestra los niveles más bajos de déficit en la precipitación para este periodo de retorno (20.1-25%) considerando así a esta región con el menor grado de sequía.



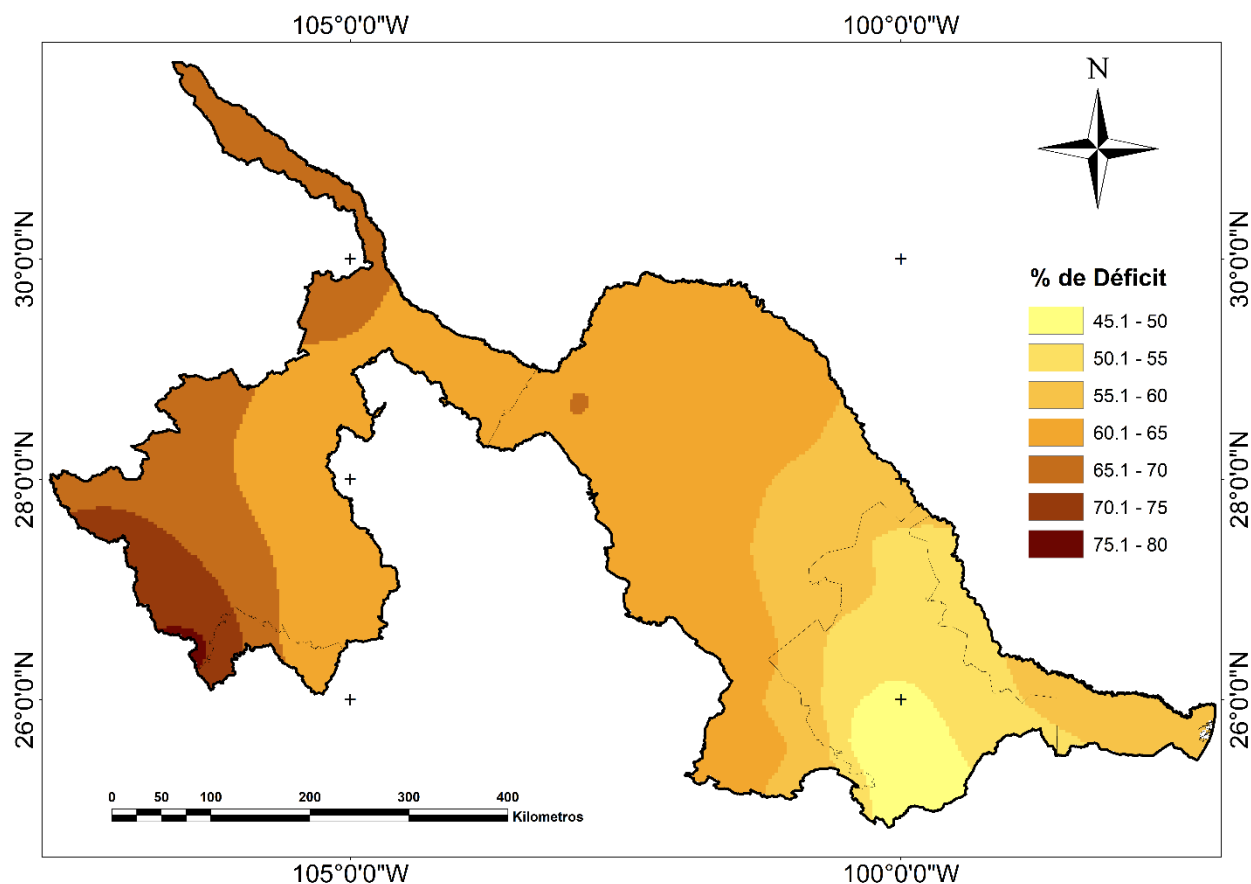
**Figura 4.20** Mapa del porcentaje de déficit de precipitación para un periodo de retorno de 10 años. Elaboración propia.

Para un periodo de retorno de 10 años (Figura 4.20), no se muestra un gran cambio en las zonas parcialmente afectadas por la disminución en su precipitación, sin embargo, los valores de este déficit aumentan en las zonas mencionadas en el mapa anterior. Por lo que para las zonas centro y oeste de la cuenca los valores de déficit aumentan a un mínimo de 45.1% de déficit hasta un 60%, lo que clasificaría estas zonas con un grado de sequía severa, siendo la zona norte y sur del estado de Chihuahua las que presentan los niveles más altos en déficit; en comparación con la parte sureste de la cuenca que sigue mostrando los niveles más bajos para este periodo, lo que indicaría la presencia de sequías de grado moderado-severo. Nuevamente se muestran los valores de menor déficit en la RH5.



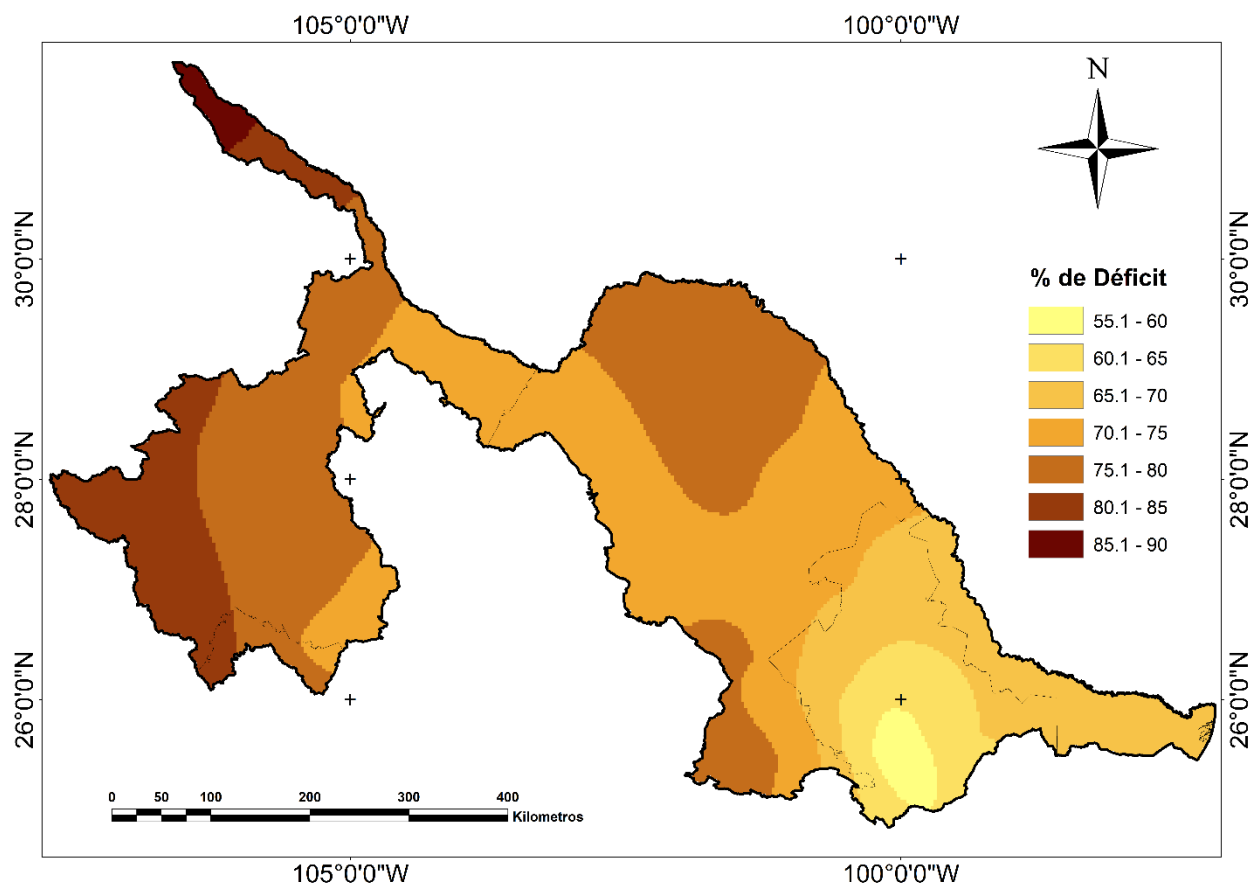
**Figura 4.21** Mapa del porcentaje de déficit de precipitación para un periodo de retorno de 15 años. Elaboración propia.

Para el periodo de retorno de 15 años (Figura 4.21), las mismas zonas presentan los mayores grados de déficit (55.1-70%) continuando con un grado de sequía severa a extrema. Presentando la parte sur del estado de Chihuahua un grado de sequía extrema. Nuevamente la región homogénea No. 5 presentaría los niveles más bajos de déficit (40.1-45%) en su precipitación, así como gran parte del estado de Nuevo León en donde se aprecia un grado severo de sequía.



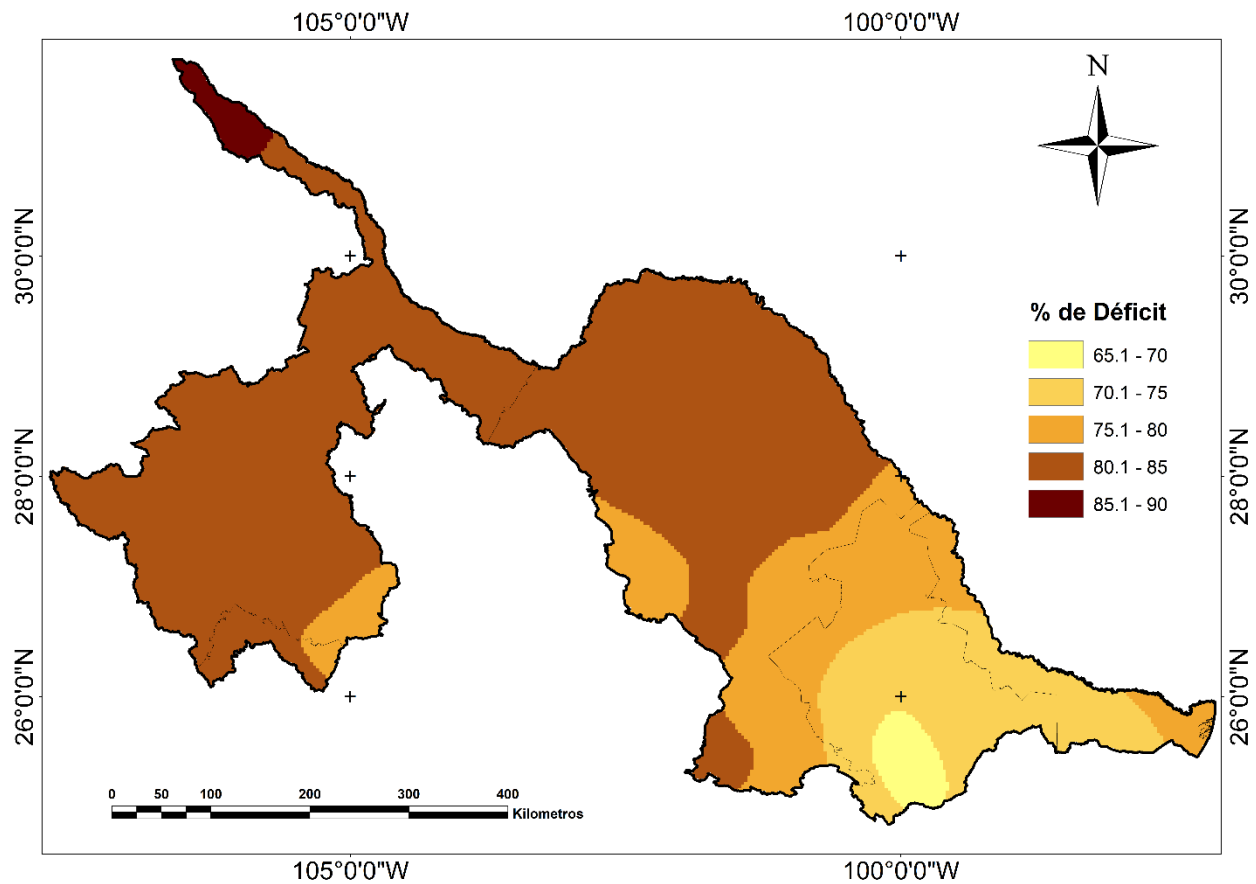
**Figura 4.22** Mapa del porcentaje de déficit de precipitación para un periodo de retorno de 20 años. Elaboración propia.

Para un periodo de retorno de 20 años (Figura 4.22), las condiciones de déficit son similares a las mostradas en el mapa de Tr 15 respecto a las zonas noroeste y sur del estado de Chihuahua donde se registran los niveles más altos en déficit (70.1-80%). La parte central muestra niveles de 60.1-65% de déficit y la parte baja del estado de Nuevo León sigue mostrando un grado de sequía severo (45.1-50% de déficit).



**Figura 4.23** Mapa del porcentaje de déficit de precipitación para un periodo de retorno de 50 años. Elaboración propia.

En el mapa de la Figura 4.23, se aprecia como los estados de Chihuahua y Coahuila podrían presentar un nivel extremo a excepcional de sequía (70.1-90% de déficit) en esta ocasión siendo la parte más afectada el noroeste del estado de Chihuahua, mientras que los estados de Nuevo León y Tamaulipas mantendrían un grado severo, nuevamente el área perteneciente a la región homogénea No. 5 es la que muestra los valores más bajos de déficit (55.1-60%) respecto a este periodo de retorno.



**Figura 4.24** Mapa del porcentaje de déficit de precipitación para un periodo de retorno de 100 años. Elaboración propia.

Para el último mapa (Figura 4.24), que corresponde a un periodo de retorno de 100 años se puede apreciar que la parte noroeste del estado de Chihuahua presenta el mayor grado de déficit para este periodo (85.1-90%), aunque se observa que la totalidad de la cuenca presentará un grado de extremo a excepcional de sequía (65.1-90% de déficit en la precipitación media anual) para este periodo. Destacando que el área comprendida por la RH5 muestra por primera vez un nivel extremo de sequía.



## 4.8.- Discusión

A partir de los resultados encontrados, se comprobó la hipótesis central de este trabajo, que ubica aquellas regiones más propensas a padecer altos grados de sequía meteorológica con un menor periodo de retorno, en las regiones que presentan mayor variabilidad en su precipitación media anual. Lo que determinó a las RH1 y RH2 como las más afectadas, las cuales abarcan la mayor parte de la cuenca ubicada en los estados de Chihuahua y Coahuila, y tienen una precipitación media de 150-300 mm y 301-450 mm, respectivamente.

Estos resultados, se relacionan con lo obtenido por Núñez-López *et al.* (2013), quienes señalan que la proximidad de las zonas de costa refleja un claro efecto de continentalidad, indicando una disminución de los valores de precipitación conforme más lejana se encuentra la zona marítima. De acuerdo con esto las RH4 y RH5, que se encuentran en la parte este de la cuenca (en los estados de Tamaulipas y Nuevo León) son aquellas que presentan los niveles más altos de precipitación (601-750 mm y 751-1000 mm, respectivamente), y por lo obtenido en los mapas generados en este trabajo, la RH5 es la región menos propensa a sufrir un grado extremo de sequía meteorológica, pues la precipitación tiende a incrementarse en valores de longitud próximos al este de la cuenca (costa del Golfo de México), además de que frecuentemente se ve beneficiada por los ciclones tropicales provenientes del Atlántico.

Con respecto al análisis de los periodos secos, los resultados indican que el lapso 2011-2012 fue el más seco del periodo estudiado, y coincide con lo mencionado por Arreguín-Cortés *et al.* (2016), quienes afirman que, entre los estados más afectados por la sequía ocurrida a nivel nacional en ese periodo, se encuentran Chihuahua y Coahuila, que se ubican en la parte centro y occidente de la cuenca del río Bravo y pertenecen a las RH1 y RH2 generadas en este estudio.

Los grados de sequía que se muestran en los mapas de déficit de precipitación generados, se intensifican conforme se incrementa el periodo de retorno, llegando a presentar sequías extremas a excepcionales con hasta un 90% de déficit en la precipitación para el período de retorno de 100 años. Esto concuerda con los resultados expuestos por Cerano *et al.* (2011) que muestran eventos intensos de sequía a intervalos de 100 años, para el noreste de México desde 1450 hasta 1960.

Finalmente, de acuerdo con la duración de los períodos de sequía más extensos encontrados en cada una de las regiones homogéneas, se puede afirmar que entre los años 1993 a 2002 ocurrió el período de sequía meteorológica más prolongado en la cuenca (con ciertas variaciones de una región a otra). Estos resultados son similares a los encontrados por Ortega-Gaucin (2013), quien

realizó la caracterización de los periodos de sequía hidrológica registrados históricamente en la cuenca, y concluyó que en la mayor parte de la misma ocurrió un periodo de sequía extraordinaria que se extendió prácticamente a lo largo de catorce años (1992-2005), y fue el más severo y prolongado del cual se tiene registro.

# CAPÍTULO V

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en la investigación, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

Existe una carencia de información pluviométrica, ya que, de 199 estaciones contabilizadas dentro del área de estudio, solamente 141 siguen en funcionamiento y de ellas únicamente 90 (45.22 %) fueron seleccionadas para realizar el estudio, sin considerar que todas presentan en cierto grado ausencia de datos, lo que ratifica la marcada falta de información que mencionan muchos autores en América Latina, mostrando así el primer obstáculo al momento de realizar estos tipos de análisis climáticos.

La aplicación del método basado en L-momentos para el análisis de sequías meteorológicas dentro de la cuenca del río Bravo, permitió la implementación de la herramienta Climatol para el relleno de datos faltantes lo cual generó series reconstruidas con las que se trabajó. Sin embargo, también se corroboró la ventaja que sugiere el no realizar este tipo de procedimientos y aplicar el ARF-LM a los datos sin rellenar, observándose una diferencia mínima a la hora de obtener los valores de  $H1$  y de  $Z^{DIST}$  (coincidiendo las mismas funciones de distribución en ambos casos) pero, en cuanto a la generación de las regiones homogéneas tomando en cuenta el criterio de la precipitación media anual, resultaron ser idénticos, tanto en el grupo de estaciones que las conforman como en los valores de discordancia que presentan por estación en su respectiva RH.

Continuando con el criterio de la precipitación media anual se lograron generar cinco regiones homogéneas. La distribución espacial de las estaciones que conforman estas regiones no presenta un patrón muy definido, a excepción de la RH5 la cual se centra en la parte baja del estado de Nuevo León.

La función de distribución de probabilidad que mejor se ajustó, considerando la precipitación media anual (PMA) es la Logística Generalizada (GLO) seguida de las funciones, General de Valores Extremos (GEV), Generalizada Normal (GNO), y Pearson Tipo III (PE3) para las regiones homogéneas 2, 3, 4 y 5. Mientras que para la región homogénea No. 1 únicamente se ajustó la FDP Gaucho. Seleccionadas las funciones, se obtuvieron los parámetros para cada región y se analizaron los periodos secos.

El análisis de los periodos secos permitió reconocer aquellos años que en el periodo estudiado (1984-2013) han presentado algún grado de sequía, desde ligera hasta excepcional. Destacando que la región homogénea No. 5 únicamente presenta niveles de ligera a severa, mientras que en el resto de las regiones se ha llegado a presentar por lo menos un periodo de sequía excepcional.

De acuerdo con el análisis de periodos secos en cada una de las estaciones, así como por región homogénea se determinó al periodo 2011-2012 como el de mayor déficit en el área de estudio. De la misma manera se observó que el año 2010 fue el año más húmedo.

Gracias a los cuantiles se generaron mapas de probabilidad de ocurrencia de sequías, de acuerdo a su déficit de la precipitación esperada respecto a la media anual para diferentes periodos de retorno, donde se muestra un claro aumento del grado de sequía a medida que los periodos aumentan. Esto coincidiendo con los datos obtenidos en la tabla de periodos de retorno para cada región homogénea, donde al igual que los mapas muestran como la RH5 sería la que tardará más tiempo en presentar un grado excepcional de sequía.

Respecto a la hipótesis, las regiones homogéneas 1 y 2 que presentan un mayor grado de variabilidad en su precipitación que las otras regiones, fueron las más susceptibles a presentar en mayor grado y frecuencia una sequía meteorológica en el área de estudio.

Con respecto a las recomendaciones para estudios posteriores, el hecho de contar con registros actualizados, en este caso hasta datos del año 2018 serviría para un mejor análisis de las condiciones que se presentan, y así poder realizar un seguimiento de los cambios presentes en el área de estudio. Aunque con esta metodología no sea necesario el contar con series largas o hacer un relleno de datos, lo que si se necesita es poder aplicarla en escenarios más actuales y que no se imposibilite su uso debido a años continuos de datos faltantes.

Dentro de la cuenca del río Bravo, México, hay zonas sin presencia de estaciones climatológicas útiles, por lo que implementar la generación de series a partir de estaciones próximas a estas regiones podría beneficiar el delimitado de las regiones homogéneas.

Finalmente, el método basado en L-momentos ha sido poco utilizado dentro de México, por lo que sugeriría la implementación del mismo para realizar diversos estudios en el país, recordando que puede ser aplicado en otros tipos de variables y no exclusivamente en la precipitación.

## REFERENCIAS

Acuña, J., Felipe, O., Ordoñez, J. y Arboleda, F. (2011). Análisis regional de frecuencia de precipitación anual para la determinación de mapas de sequías. *Revista peruana geo-atmosférica rpga* (3), pp. 104-115.

Acuña, J., Felipe, O. y Fernández, C. (2015). Análisis regional de frecuencia de precipitación anual para la determinación de mapas de sequías en las cuencas Chillón, Rímac, Lurín y Alto Mantaro. *Revista peruana geo-atmosférica rpga* (4), pp. 93-108.

Alexandersson, H. (1986). A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of Climatology*, 6(6). pp. 661–675.

Álvarez-Olguín, G. y Escalante-Sandoval, C. A. (2016). Análisis de frecuencias no estacionario de series de lluvia anual. *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. VII, núm. 1, enero-febrero, 2016, pp. 71-88.

Arreguín-Cortés, F. I., López-Pérez, M., Ortega-Gaucin, D. e Ibáñez-Hernández, O. (2016). La política pública contra la sequía en México: avances, necesidades y perspectivas. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7 (5), pp. 63-76.

Báez, R., Prieto, D. V. y Aroche, R. (2016). Estudio de aplicación del análisis regional de frecuencias basado en L-momentos al caso de las precipitaciones anuales en la provincia de Camagüey, Cuba. *Revista Brasileira de Meteorología*, v. 31, núm. 4, 539-545, 2016.

Bass S., Ramasamy S., Dey Deprick J. y Battista F. (2008). Disaster risk management systems analysis. Environment, Climate Change and Bioenergy Division. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, pp. 250.

Castillo, C. y Ortiz, N. (2015). Manual para el uso de L-RAP. 9 de diciembre del 2015, pp. 15.

Castillo, C. y Ortiz, N. (2015). Regionalización de caudales máximos en la cuenca del río Sinú por medio del método estadístico índice de creciente. Proyecto – Pregrado. Universidad Santo Tomás, Facultad de Ingeniería Ambiental, Bogotá, 2015, pp. 74.

Cerano, J., Villanueva, J., Valdez, R. D., Méndez, J. y Constante, V. (2011). Sequías reconstruidas en los últimos 600 años para el noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, núm. 2, septiembre-octubre, 2011, pp. 235-249.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2010). Estadísticas del agua en México. México, Ciudad de México. pp. 249. Marzo 2010.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2011). Tratado sobre aguas internacionales entre México y Estados Unidos: Definición y clasificación de sequía. SEMARNAT, pp. 20.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2012). Atlas del agua en México. SEMARNAT, pp. agosto 2012.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2014). Programa de Medidas Preventivas y de Mitigación de la Sequía (PMPMS), Consejo de cuenca del río Bravo. Instituto Mexicano de Tecnología del agua, diciembre 2014, pp. 201.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2016). SEMARNAT. Atlas del agua en México. México, D.F. pp. 135. Octubre 2016.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2016). Estadísticas del agua en México. México, Ciudad de México. pp. 275. Febrero 2016.

Cruz de la, J. B. y Ortega-Gaucin, D. (2018). Aplicación del análisis regional de frecuencias con l-momentos al estudio de la sequía meteorológica en México. XXV Congreso Nacional de Hidráulica. Noviembre, 2018.

Cruz la, F. J., Guevara, E. y Paredes F. (2014). Caracterización de las sequías meteorológicas en los llanos de Venezuela utilizando un análisis regional de frecuencias. Revista Ingeniería UC. Vol. 21 (1), pp. 70-76.

Cruz la, F. J. (2015). Análisis de las sequías meteorológicas en Venezuela utilizando el método l-momentos. Tesis de doctorado, Universidad de Carabobo, Bárbula.

Dalrymple, T. (1960). Flood-frequency analyses. U.S. Geol. Survey Water Supply Paper, 1543A, pp. 104.

Diario Oficial de la Federación (DOF). (2011). Acuerdo por el que se da a conocer el resultado de los estudios técnicos de la Región Hidrológica número 24 Bravo – Conchos. México. 02 / 06 / 2011.

Esparza, M. (2014). La sequía y la escasez de agua en México. Situación actual y perspectivas futuras Secuencia. Revista de historia y ciencias sociales, núm. 89, pp. 193-219.

Greenwood J., Landwehr J., Matalas N. y Wallis J. (1979). Probability weighted moments: Definition and relation to parameters of several distributions expressible in inverse form. Water Resources Research. 15: 1049-1054.

Guijarro, J. A. (2018). Homogeneización de series climáticas con Climatol. Islas Baleares, España. (Versión 3.1.1).

Gutiérrez, J. M., Ruiz, J. M. y Hallack, M. (2016). Monitoreo de sequía en la Cuenca del Río Tijuana.

Hosking, J. R. M. y Wallis, J. R. (1997). *Regional Frequency Analysis: An Approach Based on L-moments*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K. pp. 224.

International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies (IFRC) (2018). Informe mundial sobre desastres, 2018. pp. 167-212.

Kalma J. y Franks S. (2003). Rainfall in arid and semiarid regions. Chapter 2. In: Simmers, I(Ed). *Understanding water in a dry environment. Hydrological processes in arid and semiarid zones*. International Association of Hydrogeologists. BALKEMA. Lissier, pp. 15-63.

Linares, M. (2004). La sequía en la cuenca del río Bravo: principios de política. *Gaceta Ecológica*, núm. 70, pp. 57-66.

Martínez, P. F. e Irula, F. (2016). Tendencias de precipitación y cambio climático en la cuenca del río Conchos, México. *Aqua-LAC*, vol. 8, núm. 2, septiembre 2016, pp. 79-88.

Naranjo, R. C. (2011). Análisis regional de frecuencia mediante el método de los L-momentos en las regiones de Valparaíso y metropolitana para la generación de cartografía probabilística de sequía meteorológica. Memoria de Título de Ingeniero. Santiago-Chile, 2011, pp. 117.

Nava, L. F. (2016). Realidad o quimera de los futuros conflictos hídricos: el caso de la cuenca binacional del Río Grande/Bravo. Documento presentado en el Seminario Permanente Fronteras Teórico-Conceptuales y Metodológicas en los Estudios Urbanos, del Medio Ambiente y el Territorio de la Universidad de Guanajuato. 14 de marzo de 2016.

Núñez, D., Muñoz, C. A., Reyes, V. M., Velasco, I. y Gadsden, H. (2007). Caracterización de la sequía a diversas escalas de tiempo en Chihuahua, México. *Agrociencia*, vol. 41, núm. 3, abril-mayo, 2007, pp. 253-262.

Núñez, J.C. y Verbist, K. (2010). Guía metodológica para la aplicación del Análisis Regional de Frecuencia de Sequías basado en L-momentos y resultados de aplicación en América Latina. CAZALAC. Documentos Técnicos del PHI-LAC, No 27.

Núñez-Galeano, L. y Giraldo-Osorio, J. D. (2016). Adaptation of the L-moments method for the regionalization for maximum annual temperatures in Colombia. *Ing. Univ. Bogotá, Colombia*, 20 (2): 373 – 389, julio-diciembre de 2016.

Núñez-López, D., Treviño-Garza, E. J., Reyes-Gómez, V. M., Muñoz-Robles, C. A., Aguirre-Calderón, O.A. y Jiménez-Pérez, J. (2013). Interpolación espacial de la precipitación media

mensual en la cuenca del río Bravo/Grande. *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. IV, núm. 2, abril-junio, 2013, pp. 185-193.

Organización Meteorológica Mundial (OMM). (2006). *Vigilancia y alerta temprana de la sequía: conceptos, progresos y desafíos futuros*. OMM-N° 1006. Ginebra, Suiza, pp. 12.

Organización Meteorológica Mundial (OMM). (2011). *Guía de prácticas climatológicas*. OMM-N° 100. Ginebra, Suiza, pp. 128.

Organización Meteorológica Mundial (OMM). (2016). *Estado del clima mundial en 2011 – 2015*. OMM-N° 1179, Ginebra, Suiza, pp. 32.

Ortega-Gaucin, D. (2012). *Sequía en Nuevo León: vulnerabilidad, impactos y estrategias de mitigación*. Instituto del Agua del Estado de Nuevo León. Apodaca, N. L. 222 p.

Ortega-Gaucin, D. y Velasco, I. (2013). Aspectos socioeconómicos y ambientales de las sequías en México. *Aqua-LAC*. 5. pp. 78-90.

Ortega-Gaucin, D. (2013). *Caracterización de las sequías hidrológicas en la cuenca del río bravo, México*. *Terra Latinoamericana*, vol. 31, núm. 3, pp. 167-180.

Paredes, F. (2012). *Sistema para la alerta temprana de sequías meteorológicas en Venezuela*. Tesis de grado para optar al título de Doctor en Ingeniería Ambiental. Universidad de Carabobo. Carabobo, Venezuela. XVIII p.

Paredes, F., Cruz la, F. y Guevara, E. (2014). Análisis regional de frecuencia de las sequías meteorológicas en la principal región cerealera de Venezuela. *Bioagro* 26 (1), pp. 21 – 28.

Pita, O. (2018). *Detección de cambio climático en la cuenca del río Conchos, mediante índices climáticos*. Tesis de maestría, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, pp. 102.

Podestá, G., Skansi, M., Herrera, N. y Veiga, H. (2016). *Descripción de índices para el monitoreo de sequía meteorológica implementados por el Centro Regional del Clima para el Sur de América del Sur*. Reporte Técnico CRC-SAS-2015-001. Agosto, 2016.

Sisto, N. P., Guajardo-Quiroga, R. y Aguilar-Barajas, I. (2011). *Estimación de los impactos económicos de una sequía*. *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. II, núm. 2, abril-junio, 2011, pp. 111-123.

Troyo, E., Mercado, G., Cruz, A., Nieto, A., Valdez, R. D., García, J. L. y Murillo, B. (2014). *Análisis de la sequía y desertificación mediante índices de aridez y estimación de la brecha hídrica en Baja California Sur, noroeste de México*. *Investigaciones Geográficas (Mx)*, núm. 85, 2014, pp. 66-81.



UNESCO (2010). Atlas de Zonas Áridas de América Latina y el Caribe. Dentro del marco del proyecto “Elaboración del Mapa de Zonas Áridas, Semiáridas y Subhúmedas de América Latina y el Caribe”. CAZALAC. Documento Técnico del PHI-LAC, N°25.

UNESCO (2018). Atlas de Sequía de América Latina y el Caribe. UNESCO y CAZALAC, pp. 204.

Valiente, O. M. (2001). Sequía: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación. Investigaciones geográficas, No. 26. Instituto universitario de geografía, universidad de alicante, España. pp. 59 – 80.

Velasco, I., Aparicio, J., Valdés J. B., Velázquez, J. y Kim, T. (2004). Evaluación de índices de sequía en las cuencas de afluentes del río Bravo/Grande. Ingeniería hidráulica en México, vol. XIX, núm. 3, julio-septiembre de 2004, pp. 37-53.

Velasco, I., Núñez, D., Muñoz, C., Reyes, V. y Gadsden, H. (2007). Caracterización de la sequía a diversas escalas de tiempo en Chihuahua. 41 (3): Revista Agrociencia México. D.F. pp. 253-262.

Vich, A. I., Norte, F. A. y Lauro, C. (2014). Analisis regional de frecuencias de caudales de rios ´ pertenecientes a cuencas con nacientes en la cordillera de los andes. Meteorológica. Vol. 39 N°1 (2014). pp. 3-26.

Wallis, J. R., Schaefer, M. G., Barker, B. L. y Taylor, G. H. (2007). Regional precipitation-frequency analysis and spatial mapping for 24-hour and 2-hour durations for Washington State. Hydrol. Earth Syst. Sci., 11(1), 415-442, 2007.

Wilhite, D. A. y Glantz, M. H. (1985). Understanding the drought phenomenon: the role of definitions. Water international, Vol. 10, pp. 111-120.

Wilhite, D. A. (2000). Drought as a Natural Hazard: Concepts and Definitions. University of Nebraska-Lincoln. Chapter, 1. pp. 1-18.

## ANEXOS

### A.- FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD

#### a) Distribución Kappa

Formada por cuatro parámetros: ubicación ( $\xi$ ), escala ( $\alpha$ ) y los parámetros de forma ( $k, h$ ). La función de distribución se expresa como:

$$x(F) = \xi + \frac{\alpha}{k} \left\{ 1 - \left( \frac{1 - F^h}{h} \right)^k \right\} \quad (1)$$

Rango de x:

El límite superior es  $\xi + \alpha / k$  si  $k > 0$ ,  $\infty$  si  $k \leq 0$ ;

El límite inferior es  $\xi + \alpha (1 - h^{-k}) / k$  si  $h > 0$ ,  $\xi + \alpha / k$  si  $h \leq 0$  y  $k < 0$ ,  $-\infty$  si  $h \leq 0$  y  $k \geq 0$ .

$$f(x) = \alpha [1 - k(x - \xi) / \alpha]^{1/k-1} [F(x)]^{1-h} \quad (2)$$

$$F(x) = \{1 - h [1 - k(x - \xi) / \alpha]^{1/k}\}^{1-h} \quad (3)$$

Los L-momentos están definidos para  $h \geq 0$  y  $k > -1$  o bien para  $h < 0$  y  $-1 < k < -1/h$ .

$$\lambda_1 = \xi + \alpha (1 - g_1) / k \quad (4)$$

$$\lambda_2 = \alpha (g_1 - g_2) / k \quad (5)$$

$$t_3 = (-g_1 + 3g_2 - 2g_3) / (g_1 - g_2) \quad (6)$$

$$t_4 = (-g_1 + 6g_2 - 10g_3 + 5g_4) / (g_1 - g_2) \quad (7)$$

Donde:

$$g_r = \frac{r\Gamma(1+k)\Gamma(r/h)}{h^{1+k}\Gamma(1+k+r/h)}, \quad h > 0 \quad (8)$$

$$g_r = \frac{r\Gamma(1+k)\Gamma(-k-r/h)}{(-h)^{1+k}\Gamma(1-r/h)}, \quad h < 0$$

## b) Logística Generalizada (GLO)

Formada por tres parámetros: ubicación ( $\xi$ ), escala ( $\alpha$ ) y forma ( $k$ ). Expresando la función de distribución:

$$F(x) = \frac{1}{(1 + e^{-y})} \quad (9)$$

Rango de  $x$ :

$$-\infty < x \leq \xi + \alpha / k \text{ si } k > 0, \quad -\infty < x < \infty \text{ si } k = 0, \quad \xi + \alpha / k \leq x < \infty \text{ si } k < 0.$$

Donde:

$$f(x) = \frac{\alpha^{-1} e^{-(1-k)y}}{(1 + e^{-y})^2}, \quad y = \begin{cases} -k^{-1} \log \left\{ 1 - \frac{k(x-\xi)}{\alpha} \right\}, & k \neq 0 \\ (x - \frac{\xi}{\alpha}), & k = 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$x(F) = \begin{cases} \xi + \alpha \left[ 1 - \frac{\left\{ \frac{1-F}{F} \right\}^k}{k} \right], & k \neq 0 \\ \xi + \alpha \log \{ (1-F)/F \}, & k = 0 \end{cases} \quad (11)$$

Los L-momentos están definidos para  $-1 < k < 1$

$$\lambda_1 = \xi + \alpha \left( \frac{1}{k} - \frac{\pi}{\sin k \pi} \right) / k \quad (12)$$

$$\lambda_2 = \alpha k \pi / \sin k \pi \quad (13)$$

$$\lambda_3 = -k \quad (14)$$

$$t_3 = -k \quad (15)$$

$$t_4 = (1 + 5k^2) / 6$$

Sus parámetros son expresados como:

$$k = -t_3, \quad \alpha = \frac{\lambda_2 \sin k \pi}{k \pi}, \quad \xi = \lambda_1 - \alpha \left( \frac{1}{k} - \frac{\pi}{\sin k \pi} \right) \quad (16)$$

### c) Generalizada Normal (GNO)

Formada por tres parámetros: ubicación ( $\xi$ ), escala ( $\alpha$ ) y forma ( $k$ ).

Rango de  $x$ :

$$-\infty < x \leq \xi + \alpha / k \text{ si } k > 0, -\infty < x < \infty \text{ si } k = 0, \xi + \alpha / k \leq x \leq \infty \text{ si } k < 0.$$

$$f(x) = \frac{e^{ky-y^2/2}}{\alpha\sqrt{2\pi}}, \quad y = \begin{cases} -\frac{1}{k} \log \left\{ 1 - \frac{k(x-\xi)}{\alpha} \right\}, & k \neq 0 \\ \left( x - \frac{\xi}{\alpha} \right), & k = 0 \end{cases} \quad (17)$$

$$F(X) = \Phi(y)$$

$\Phi$  es la función de distribución acumulada de una distribución normal estándar.

Caso especial:  $k=0$  es la distribución Normal con parámetros  $\xi$  y  $\alpha$ .

En la que la función de distribución se expresa como:

$$F(x) = \frac{\Phi(y)}{\alpha - k(x - \xi)} \quad (18)$$

Sus L-momentos se definen para cualquier valor de  $k$ .

$$\lambda_1 = \xi + \alpha \left( 1 - e^{-\frac{k^2}{2}} \right) / k \quad (19)$$

$$\lambda_2 = \frac{\alpha}{k} e^{-\frac{k^2}{2}} \{ 1 - 2\Phi(-k\sqrt{2}) \} \quad (20)$$

No existen expresiones simples para los ratios de los L-momentos se utilizan aproximaciones basadas en funciones racionales. Las aproximaciones para  $t_3$  y  $t_4$  tienen mayor precisión que  $2 \times 10^{-7}$  y  $5 \times 10^{-7}$ , para  $|k| \leq 4$ , lo que corresponde a  $|t_3| \leq 0.99$  y  $t_4 \leq 0.98$ .

$$t_3 \approx -k \frac{A_0 + A_1 k^2 + A_2 k^4 + A_3 k^6}{1 + B_1 k^2 + B_2 k^4 + B_3 k^6} \quad (21)$$

$$t_4 \approx t_4^0 + k^2 \frac{C_0 + C_1 k^2 + C_2 k^4 + C_3 k^6}{1 + D_1 k^2 + D_2 k^4 + D_3 k^6} \quad (22)$$

El parámetro de forma  $k$  es función de  $t_3$ . No existe solución explícita posible, pero las aproximaciones siguientes tienen una aproximación mayor que  $2.5 \times 10^{-6}$  para  $|t_3| \leq 0.94$ , lo que corresponde a  $|k| \leq 3$ :

$$k \approx -t_3 \frac{E_0 + E_1 t_3^2 + E_2 t_3^4 + E_3 t_3^6}{1 + F_1 t_3^2 + F_2 t_3^4 + F_3 t_3^6} \quad (23)$$

El parámetro de escala y ubicación se determinan de la siguiente manera:

$$\alpha = \frac{\lambda_2 k e^{-k^2/2}}{1 - 2\Phi\left(-\frac{k}{\sqrt{2}}\right)}, \quad \xi = \lambda_1 - \frac{\alpha}{k} (1 - e^{-k^2/2}) \quad (24)$$

#### d) General de Valores Extremos (GEV)

Formada por tres parámetros: ubicación ( $\xi$ ), escala ( $\alpha$ ) y forma ( $k$ ).

En la que la función de distribución se expresa como:

$$F(x) = e^{-e^{-y}} \quad (25)$$

Donde:

$$f(x) = \alpha^{-1} e^{-(1-k)y}, \quad y = \begin{cases} -k^{-1} \log \left\{ 1 - \frac{k(x-\xi)}{\alpha} \right\}, & k \neq 0 \\ (x - \frac{\xi}{\alpha}), & k = 0 \end{cases} \quad (26)$$

$$x(F) = \begin{cases} \xi + \frac{\alpha \{1 - (-\log F)^k\}}{k}, & k \neq 0 \\ \xi + \alpha \log (-\log F), & k = 0 \end{cases} \quad (27)$$

Como casos especiales:  $k = 0$  se trata de la distribución Gumbel;  $k = 1$  es una distribución exponencial revertida.

Existen tres tipos de distribuciones GEV, caracterizadas por las siguientes funciones de distribución acumuladas:

$$\text{Tipo I} \quad f(x) = \exp(e^{-x}) \quad -\infty < x < \infty \quad (28)$$

$$\text{Tipo II} \quad f(x) = \exp(e^{-\delta}) \quad 0 \leq x < \infty \quad (29)$$

$$\text{Tipo III} \quad f(x) = \exp(-|x|^\delta) \quad -\infty < x \leq 0 \quad (30)$$

Los diferentes tipos de distribución corresponden a  $k = 0$ ,  $k < 0$  y a  $k > 0$  respectivamente. La distribución de Weibull se define por:

$$F(x) = 1 - \exp \left[ - \left\{ \frac{x-\zeta}{\beta} \right\}^\delta \right], \quad \zeta \leq x \leq \infty \quad (31)$$

siendo una distribución GEV revertida con parámetros:

$$k = \frac{1}{\sigma}, \quad \alpha = \frac{\beta}{\delta}, \quad \xi = \varsigma - \beta \quad (32)$$

Los valores de los L-momentos están definidos para valores de  $k > 1$

$$\lambda_1 = \xi + \alpha \{1 - \Gamma(1 + k)\} / k \quad (33)$$

$$\lambda_2 = \alpha (1 - 2^{-k}) \Gamma(1 + k) / k \quad (34)$$

$$t_3 = \frac{2(1 - 3^{-k})}{1 - 2^{-k}} - 3 \quad (35)$$

$$t_4 = \{5(1 - 4^{-k}) - 10(1 - 3^{-k}) + 6(1 - 2^{-k})\} / (1 - 2^{-k}) \quad (36)$$

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} e^{-t} dt \quad (37)$$

El valor del parámetro  $k$  se estima resolviendo la expresión (35). No es posible obtener una solución explícita, pero la aproximación siguiente tiene una precisión mayor que  $9 \times 10^{-4}$  para  $-0.5 \leq t_3 \leq 0.5$ .

$$k \approx 7.8590c + 2.9554c^2, \quad c = \frac{2}{3 + t_3} - \frac{\log 2}{\log 3} \quad (38)$$

Los datos del parámetro se definen por:

$$\alpha = \frac{\lambda_2 k}{(1 - 2^{-k}) \Gamma(1 + k)}, \quad \xi = \lambda_1 - \alpha \{1 - \Gamma(1 + k)\} / k \quad (39)$$

### e) Generalizada de Pareto (GPA)

Formada por tres parámetros: ubicación ( $\xi$ ), escala ( $\alpha$ ) y forma ( $k$ ).

Rango de  $x$ :  $\xi \leq x \leq \xi + \alpha / k$  para  $k > 0$ ;  $\xi \leq x < \infty$  para  $k \leq 0$ .

En la que la función de distribución se expresa como:

$$F(x) = 1 - e^{-y} \quad (40)$$

Donde:

$$f(x) = \alpha^{-1} e^{-(1-k)y}, \quad y = \begin{cases} -k^{-1} \log \left\{ 1 - \frac{k(x-\xi)}{\alpha} \right\}, & k \neq 0 \\ (x - \frac{\xi}{\alpha}), & k = 0 \end{cases} \quad (41)$$

$$x(F) = \begin{cases} \xi + \alpha \left[ 1 - \frac{\left\{ \frac{1-F}{F} \right\}^k}{k} \right], & k \neq 0 \\ \xi + \alpha \log \{(1-F)/F\}, & k = 0 \end{cases} \quad (42)$$

Casos especiales:  $k = 0$  distribución exponencial,  $k = 1$  distribución uniforme en el intervalo  $\xi \leq x \leq \xi + \alpha$ .

Los casos para los que se definen los L-momentos se definen para  $k > -1$ .

$$\lambda_1 = \xi + \alpha / (1 + k) \quad (43)$$

$$\lambda_2 = \alpha / \{(1 + k) (2 + k)\} \quad (44)$$

$$t_3 = (1 - k) / (3 + k) \quad (45)$$

$$t_4 = (1 - k) (2 - k) / \{(3 + k) (4 + k)\} \quad (46)$$

La relación entre  $t_3$  y  $t_4$  se define mediante

$$t_4 = \frac{t_3 (1 + 5t_3)}{5 + t_3} \quad (47)$$



Si  $\xi$  es conocido, los dos parámetros de  $\alpha$  y  $k$  vienen dados por

$$k = (\lambda_1 - \xi) / \lambda_2 - 2, \quad \alpha = (1 + k) (\lambda_1 - \xi) \quad (48)$$

Si  $\xi$  es desconocido, los tres parámetros vienen dados por

$$k = \frac{1 - 3t_3}{1 + t_3}, \quad \alpha = (1 + k) (2 + k) \lambda_2, \quad \xi = \lambda_1 - (2 + k) \lambda_2 \quad (49)$$

### f) Pearson Tipo III (P3)

Formada por tres parámetros: ubicación ( $\xi$ ), escala ( $\alpha$ ) y forma ( $k$ ).

Rango de  $x$ :

Si  $y \neq 0$ , sea  $\alpha = 4 / y^2$ ,  $\beta = 1/2 \sigma |y|$ ,  $\xi = y - 2\sigma / y$ . Si  $y > 0$ , el rango de  $x$  es  $\xi \leq x < \infty$  en la que su función de distribución se expresa como:

$$f(x) = \frac{(x - \xi)^{\alpha-1} e^{-(x-\xi)/\beta}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \quad (50)$$

$$F(x) = \begin{cases} \frac{G\left(\alpha, \frac{x-\xi}{\beta}\right)}{\Gamma(\alpha)}, & y > 0 \\ 1 - \frac{G\left(\alpha, \frac{x-\xi}{\beta}\right)}{\Gamma(\alpha)}, & y < 0 \end{cases} \quad (51)$$

Si  $y = 0$ , la distribución es Normal, donde el rango de  $x$  es  $-\infty < x < \infty$ , y

$$f(x) = \phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right), \quad F(x) = \Phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) \quad (52)$$

Siendo  $\phi$  y  $\Phi$  la función de distribución Normal y su acumulada respectivamente. Si  $y < 0$ , el rango de  $x$  es  $-\infty < x \leq \xi$ , y

$$f(x) = \frac{(\xi - x)^{\alpha-1} e^{-(\xi-x)/\beta}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \quad (53)$$

$$F(x) = 1 - G\left(\alpha, \frac{\xi - x}{\beta}\right) / \Gamma(\alpha) \quad (54)$$

$\Gamma$  es una función Gamma definida en 36, y

$$G(\alpha, x) = \int_0^x t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (55)$$

Es la función Gamma incompleta

Como casos especiales están:  $y = 2$  distribución exponencial;  $y = 0$  Normal;  $y = -2$  exponencial revertida. La distribución Pearson tipo III se remite a  $y > 0$  y se suele parametrizar por medio de  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\xi$ , lo cual permite el uso de la distribución en los casos en que los datos tienen posible asimetría positiva.

Los L-momentos, se expresan en función de los parámetros estándar de la distribución. Se asume que  $y > 0$ . Para los casos de  $y < 0$ , se cambiarían los valores de  $\lambda_1$ ,  $t_3$  y  $\xi$ , en las expresiones que van de 53 hasta 61. Se definen para los valores de  $\alpha$  comprendidos entre 0 e  $\infty$ .

$$\lambda_1 = \xi + \alpha \beta \quad (56)$$

$$\lambda_2 = \pi^{-\frac{1}{2}} \beta \Gamma(\alpha + 1/2) / \Gamma(\alpha) \quad (57)$$

$$t_3 = 6 I_{1/3}(\alpha, 2\alpha) - 3 \quad (58)$$

Donde:

$$I_x(p, q) = \frac{\Gamma(p+q)}{\Gamma(p)\Gamma(q)} \int_0^x t^{p-1} (1-t)^{q-1} dt \quad (59)$$

No existe una expresión única para  $t_4$ . Tanto  $t_3$  como  $t_4$  se pueden aproximar por medio de funciones racionales en función de  $\alpha$ . las siguientes aproximaciones tienen una expresión del orden de  $10^{-6}$ . Para  $\alpha \geq 1$ ,

$$t_3 \approx \alpha^{-1/2} \frac{A_0 + A_1 \alpha^{-1} + A_2 \alpha^{-2} + A_3 \alpha^{-3}}{1 + B \alpha^{-1} + B_2 \alpha^{-2}} \quad (60)$$

$$t_4 \approx \frac{C_0 + C_1 \alpha^{-1} + C_2 \alpha^{-2} + C_3 \alpha^{-3}}{1 + D \alpha^{-1} + D_2 \alpha^{-2}} \quad (61)$$

Cuando  $\alpha < 1$ ,

$$t_3 \approx \frac{1 + E_1 \alpha + E_2 \alpha^2 + E_3 \alpha^3}{1 + F_1 \alpha + F_2 \alpha^2 + F_3 \alpha^3} \quad (62)$$

$$t_4 \approx \frac{1 + G \alpha + G \alpha^2 + G \alpha^3}{1 + H_1 \alpha + H_2 \alpha^2 + H_3 \alpha^3} \quad (63)$$

Para estimar  $\alpha$  se resuelve 58 reemplazando  $t_3$  por  $|t_3|$  para posibilitar la resolución en caso de que  $t_3$  sea negativo. La siguiente aproximación tiene una precisión relativa mayor que  $5 \times 10^{-3}$  para cualquier valor de  $\alpha$ . para  $0 \leq |t_3| < 1/3$  y definiendo  $z = 3\pi t_3^2$ ,

$$\alpha = \frac{1 + 0.2906z}{z + 0.1882z^2 + 0.0442z^2} \quad (64)$$

Para  $1/3 \leq |t_3| < 1$  y con  $z = 1 - |t_3|$ ,

$$\alpha = \frac{0.36067z + 0.59567z^2 + 0.25361z^3}{1 - 2.78861z + 2.56096z^2 + 0.77045z^3} \quad (65)$$

Dado  $\alpha$ , los parámetros definidos al principio de la sección se obtienen como:

$$y = 2\alpha^{-1/2} \text{sign}(t_3), \quad \sigma = \lambda_2 \pi^{1/2} \alpha^{1/2} \Gamma(\alpha) / \Gamma(\alpha + 1/2), \quad \mu = \lambda_1 \quad (66)$$

## B.- TABLAS DE L-MOMENTOS, PARÁMETROS DE FDP, CUANTILES Y PERIODOS DE RETORNO POR REGIÓN HOMOGÉNEA

**Tabla B-1** L-momentos y parámetros de la FDP Gaucho que corresponden a las estaciones de la RH1. Elaboración propia.

REGIÓN HOMOGÉNEA No. 1								
Estación	Media	L-CV	L-SKEW	L-KURT	Ubicación	Escala	Forma (k)	Forma (h)
5151	195.6	0.1971	0.0122	0.054	0.7268	0.5748	0.5523	0.5118
5152	289.81	0.2185	0.0086	0.184	0.7028	0.6326	0.5537	0.5000
19165	245.54	0.222	0.0913	0.1078	0.7935	0.4083	0.1965	0.1800
8247	182.26	0.3027	0.0623	0.0315	0.3302	1.1922	0.6451	0.8445
5044	217.97	0.2585	0.1343	0.0507	0.4051	0.9108	0.4796	0.9248
5011	262.35	0.1984	0.0779	0.1957	0.7257	0.5025	0.3807	0.5000
5013	256.85	0.2491	0.0196	0.0343	0.5364	0.9156	0.6747	0.7084
5158	272.46	0.2145	-0.0158	0.0564	0.7334	0.6102	0.5815	0.4489
8270	276.69	0.2526	0.0791	0.1589	0.9129	0.2976	-0.0073	-0.5399
8049	299.35	0.1916	0.0615	0.1315	0.8917	0.2827	0.1172	-0.1628
5022	255.23	0.2225	0.0004	0.0251	0.5492	0.9178	0.7753	0.758
8254	217.01	0.2606	0.1312	0.0461	0.3718	0.9662	0.5103	0.9595
8202	286.93	0.2372	0.2224	0.114	0.593	0.5284	0.1504	0.7204
5140	299.96	0.2124	-0.1102	0.1556	0.9933	0.2642	0.2318	-0.5386
19054	225.33	0.2308	-0.0231	0.1051	0.8646	0.4159	0.3254	-0.0007
5164	300.42	0.2251	0.012	0.0257	0.5351	0.9224	0.7511	0.7742
5038	285.97	0.327	0.1458	0.1676	0.8277	0.3919	-0.0609	-0.3938

**Tabla B-2** Cuantiles y periodos de retorno que corresponden a las estaciones de la RH1. Elaboración propia.

REGIÓN HOMOGÉNEA No. 1													
Estación	Media	Cuantil						Periodos de retorno (Precipitación mm)					
		0.2	0.1	0.0667	0.05	0.02	0.01	Tr 5	Tr 10	Tr 15	Tr 20	Tr 50	Tr 100
5151	195.6	0.67	0.54	0.48	0.45	0.38	0.34	131.53	105.21	94.35	88.07	73.73	66.79
5152	289.81	0.64	0.49	0.42	0.39	0.30	0.26	184.76	141.02	122.87	112.32	88.12	76.31
19165	245.54	0.65	0.52	0.46	0.42	0.33	0.27	160.17	127.15	112.40	103.31	80.07	66.59
8247	182.26	0.48	0.31	0.25	0.22	0.17	0.14	86.85	56.99	46.47	40.97	30.34	26.36
5044	217.97	0.56	0.45	0.41	0.39	0.36	0.35	122.11	97.80	89.71	85.61	78.06	75.41
5011	262.35	0.67	0.56	0.51	0.48	0.42	0.39	176.90	146.56	134.29	127.23	111.24	103.54
5013	256.85	0.57	0.42	0.36	0.32	0.25	0.23	147.19	106.60	91.20	82.77	65.26	57.93
5158	272.46	0.65	0.49	0.42	0.38	0.29	0.24	176.24	132.97	114.49	103.56	77.77	64.68
8270	276.69	0.63	0.46	0.38	0.32	0.15	0.03	175.32	128.19	104.17	88.08	40.56	6.97
8049	299.35	0.71	0.58	0.52	0.48	0.36	0.28	213.44	174.54	155.50	143.06	107.80	84.15
5022	255.23	0.61	0.47	0.41	0.38	0.32	0.30	156.76	119.54	105.63	98.11	82.83	76.65
8254	217.01	0.55	0.44	0.41	0.39	0.35	0.34	120.32	96.10	88.16	84.18	76.97	74.51
8202	286.93	0.62	0.53	0.50	0.48	0.45	0.44	177.47	152.29	143.33	138.56	128.94	125.04
5140	299.96	0.72	0.51	0.40	0.32	0.05	-0.16	214.68	153.83	119.45	95.03	15.76	-47.34
19054	225.33	0.65	0.47	0.37	0.32	0.15	0.04	146.52	104.93	84.45	71.11	33.71	9.19
5164	300.42	0.61	0.47	0.41	0.39	0.33	0.31	183.12	140.32	124.51	116.01	98.91	92.10
5038	285.97	0.52	0.33	0.24	0.18	0.01	-0.10	148.18	94.40	68.27	51.23	2.87	-29.67

**Tabla B-3** L-momentos y parámetros de la FDP GLO que corresponden a las estaciones de la RH2. Elaboración propia.

R E G I Ó N H O M O G E N E A N o . 2							
Estación	Media	L-CV	L-SKEW	L-KURT	Ubicación	Escala	Forma
8044	301.32	0.2624	0.1437	0.0948	0.9386	0.2536	-0.1437
5163	359.73	0.2446	0.2208	0.1304	0.9133	0.2255	-0.2208
19170	446.18	0.2519	0.1327	0.2499	0.9455	0.2447	-0.1327
5167	337.72	0.1644	-0.1975	0.1657	1.0524	0.1541	0.1975
5016	347.92	0.1935	-0.2023	0.2271	1.0631	0.1807	0.2023
8081	362.95	0.2812	0.2794	0.2592	0.8757	0.2465	-0.2794
19096	396.85	0.1878	0.1937	0.1868	0.9413	0.1764	-0.1937
5170	335.17	0.2306	0.0619	0.1334	0.9766	0.2291	-0.0619
5155	337.4	0.2819	0.19	0.2562	0.9135	0.2655	-0.19
19028	399.8	0.244	0.0608	0.0899	0.9756	0.2425	-0.0608
19045	305.1	0.2008	0.2403	0.1872	0.9229	0.1823	-0.2403
5156	425.9	0.2686	0.1881	0.107	0.9183	0.2532	-0.1881
5030	323.35	0.1902	-0.0103	0.1236	1.0032	0.1902	0.0103
5031	358.01	0.2011	0.1358	0.1668	0.9555	0.1951	-0.1358
19158	408.31	0.2437	0.2066	0.2623	0.9189	0.2269	-0.2066
19053	445.16	0.1757	0.2224	0.2249	0.9373	0.1617	-0.2224
5171	312.22	0.2435	0.1075	-0.0409	0.9572	0.2389	-0.1075
19055	428.74	0.1687	-0.0257	0.0364	1.0071	0.1685	0.0257
5048	344.19	0.2042	0.0611	0.0499	0.9795	0.2029	-0.0611
5145	403.18	0.1812	0.0307	0.2003	0.9795	0.2029	-0.0611

**Tabla B-4** Cuantiles y periodos de retorno que corresponden a las estaciones de la RH2. Elaboración propia.

R E G I Ó N H O M O G E N E A N o . 2													
Estación	Media	Cuantil						Periodos de retorno (Precipitación mm)					
		0.2	0.1	0.0667	0.05	0.02	0.01	Tr 5	Tr 10	Tr 15	Tr 20	Tr 50	Tr 100
8044	301.32	0.62	0.46	0.38	0.33	0.18	0.09	186.77	138.84	115.01	99.36	55.03	25.81
5163	359.73	0.64	0.52	0.46	0.43	0.32	0.26	231.67	187.32	166.32	152.92	116.73	94.35
19170	446.18	0.64	0.48	0.40	0.35	0.20	0.10	283.61	213.78	178.82	155.75	89.99	46.25
5167	337.72	0.81	0.63	0.52	0.44	0.15	-0.10	272.43	212.24	175.21	147.57	50.59	-34.10
5016	347.92	0.77	0.56	0.43	0.34	-0.01	-0.31	269.27	195.93	150.67	116.83	-2.27	-106.69
8081	362.95	0.59	0.47	0.42	0.38	0.29	0.24	215.00	170.93	150.83	138.28	105.57	86.31
19096	396.85	0.73	0.63	0.58	0.55	0.46	0.40	288.45	248.28	228.94	216.46	182.21	160.55
5170	335.17	0.67	0.51	0.42	0.36	0.18	0.06	225.32	169.58	140.40	120.64	61.76	20.22
5155	337.4	0.59	0.44	0.36	0.31	0.18	0.10	199.04	147.31	122.33	106.20	61.81	33.66
19028	399.8	0.65	0.48	0.38	0.32	0.14	0.00	261.15	190.64	153.70	128.67	54.05	1.36
19045	305.1	0.71	0.61	0.57	0.54	0.46	0.42	216.00	186.63	172.89	164.19	140.97	126.84
5156	425.9	0.61	0.46	0.39	0.35	0.22	0.14	259.51	197.02	166.81	147.30	93.52	59.35
5030	323.35	0.74	0.58	0.49	0.43	0.25	0.11	238.51	187.71	159.89	140.52	80.17	34.98
5031	358.01	0.71	0.58	0.52	0.48	0.37	0.29	253.82	209.39	187.19	172.56	130.93	103.31
19158	408.31	0.65	0.52	0.46	0.42	0.31	0.25	263.52	211.57	186.75	170.83	127.44	100.31
19053	445.16	0.74	0.66	0.61	0.59	0.52	0.47	331.38	292.14	273.58	261.74	229.79	210.07
5171	312.22	0.65	0.49	0.41	0.35	0.20	0.09	202.79	152.88	127.50	110.60	61.64	28.39
19055	428.74	0.77	0.63	0.55	0.49	0.32	0.19	329.83	268.48	234.56	210.81	136.09	79.42
5048	344.19	0.71	0.56	0.49	0.43	0.28	0.17	244.31	193.54	166.96	148.94	95.24	57.34
5145	403.18	0.71	0.56	0.49	0.43	0.28	0.17	286.18	226.71	195.57	174.47	111.57	67.17

**Tabla B-5** L-momentos y parámetros de la FDP GLO que corresponden a las estaciones de la RH3. Elaboración propia.

REGIÓN HOMOGÉNEA No. 3							
Estación	Media	L-CV	L-SKEW	L-KURT	Ubicación	Escala	Forma
5002	463.79	0.2273	0.0621	0.1175	0.9768	0.2259	-0.0621
19024	512.57	0.2031	0.1586	0.1888	0.9477	0.1948	-0.1586
10141	528.94	0.234	0.3302	0.2349	0.8796	0.1942	-0.3302
19009	565.72	0.2002	0.2048	0.2768	0.9339	0.1867	-0.2048
19012	537.49	0.1409	0.1235	0.1288	0.9716	0.1374	-0.1235
5149	600.05	0.26	0.0288	0.0278	0.9877	0.2596	-0.0288
19013	490.1	0.1791	-0.0178	0.1846	1.0052	0.179	0.0178
19105	588.04	0.1396	0.0568	0.1521	0.987	0.1389	-0.0568
19117	533.3	0.1464	0.0436	0.17	0.9895	0.1459	-0.0436
19016	534.13	0.2023	-0.0218	0.0528	1.0073	0.2021	0.0218
19018	544.6	0.1852	0.1406	0.1833	0.9576	0.1792	-0.1406
19021	534.71	0.2148	0.2123	0.1991	0.9266	0.1992	-0.2123
19022	528.84	0.2183	0.1407	0.0943	0.95	0.2113	-0.1407
19124	577.27	0.167	0.0239	0.1698	0.9934	0.1668	-0.0239
19042	598.63	0.1617	-0.0551	0.1103	1.0146	0.1609	0.0551
5148	453.24	0.2212	0.1898	0.2166	0.9322	0.2083	-0.1898
8185	470.16	0.2653	0.1506	0.1175	0.935	0.2555	-0.1506
19131	561.43	0.1828	-0.0143	0.1869	1.0043	0.1827	0.0143
5033	501.2	0.1962	0.1085	0.1399	0.9652	0.1924	-0.1085
19133	570.71	0.2045	0.1439	0.2113	0.9521	0.1976	-0.1439
19134	474.14	0.17	0.1462	0.1603	0.9595	0.1641	-0.1462
19178	490.09	0.1839	0.2125	0.2756	0.9371	0.1705	-0.2125
19063	470.99	0.2288	0.2203	0.3173	0.9191	0.211	-0.2203
19141	502.35	0.1856	0.0142	0.1303	0.9957	0.1855	-0.0142

**Tabla B-6** Cuantiles y periodos de retorno que corresponden a las estaciones de la RH3. Elaboración propia.

REGIÓN HOMOGÉNEA No. 3													
Estación	Media	Cuantil						Periodos de retorno (Precipitación mm)					
		0.2	0.1	0.0667	0.05	0.02	0.01	Tr 5	Tr 10	Tr 15	Tr 20	Tr 50	Tr 100
5002	463.79	0.68	0.51	0.43	0.37	0.20	0.07	313.86	237.84	198.05	171.10	90.82	34.20
19024	512.57	0.71	0.59	0.53	0.49	0.38	0.31	361.50	300.52	270.49	250.86	195.80	159.96
10141	528.94	0.66	0.58	0.54	0.51	0.45	0.42	351.00	304.76	284.34	271.83	240.23	222.39
19009	565.72	0.71	0.60	0.55	0.52	0.43	0.38	400.86	341.45	313.03	294.78	245.02	213.84
19012	537.49	0.80	0.71	0.66	0.63	0.55	0.49	428.13	380.11	355.93	339.93	294.03	263.26
5149	600.05	0.63	0.43	0.33	0.25	0.03	-0.13	380.98	261.01	196.89	152.91	19.17	-77.78
19013	490.1	0.75	0.60	0.52	0.46	0.28	0.15	369.52	296.07	255.65	227.45	139.12	72.58
19105	588.04	0.80	0.70	0.65	0.61	0.50	0.43	471.51	411.68	380.26	358.93	295.20	250.05
19117	533.3	0.79	0.68	0.63	0.59	0.47	0.38	423.03	364.67	333.77	312.69	249.18	203.70
19016	534.13	0.72	0.55	0.46	0.39	0.19	0.03	386.10	295.07	244.86	209.76	99.58	16.30
19018	544.6	0.73	0.62	0.56	0.53	0.42	0.35	398.59	337.04	306.38	286.21	228.99	191.18
19021	534.71	0.69	0.58	0.52	0.49	0.40	0.34	367.55	308.43	280.29	262.27	213.34	182.89
19022	528.84	0.68	0.55	0.48	0.44	0.32	0.23	361.66	291.20	256.10	233.02	167.52	124.25
19124	577.27	0.77	0.64	0.57	0.52	0.37	0.27	442.16	367.35	327.25	299.69	215.62	154.43
19042	598.63	0.78	0.64	0.56	0.50	0.32	0.17	468.61	382.39	333.83	299.46	189.29	103.69
5148	453.24	0.68	0.56	0.50	0.46	0.36	0.29	307.43	252.89	226.55	209.55	162.73	133.04
8185	470.16	0.62	0.46	0.38	0.33	0.18	0.09	289.30	214.88	178.04	153.91	85.83	41.22
19131	561.43	0.75	0.60	0.51	0.45	0.27	0.14	420.23	334.89	288.03	255.37	153.33	76.68
5033	501.2	0.72	0.59	0.52	0.48	0.35	0.27	359.64	295.24	262.50	240.71	177.63	134.83
19133	570.71	0.70	0.58	0.52	0.48	0.36	0.29	401.64	330.94	295.79	272.70	207.32	164.24
19134	474.14	0.75	0.65	0.60	0.57	0.47	0.41	357.30	308.72	284.60	268.78	224.02	194.58
19178	490.09	0.73	0.64	0.59	0.56	0.49	0.44	358.93	312.57	290.50	276.37	238.02	214.14
19063	470.99	0.67	0.55	0.50	0.46	0.37	0.31	314.17	259.79	234.03	217.59	173.17	145.70
19141	502.35	0.74	0.59	0.52	0.46	0.29	0.17	372.27	298.60	258.87	231.47	147.37	85.66

Tabla B-7. L-momentos y parámetros de la FDP GLO que corresponden a las estaciones de la RH4. Elaboración propia.

REGIÓN HOMOGÉNEA No. 4							
Estación	Media	L-CV	L-SKEW	L-KURT	Ubicación	Escala	Forma
19002	704.24	0.1582	0.0834	0.153	0.9784	0.1564	-0.0834
19010	731.38	0.24	0.1893	0.0746	0.9266	0.2261	-0.1893
8267	650.68	0.2977	-0.0496	0.1142	1.0243	0.2965	0.0496
19104	661.03	0.1989	0.1105	0.1557	0.9641	0.1949	-0.1105
19033	634.94	0.1961	0.1518	0.2111	0.9516	0.1888	-0.1518
19047	612.97	0.1632	-0.0651	0.1881	1.0174	0.1621	0.0651
5020	624.84	0.2157	-0.0674	0.0885	1.0239	0.2141	0.0674
19056	746.52	0.1885	0.1879	0.1662	0.9427	0.1777	-0.1879
19140	715.76	0.1845	0.1479	0.1813	0.9556	0.1779	-0.1479

Tabla B-8. Cuantiles y periodos de retorno que corresponden a las estaciones de la RH4. Elaboración propia

REGIÓN HOMOGÉNEA No. 4													
Estación	Media	Cuantil						Periodos de retorno (Precipitación mm)					
		0.2	0.1	0.0667	0.05	0.02	0.01	Tr 5	Tr 10	Tr 15	Tr 20	Tr 50	Tr 100
19002	704.24	0.77	0.66	0.61	0.57	0.46	0.38	544.83	467.90	428.17	401.47	322.98	268.60
19010	731.38	0.65	0.52	0.46	0.42	0.30	0.23	476.06	380.44	334.26	304.43	222.29	170.17
8267	650.68	0.60	0.34	0.19	0.08	-0.25	-0.51	389.63	218.63	122.64	54.85	-161.71	-329.19
19104	661.03	0.71	0.58	0.52	0.47	0.35	0.26	471.70	385.96	342.44	313.48	229.78	173.08
19033	634.94	0.72	0.60	0.54	0.50	0.40	0.33	454.35	380.24	343.58	319.57	251.92	207.63
19047	612.97	0.78	0.63	0.55	0.49	0.30	0.15	479.48	388.93	337.60	301.15	183.54	91.41
5020	624.84	0.71	0.52	0.41	0.33	0.07	-0.13	445.38	322.95	253.46	204.07	44.46	-80.79
19056	746.52	0.73	0.62	0.57	0.54	0.45	0.40	541.84	464.95	427.77	403.75	337.54	295.48
19140	715.76	0.73	0.62	0.57	0.53	0.43	0.36	524.38	445.11	405.81	380.03	307.20	259.37

Tabla B-9. L-momentos y parámetros de la FDP GLO que corresponden a las estaciones de la RH5. Elaboración propia.

REGIÓN HOMOGÉNEA No. 5							
Estación	Media	L-CV	L-SKEW	L-KURT	Ubicación	Escala	Forma
19003	1026.77	0.1585	0.0494	0.0584	0.9871	0.1579	-0.0494
19007	880.88	0.1388	0.0688	0.1955	0.9843	0.1377	-0.0688
19146	874	0.1769	0.1262	0.1393	0.9636	0.1723	-0.1262
19015	997.98	0.1474	0.1851	0.1646	0.9559	0.1392	-0.1851
19069	1054.19	0.1546	0.244	0.1909	0.9397	0.1399	-0.244
19031	793.9	0.1601	-0.0297	0.2251	1.0078	0.1599	0.0297
19048	866.71	0.1809	0.132	0.1268	0.9611	0.1758	-0.132
19173	790.65	0.2001	0.1281	0.2193	0.9582	0.1947	-0.1281

Tabla B-10. Cuantiles y periodos de retorno que corresponden a las estaciones de la RH5. Elaboración propia.

REGIÓN HOMOGÉNEA No. 5													
Estación	Media	Cuantil						Periodos de retorno (Precipitación mm)					
		0.2	0.1	0.0667	0.05	0.02	0.01	Tr 5	Tr 10	Tr 15	Tr 20	Tr 50	Tr 100
19003	1026.77	0.78	0.66	0.60	0.55	0.43	0.34	796.29	675.95	612.46	569.25	439.50	347.04
19007	880.88	0.80	0.70	0.65	0.62	0.51	0.44	706.67	619.70	574.37	543.75	452.90	389.19
19146	874	0.74	0.63	0.58	0.54	0.43	0.36	650.67	553.22	504.23	471.84	379.11	317.09
19015	997.98	0.79	0.70	0.67	0.64	0.57	0.53	784.11	703.18	663.98	638.63	568.64	524.06
19069	1054.19	0.78	0.70	0.67	0.65	0.59	0.55	817.16	739.79	703.69	680.86	620.04	583.17
19031	793.9	0.78	0.64	0.57	0.52	0.35	0.22	620.44	511.86	451.67	409.48	276.36	175.09
19048	866.71	0.74	0.63	0.57	0.53	0.43	0.36	639.97	542.39	493.51	461.26	369.27	308.05
19173	790.65	0.71	0.59	0.52	0.48	0.36	0.28	562.07	462.79	412.95	380.01	285.83	222.94



## C.- TABLAS DE LOS PERIODOS SECOS POR REGIÓN HOMOGÉNEA

**Tabla C-1.** Años secos (S-Amarillo) y húmedos (H-Azul) de la RH1. Elaboración propia.

<b>AÑOS SECOS Y HÚMEDOS DE LA RH1</b>				
<b>Año</b>	<b>Precipitación</b>	<b>Umbral</b>	<b>Diferencia</b>	<b>S / H</b>
1984	290.24	251.67	51.13	H
1985	319.21	251.67	82.12	H
1986	342.26	251.67	102.28	H
1987	337.48	251.67	69.09	H
1988	314.94	251.67	43.94	H
1989	182.44	251.67	-77.41	S
1990	318.16	251.67	44.90	H
1991	281.00	251.67	33.45	H
1992	265.86	251.67	18.37	H
1993	241.56	251.67	-3.65	S
1994	174.29	251.67	-75.69	S
1995	168.24	251.67	-90.30	S
1996	211.48	251.67	-32.52	S
1997	304.96	251.67	57.28	H
1998	178.62	251.67	-74.02	S
1999	143.24	251.67	-105.62	S
2000	227.19	251.67	-3.22	S
2001	188.40	251.67	-58.32	S
2002	238.40	251.67	-15.42	S
2003	297.54	251.67	39.30	H
2004	396.18	251.67	145.28	H
2005	217.31	251.67	-28.53	S
2006	253.05	251.67	-3.41	S
2007	310.78	251.67	46.98	H
2008	309.12	251.67	63.30	H
2009	226.92	251.67	-13.28	S
2010	355.64	251.67	109.32	H
2011	106.19	251.67	-130.35	S
2012	187.26	251.67	-48.53	S
2013	323.32	251.67	76.43	H

**Tabla C-2.** Periodos secos registrados en la RH1. Elaboración propia.

PERIODOS SECOS DE LA RH1					
Periodo seco	Duración años	Periodo	Periodicidad años	Déficit acum (mm)	Intensidad mm / año
1	1	1989 - 1989		77.41	77.41
2	4	1993 - 1996	4	202.17	50.54
3	5	1998 - 2002	5	256.61	51.32
4	2	2005 - 2006	7	31.94	15.97
5	1	2009 - 2009	4	13.28	13.28
6	2	2011 - 2012	2	178.88	89.44
Media	2.50		4.40	126.72	49.66
Desv. Est.	1.64		1.82	99.57	31.03
Cv	0.66		0.41	0.79	0.62

**Tabla C-3.** Características de los periodos secos registrados en la RH1. Elaboración propia.

CARACTERÍSTICAS DE LOS PERIODOS SECOS DE LA REGIÓN No. 1								
Estación		Número de años con registro	Periodos de sequias		Periodo de sequia más larga		Años secos	
Clave	Nombre		Duración promedio (años)	Periodicidad promedio (años)	Periodo	Duración (años)	Año más seco	% respecto a la media
5151	ALTO DE NORIAS	30	1.86	4.50	1998 - 2002	5	2011	32.4
5152	BAJAN	30	1.75	3.86	1994 - 1999	3	1999	3.6
19165	CHUPADEROS DEL INDIIO	30	2.50	5.00	1990 - 1996	7	1998	38.4
8247	COYAME (DGE)	30	2.50	4.40	1998 - 2003	6	1989	21.7
5044	CUATRO CIENEGAS (SMN)	30	1.86	4.00	1994 - 1996	3	2011	32.9
5011	EJIDO REATA	30	1.71	3.67	1996 - 1999	4	1998	28.6
5013	EJIDO SAN MIGUEL	30	2.00	4.40	1994 - 1996	3	2011	25.3
5158	EL TANQUITO	30	1.75	3.86	2001 - 2003	3	1989	33.9
8270	LA MESA	30	2.33	4.80	1996 - 2001	6	1993	7.7
8049	LUIS L. LEON	30	1.86	3.67	1992 - 1995	4	2011	19.4
5022	OCAMPO	30	2.50	5.60	1999 - 2003	5	1999	30.2
8254	OJINAGA (DGE)	30	2.33	4.20	2009 - 2012	4	2011	35.4
8202	PRESA FRANCISCO I. MADERO	30	2.00	3.83	1993 - 1995	3	2011	50.2
5140	RAMOS ARIZPE (DGE)	30	2.00	9.00	1998 - 2000	3	2000	8.1
19054	RINCONADA	30	2.33	4.40	1994 - 1996	3	2011	24.0
5164	SAN FRANCISCO NADADORES	30	2.00	4.50	1998 - 2002	5	2011	25.3
5038	SANTA TERESA	30	2.60	4.75	1992 - 1996	5	2012	5.9
TODAS		30	2.50	4.40	1998 - 2002	5	2011	41.3

**Tabla C-4.** Años secos (S-Amarillo) y húmedos (H-Azul) de la RH2. Elaboración propia.

<b>AÑOS SECOS Y HÚMEDOS DE LA RH2</b>				
<b>Año</b>	<b>Precipitación</b>	<b>Umbral</b>	<b>Diferencia</b>	<b>S / H</b>
1984	363.78	351.72	-5.24	S
1985	375.71	351.72	27.40	H
1986	472.03	351.72	90.66	H
1987	449.87	351.72	105.63	H
1988	484.64	351.72	160.14	H
1989	267.25	351.72	-88.64	S
1990	430.00	351.72	71.51	H
1991	402.26	351.72	42.90	H
1992	382.87	351.72	38.14	H
1993	323.12	351.72	-35.10	S
1994	267.28	351.72	-71.29	S
1995	271.91	351.72	-83.60	S
1996	309.62	351.72	-41.13	S
1997	438.43	351.72	95.36	H
1998	320.66	351.72	-24.44	S
1999	237.74	351.72	-109.59	S
2000	315.51	351.72	-44.38	S
2001	321.73	351.72	-33.49	S
2002	360.46	351.72	9.93	H
2003	428.52	351.72	99.64	H
2004	456.35	351.72	105.95	H
2005	368.97	351.72	40.20	H
2006	360.51	351.72	-2.39	S
2007	391.22	351.72	42.66	H
2008	472.64	351.72	93.50	H
2009	281.91	351.72	-69.84	S
2010	630.70	351.72	319.46	H
2011	153.33	351.72	-180.07	S
2012	230.97	351.72	-121.35	S
2013	498.83	351.72	163.40	H

**Tabla C-5.** Periodos secos registrados en la RH2. Elaboración propia.

PERIODOS SECOS DE LA RH2					
Periodo seco	Duración años	Periodo	Periodicidad años	Déficit acum (mm)	Intensidad mm / año
1	1	1984 - 1984		5.24	5.24
2	1	1989 - 1989	5	88.64	88.64
3	4	1993 - 1996	4	231.13	57.78
4	4	1998 - 2001	5	211.91	52.98
5	1	2006 - 2006	8	2.39	2.39
6	1	2009 - 2009	3	69.84	69.84
7	2	2011 - 2012	2	301.42	150.71
Media	2.00		4.50	130.08	61.08
Desv. Est.	1.41		2.07	117.97	50.84
Cv	0.71		0.46	0.91	0.83

**Tabla C-6.** Características de los periodos secos registrados en la RH2. Elaboración propia.

CARACTERÍSTICAS DE LOS PERIODOS SECOS DE LA REGIÓN No. 2								
Estación		Número de años con registro	Periodos de sequías		Periodo de sequia más larga		Años secos	
Clave	Nombre		Duración promedio (años)	Periodicidad promedio (años)	Periodo	Duración (años)	Año más seco	% respecto a la media
8044	DELICIAS (DGE)	30	1.44	2.88	1997 - 1999	3	2011	30.2
5163	EL GATO	30	1.75	3.14	2005 - 2007	3	2011	38.9
19170	EL HOJASE	30	2.33	5.40	1992 - 1996	5	1987	12.2
5167	EL MARQUEZ	30	2.00	4.40	1999 - 2002	4	2011	21.9
5016	GENERAL CEPEDA	30	1.71	4.17	1994 - 1995	2	2011	14.6
8081	JIMENEZ (DGE)	30	2.60	5.75	1992 - 1999	8	2011	31.0
19096	LA HUASTEQUITA	30	1.57	4.33	1992 - 1994	3	2009	44.3
5170	LA ROSA	30	1.86	4.50	1984 - 1986	3	2011	12.8
5155	LAMADRID	30	2.00	4.50	1998 - 2000	3	2003	4.8
19028	LAMPAZOS (SMN)	30	1.86	3.67	1993 - 1995	3	2008	30.8
19045	MINA	30	1.75	3.71	1993 - 1996	4	1994	49.4
5156	PALAU	30	1.63	3.71	1998 - 1999	2	1999	0.0
5030	PRESA VENUSTIANO CARRANZA	30	1.71	4.17	2009 - 2012	4	2011	34.9
5031	PROGRESO	30	1.86	4.50	1993 - 1996	4	2000	37.2
19158	RANCHO DE GOMAS	30	2.14	4.50	1989 - 1992	4	1989	30.9
19053	RAYONES	30	1.71	3.67	1993 - 1997	5	2009	54.8
5171	SACRAMENTO	30	2.14	4.50	1998 - 2003	6	2011	36.7
19055	SALINILLAS	30	2.00	3.67	2011 - 2013	3	2009	45.0
5048	SALTILLO (DGE)	30	2.33	5.40	1998 - 2001	4	2011	32.7
5145	SAN JUAN DE LA VAQUERIA	30	1.86	3.33	2009 - 2012	4	2011	24.5
TODAS		30	2.00	4.50	1993 - 1996	4	2011	41.6

**Tabla C-7.** Años secos (S-Amarillo) y húmedos (H-Azul) de la RH3. Elaboración propia.

<b>AÑOS SECOS Y HÚMEDOS DE LA RH3</b>				
<b>Año</b>	<b>Precipitación</b>	<b>Umbral</b>	<b>Diferencia</b>	<b>S / H</b>
1984	535.62	505.56	16.64	H
1985	538.56	505.56	15.02	H
1986	669.04	505.56	129.99	H
1987	592.41	505.56	84.50	H
1988	613.15	505.56	108.84	H
1989	392.35	505.56	-114.34	S
1990	502.46	505.56	4.67	H
1991	479.00	505.56	-26.16	S
1992	568.65	505.56	68.11	H
1993	517.47	505.56	11.77	H
1994	431.16	505.56	-68.42	S
1995	374.83	505.56	-131.92	S
1996	407.03	505.56	-94.08	S
1997	557.18	505.56	61.58	H
1998	421.98	505.56	-78.77	S
1999	385.88	505.56	-119.41	S
2000	455.18	505.56	-44.28	S
2001	457.65	505.56	-43.64	S
2002	575.53	505.56	84.41	H
2003	706.00	505.56	207.85	H
2004	687.61	505.56	167.82	H
2005	519.60	505.56	26.06	H
2006	533.65	505.56	16.28	H
2007	574.30	505.56	76.75	H
2008	677.68	505.56	156.95	H
2009	400.57	505.56	-104.67	S
2010	884.80	505.56	384.71	H
2011	261.94	505.56	-244.85	S
2012	353.63	505.56	-159.39	S
2013	715.75	505.56	212.82	H

**Tabla C-8.** Periodos secos registrados en la RH3. Elaboración propia.

PERIODOS SECOS DE LA RH3					
Periodo seco	Duración años	Periodo	Periodicidad años	Déficit acum (mm)	Intensidad mm / año
1	1	1989 - 1989		114.34	114.34
2	1	1991 - 1991	2	26.16	26.16
3	3	1994 - 1996	3	294.41	98.14
4	4	1998 - 2001	4	286.10	71.53
5	1	2009 - 2009	11	104.67	104.67
6	2	2011 - 2012	2	404.24	202.12
Media	2.00		4.40	204.99	102.83
Desv. Est.	1.26		3.78	144.60	58.10
Cv	0.63		0.86	0.71	0.56

**Tabla C-9.** Características de los periodos secos registrados en la RH3. Elaboración propia.

CARACTERÍSTICAS DE LOS PERIODOS SECOS DE LA REGIÓN No. 3								
Clave	Estación Nombre	Número de años con registro	Periodos de sequías		Periodo de sequía más larga		Años secos	
			Duración promedio (años)	Periodicidad promedio (años)	Periodo	Duración (años)	Año más seco	% respecto a la media
5002	ALLENDE (SMN)	30	1.86	4.00	1999 - 2002	4	1988	23.4
19024	ANAHUAC	30	2.00	3.67	1993 - 1996	4	1989	38.5
10141	CANUITILLO	30	2.17	4.60	1992 - 1995	4	1994	35.0
19009	CASILLAS	30	1.71	4.33	1994 - 1996	3	1995	45.2
19012	CIENEGA DE FLORES	30	2.40	5.50	1994 - 1998	5	1989	64.4
5149	CIENEGA DE LA PURISIMA	30	2.80	3.50	2008 - 2013	6	2011	15.3
19013	CIENEGA DEL TORO	30	2.33	4.40	2005 - 2009	5	2011	30.6
19105	DOCTOR GONZALEZ	30	1.57	4.33	1989 - 1991	3	1990	50.5
19117	EJIDO MARIN	30	1.11	2.88	2000 - 2001	2	2012	43.3
19016	EL CUCHILLO	30	2.17	5.40	1993 - 1996	4	1996	39.2
19018	EL PAJONAL	30	1.63	3.43	1994 - 1996	3	2011	51.6
19021	GARZA AYALA	30	2.80	6.75	1989 - 1996	8	2011	31.3
19022	GENERAL BRAVO (DGE)	30	2.14	4.50	1998 - 2002	5	1996	37.1
19124	HIGUERAS (DGE)	30	2.00	4.33	1998 - 2000	3	2012	36.1
19042	LOS RAMONES	30	2.40	5.50	1998 - 2001	4	2011	32.2
5148	POTRERO DE ABREGO	30	2.33	5.20	1993 - 1996	4	2011	31.2
8185	PRESA CHIHUAHUA (DGE)	30	2.80	6.00	1993 - 2001	9	2000	25.5
19131	PUERTO DEL EBANO	30	2.17	5.40	1994 - 1996	3	2011	23.8
5033	SABINAS (DGE)	30	1.75	3.86	1993 - 1995	3	2011	24.4
19133	SABINAS HIDALGO	30	1.75	3.71	1989 - 1991	3	2011	25.7
19134	SALINAS VICTORIA	30	2.00	4.50	1989 - 1992	4	1994	59.1
19178	SIERRA MORENA	30	1.86	3.67	1989 - 1992	4	1989	43.5
19063	VALLECILLO (DGE)	30	1.71	4.50	2004 - 2005	2	2004	20.9
19141	VILLALDAMA	30	1.75	3.71	1989 - 1991	3	2011	30.4
TODAS		30	2.00	4.40	1998 - 2001	4	2011	49.8

**Tabla C-10.** Años secos (S-Amarillo) y húmedos (H-Azul) de la RH4. Elaboración propia.

<b>AÑOS SECOS Y HÚMEDOS DE LA RH4</b>				
<b>Año</b>	<b>Precipitación</b>	<b>Umbral</b>	<b>Diferencia</b>	<b>S / H</b>
1984	686.79	629.51	21.89	H
1985	697.57	629.51	16.77	H
1986	744.82	629.51	119.23	H
1987	819.51	629.51	172.80	H
1988	812.89	629.51	291.48	H
1989	384.04	629.51	-190.58	S
1990	601.04	629.51	-30.85	S
1991	557.01	629.51	-43.11	S
1992	659.47	629.51	110.22	H
1993	577.22	629.51	-24.18	S
1994	465.52	629.51	-132.13	S
1995	483.79	629.51	-106.86	S
1996	505.90	629.51	-122.46	S
1997	714.62	629.51	117.08	H
1998	598.78	629.51	-26.56	S
1999	535.66	629.51	-92.92	S
2000	612.64	629.51	-30.75	S
2001	638.50	629.51	21.70	H
2002	792.14	629.51	192.04	H
2003	950.79	629.51	351.87	H
2004	838.26	629.51	189.09	H
2005	789.97	629.51	193.20	H
2006	635.26	629.51	-27.21	S
2007	676.43	629.51	95.30	H
2008	813.37	629.51	175.94	H
2009	614.58	629.51	-57.48	S
2010	1256.26	629.51	629.57	H
2011	346.50	629.51	-305.03	S
2012	546.56	629.51	-105.43	S
2013	918.66	629.51	305.54	H

**Tabla C-11.** Periodos secos registrados en la RH4. Elaboración propia.

PERIODOS SECOS DE LA RH4					
Periodo seco	Duración años	Periodo	Periodicidad años	Déficit acum (mm)	Intensidad mm / año
1	3	1989 - 1991		264.54	88.18
2	4	1993 - 1996	4	385.64	96.41
3	3	1998 - 2000	5	150.23	50.08
4	1	2006 - 2006	8	27.21	27.21
5	1	2009 - 2009	3	57.48	57.48
6	2	2011 - 2012	2	410.47	205.23
Media	2.33		4.40	215.93	87.43
Desv. Est.	1.21		2.30	163.74	63.05
Cv	0.52		0.52	0.76	0.72

**Tabla C-12.** Características de los periodos secos registrados en la RH4. Elaboración propia.

CARACTERÍSTICAS DE LOS PERIODOS SECOS DE LA REGIÓN No. 4								
Estación		Número de años con registro	Periodos de sequías		Periodo de sequia más larga		Años secos	
Clave	Nombre		Duración promedio (años)	Periodicidad promedio (años)	Periodo	Duración (años)	Año más seco	% respecto a la media
19002	AGUA BLANCA	30	1.75	3.86	1987 - 1987	4	2011	46.6
19010	CERRALVO (DGE)	30	3.00	6.75	1989 - 1996	8	1994	45.4
8267	EL VERGEL (DGE)	30	2.00	3.83	1991 - 1997	7	1989	0.8
19104	LA ESCONDIDA	30	1.44	3.38	1989 - 1991	3	2012	41.9
19033	LAGUNA DE SANCHEZ	30	1.63	3.71	1993 - 1995	3	1995	42.2
19047	MIMBRES	30	1.86	4.33	1997 - 2000	4	2011	40.9
5020	MUZQUIZ (DGE)	30	2.00	4.50	1999 - 2002	4	2011	23.2
19056	SAN JUAN	30	2.33	5.40	1989 - 1992	4	2011	51.4
19140	TEPEHUJAJE	30	2.80	6.75	1996 - 2000	5	1996	51.1
TODAS		30	2.33	4.40	1993 - 1996	4	2011	51.3



**Tabla C-13.** Años secos (S-Amarillo) y húmedos (H-Azul) de la RH5. Elaboración propia.

<b>AÑOS SECOS Y HÚMEDOS DE LA RH5</b>				
<b>Año</b>	<b>Precipitación</b>	<b>Umbral</b>	<b>Diferencia</b>	<b>S / H</b>
1984	824.64	830.77	-6.13	S
1985	708.49	830.77	-122.28	S
1986	1091.66	830.77	260.90	H
1987	951.19	830.77	120.42	H
1988	1134.28	830.77	303.51	H
1989	724.94	830.77	-105.83	S
1990	840.91	830.77	10.15	H
1991	824.44	830.77	-6.33	S
1992	908.71	830.77	77.95	H
1993	981.49	830.77	150.72	H
1994	742.91	830.77	-87.85	S
1995	872.00	830.77	41.23	H
1996	708.66	830.77	-122.10	S
1997	800.21	830.77	-30.55	S
1998	691.24	830.77	-139.53	S
1999	640.44	830.77	-190.33	S
2000	810.06	830.77	-20.70	S
2001	941.23	830.77	110.46	H
2002	1050.85	830.77	220.08	H
2003	1311.49	830.77	480.72	H
2004	1065.91	830.77	235.15	H
2005	1203.26	830.77	372.50	H
2006	729.66	830.77	-101.10	S
2007	912.50	830.77	81.73	H
2008	1115.81	830.77	285.05	H
2009	725.21	830.77	-105.55	S
2010	1565.19	830.77	734.42	H
2011	491.45	830.77	-339.32	S
2012	702.11	830.77	-128.65	S
2013	1248.13	830.77	417.36	H

**Tabla C-14.** Periodos secos registrados en la RH5. Elaboración propia.

PERIODOS SECOS DE LA RH5					
Periodo seco	Duración años	Periodo	Periodicidad años	Déficit acum (mm)	Intensidad mm / año
1	2	1984 - 1985		128.41	64.20
2	1	1989 - 1989	5	105.83	105.83
3	1	1991 - 1991	2	6.33	6.33
4	1	1994 - 1994	3	87.85	87.85
5	5	1996 - 2000	2	503.22	100.64
6	1	2006 - 2006	10	101.10	101.10
7	1	2009 - 2009	3	105.55	105.55
8	2	2011 - 2012	2	467.97	233.98
Media	1.75		3.86	188.28	100.69
Desv. Est.	1.39		2.91	187.25	63.49
Cv	0.79		0.75	0.99	0.63

**Tabla C-15.** Características de los periodos secos registrados en la RH5. Elaboración propia.

CARACTERÍSTICAS DE LOS PERIODOS SECOS DE LA REGIÓN No. 5								
Estación		Número de años con registro	Periodos de sequías		Periodo de sequia más larga		Años secos	
Clave	Nombre		Duración promedio (años)	Periodicidad promedio (años)	Periodo	Duración (años)	Año más seco	% respecto a la media
19003	ALLENDE	30	2.50	5.40	1994 - 2000	7	1999	47.4
19007	CABEZONES	30	2.17	5.20	1996 - 2000	5	2011	53.4
19146	CONGREGACION CALLES	30	1.63	3.86	1998 - 2000	3	1989	37.7
19015	EL CERRITO	30	1.63	3.86	1994 - 1997	4	2011	54.3
19069	LA BOCA	30	1.33	3.25	1998 - 1999	2	2011	60.5
19031	LA CRUZ	30	1.50	3.86	2011 - 2012	2	2001	31.2
19048	MONTEMORELOS	30	2.33	5.20	1996 - 2000	5	2011	50.9
19173	PALMITOS (GE)	30	1.75	3.86	1996 - 1998	3	1985	24.1
TODAS		30	1.75	3.86	1996 - 2000	5	2011	54.0