

Análisis regional de series de lluvias máximas: consideraciones

INTRODUCCIÓN

Para el estudio de las lluvias máximas es necesario el uso de herramientas estadísticas que permitan el análisis de los datos disponibles en una zona, logrando homogenizar dicha información y obteniendo conclusiones a partir de esta. Al realizar un estudio de precipitaciones máximas se presentan las siguientes dificultades: se cuenta generalmente con series diarias, por lo que resulta engorroso poder determinar el comportamiento de las precipitaciones para pequeñas duraciones y la determinación de la distribución de mejor ajuste, que logre reproducir el fenómeno de las lluvias máximas para períodos de retorno grandes.

El presente trabajo persigue como objetivos: recopilar los conocimientos actuales sobre el análisis regional de las series de eventos extremos máximos y evaluar las series de lluvias máximas de la cuenca del río Zaza mediante el método de análisis regional llamado índice de avenida.

ANÁLISIS REGIONAL DE FRECUENCIAS:

CARACTERÍSTICAS

La estimación de la frecuencia de los eventos extremos máximos es compleja, dado que son por definición excepcionales y los registros de las series de observaciones son demasiado cortos para poder extrapolar satisfactoriamente (Álvarez et al. 1999). De acuerdo con Hosking (1997), este problema se resuelve "paliando la carencia en el tiempo con la abundancia en el espacio". El análisis regional hidrológico de frecuencias suministra la forma de inferir eventos para ciertos periodos de retorno en sitios con escasa o nula información, a través del empleo de las características fisiográficas y/o de sus cuencas vecinas.

Resumen / Abstract

El presente trabajo aborda la temática del análisis regional de las series de lluvias máximas. Se ha realizado una recopilación de los aspectos tratados en la literatura en el análisis regional como la estimación de parámetros, el análisis de frecuencias y otros. Se muestran los resultados de un ejemplo de aplicación del método llamado "índice de avenida" propuesto por Dalrymple en 1960, a las series de máximos anuales de la cuenca del río Zaza. Se concluye que dicha cuenca, al dividirla en tres subregiones, éstas pueden considerarse como homogéneas y se ajustan a distribuciones teóricas de probabilidad diferentes.

Palabras clave: análisis regional, discordancia, factor de crecida, homogeneidad.

This paper presents a study about regional analysis of maximum rainfall series. A summary of several aspects usually covered in regional analysis is introduced, such as parameter estimation, frequency analysis and others. The results of an example using the so-called "index flood" method proposed by Dalrymple in 1960 are shown. The case study refers to the annual maximum rainfall series in the river Zaza basin. As a conclusion of the study in this basin, it can be established that when it is divided into three sub-regions, they can be considered as homogeneous and they can be adjusted to different theoretical probability distributions.

Keywords: regional analysis, disagreement, grown factor, homogeneity.

Las técnicas para el análisis regional hidrológico son las siguientes, las que pueden emplearse de manera complementaria (Escalante 2002):

- A) Técnica de las estaciones-año.
- B) Técnica de correlación y regresión múltiple.
- C) Método de Dalrymple, 1960.
- D) Aplicación regional de la transformación de Box-Cox.
- E) Método de los momentos estandarizados de probabilidad pesada.
- F) Método de estimación multivariada de valores extremos.

El análisis regional de forma general cumple con las siguientes etapas:

1. Selección de los equipos para el análisis regional.
2. Identificación de los equipos que conforman regiones homogéneas.
3. Estimación de parámetros.
4. Análisis de frecuencias.

La mayoría de las técnicas regionales se basan en series de máximos anuales y unas pocas en series de excedentes anuales. Hasta el momento se conocen en la literatura varios métodos para realizar el análisis de frecuencia de una serie de valores extremos. Por ejemplo se pueden mencionar el análisis de frecuencia tradicional, que se enfoca en el estudio de la serie de lluvia en una estación, ósea, en un punto, mientras que en los últimos tiempos ha tomado un gran auge el uso del análisis regional, el cual se basa en el análisis de las series de máximos anuales de las estaciones que se encuentran en una región, la que puede considerarse como homogénea desde un punto de vista estadístico.

A modo de comparación se pueden plantear las ventajas del análisis regional sobre el análisis tradicional:

- Sus resultados son aplicables a localidades no instrumentadas.
- Sus resultados son más confiables que los del análisis local cuando las longitudes de las series de lluvias son menores a 25 datos.
- Puede sustituir los registros de observaciones cortos con una distribución amplia en el espacio de equipos de medición de la lluvia.
- Aumenta la longitud de los registros disponibles mediante la transferencia de información de las diferentes estaciones que componen una región.

Selección de los equipos para el análisis regional

Para la selección de los equipos a emplear en el análisis regional se deben tener en cuenta los criterios que se enuncian a continuación:

I. Longitud de la serie a utilizar (N), para resolver este problema, los investigadores han seguido a través de la práctica, varios criterios que son los siguientes:

(Campos 1992) cita una serie de criterios para la selección de los equipos que serán utilizados en estudios hidrológicos que emplean series de lluvias mensuales y anuales. En el caso tratado en esta investigación, estos razonamientos no tienen utilidad, debido a que se están considerando series de máximos anuales (SMA), para las cuales este autor plantea que, el límite mínimo de longitud del registro a utilizar en una SMA será de 10 años.

II. Calidad de la serie de máximos anuales.

Para que los resultados de los análisis probabilísticos sean teóricamente válidos, la serie de datos históricos debe satisfacer ciertos criterios estadísticos: aleatoriedad, independencia, homogeneidad y estacionalidad (Campos-Aranda 2008). La aleatoriedad significa que las fluctuaciones de la variable son originadas por causas naturales; la independencia se refiere a que ningún dato de la serie está influenciado por valores anteriores, o que él no influye en los posteriores; la homogeneidad implica que los datos proceden de una misma población y, finalmente, la estacionalidad significa que las propiedades estadísticas de los datos no cambian en el tiempo.

Identificación de los equipos que conforman regiones homogéneas

La selección de las regiones homogéneas puede pensarse como un problema trivial, sin embargo la inclusión o no de información en el modelo puede provocar errores en las estimaciones. Hosking y Wallis (1997) aconsejan considerar para la formación de regiones homogéneas, características del sitio tales como la localización, la altitud, la precipitación, la estación en la que se producen los eventos máximos, etc.

La identificación de regiones homogéneas es normalmente la fase más difícil del análisis, ya que el criterio que se utiliza para la formación de regiones es que los lugares que la integran tengan idénticas distribuciones de frecuencias, exceptuando el factor de escala local de cada sitio, que representa el valor medio de la variable analizada en el punto en cuestión.

Cuatro criterios se manejan para la identificación de las zonas homogéneas. Estas técnicas no son excluyentes entre sí, sino que manejadas adecuadamente pueden ser complementarias y definir de manera más confiable la región homogénea. Los métodos son los siguientes: método geográfico, método de los trazos multidimensionales, método del coeficiente de variación y el método de la región de influencia (Escalante 2002).

Estimación de parámetros

El estudio de poblaciones estadísticas supone en general el conocimiento de la función de probabilidad que gobierna el comportamiento aleatorio de la variable de interés. En muchos casos sabemos o presumimos conocer la familia distribucional de una población. La estimación de uno o varios parámetros poblacionales desconocidos

es posible construyendo funciones de probabilidad de variables aleatorias muestrales, más conocidos como estimadores muestrales.

Dichos estimadores garantizaran un cálculo o una aproximación satisfactoria del parámetro poblacional desconocido siempre que cumplan propiedades de: insesgamiento o máxima simetría, varianza mínima o máxima concentración de los datos alrededor del parámetro estimado y máxima probabilidad.

En la bibliografía consultada se presentan los siguientes métodos para la estimación de parámetros:

1. Método de los Momentos.
2. Método de la Máxima Verosimilitud.
3. Método de los Momentos de Probabilidad Pesada.
4. Método de los Mínimos cuadrados.
5. Método de los L- Momentos.
6. Método del Principio de la Máxima Entropía.
7. Método de Estimación por Intervalos.

Análisis de frecuencia

La estimación de la frecuencia de un evento determinado, comienza por realizar una prueba de bondad de ajuste, para analizar a cuál de las distribuciones teóricas de probabilidad se ajusta mejor la serie de observaciones de la variable en estudio.

Las pruebas de bondad de ajuste empleadas en el análisis de las series de extremos máximos (precipitación y escurrimiento) son las siguientes: la prueba de Smirnov-Kolmogorov, la prueba de χ^2 , estadístico propuesto por Kite (1988), los papeles probabilísticos para diferentes distribuciones teóricas de probabilidad y el diagrama propuesto por Hosking y Wallis (1997) que emplea el principio de los L-momentos.

Entre las distribuciones que más se utilizan para ajustar las series de valores extremos están las siguientes: Exponencial, Gumbel, Logística, Normal, Uniforme, Parapeto Generalizada, Generalizada de Valores Extremos, Logística Generalizada, Log-Normal, Pearson Tipo III.

MÉTODO DEL ÍNDICE DE AVENIDA - FASES

El método del Índice de Avenida o Índice de Crecida (Castellari 2008), como también se le conoce, tiene como principio que la distribución de los eventos máximos en una región homogénea es la misma excepto por un factor de escala que refleja las características de las precipitaciones de cada estación.

$$h(T,d) = m_d \gamma_{T,d} \quad (1)$$

donde:

m_d : factor de escala, lluvia índice del sitio de interés (mm)

$\gamma_{T,d}$: factor de crecida adimensional de la zona

Este método, consta de dos fases para su aplicación, las cuales se detallan a continuación:

Fase I: Estimación del factor de crecida sobre bases regionales, la que se divide en tres etapas:

Etapa A- Análisis de la confiabilidad de los datos (Medida de discordancia, D).

Etapa B- Homogeneidad de la región (Medida de heterogeneidad, H).

Etapa C- Estimación de la distribución (Cálculo de los L-momentos regionales).

Etapa A- Análisis de la confiabilidad de los datos (Medida de discordancia, D).

Objetivo: Dado un grupo de estaciones de medición, buscar las estaciones macroscópicamente discordantes, para lo que se identifican:

1. Las series escasamente confiables (errores de escritura de las medidas, presencia de no-estacionalidad, etc.).
2. Los sitios con régimen de los extremos altamente discordantes del grupo de estaciones.

Procedimiento:

Cada sitio es representado por los L-momentos muestrales τ_2, τ_3, τ_4

τ_2 : L-coeficiente de variación (L-CV):

$$\tau_2 = \lambda_2 / \lambda_1 \quad (2)$$

τ_3 : L-coeficiente de asimetría (L-skewness o L- Skew):

$$\tau_3 = \lambda_3 / \lambda_2 \quad (3)$$

τ_4 : L-coeficiente de kurtosis (L-kurtosis o L- Kurt):

$$\tau_4 = \lambda_4 / \lambda_2 \quad (4)$$

donde:

λ_1 es el L-momento de orden 1 (Medida de la tendencia central), el valor comprendido de una muestra con dimensión 1.

λ_2 es el L-momento de orden 2 (Medida de la dispersión), el valor comprendido de la diferencia entre la mayor y la menor observación de una muestra con dimensión 2.

λ_3 es el L-momento de orden 3 (medida de asimetría).

λ_4 es el L-momento de orden 4 (medida de aplanamiento).

Se considera que el vector de L-momentos (L-CV, L-Skew, L- Kurt) de una estación determinada constituye un punto en un espacio tridimensional, por lo que un grupo de estaciones, producirá una nube de puntos en este espacio.

Cualquier punto que se ubique lejos del centro de gravedad del conjunto, deberá ser considerado como discordante o anómalo (se presenta un ejemplo de cómo se representaría un grupo de estaciones en dos dimensiones en la figura 1).

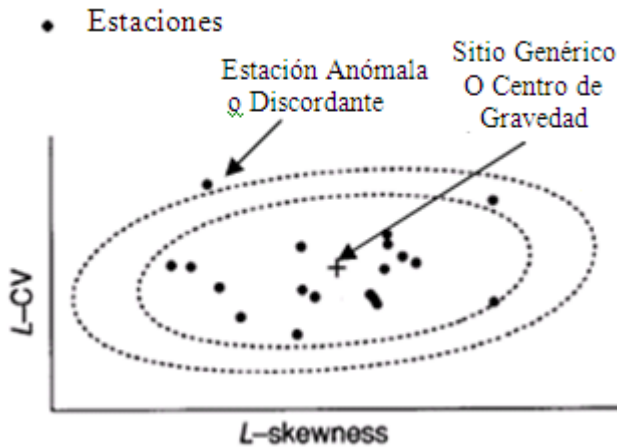


Figura 1.- Ejemplo de representación en dos dimensiones de un grupo de estaciones para determinar la anomalía de cada una de ellas respecto al centro de gravedad de la nube de puntos formada

Si se consideran N estaciones, el vector de los L-momentos adimensionales muestrales, u_i (i estación genérica) se determina por:

$$u_i = \left[\tau_2^{(i)} \quad \tau_3^{(i)} \quad \tau_4^{(i)} \right]^T \quad (5)$$

donde: τ_2 , τ_3 y τ_4 son los L- momentos muestrales de variación (L-CV), de asimetría (L-skewness) y de kurtosis (L-kurtosis) respectivamente y T representa la traspuesta.

Los L-momentos adimensionales medios, \bar{u} , se determinan por:

$$\bar{u} = N^{-1} \sum_{i=1}^N u_i \quad (6)$$

donde:

N: número de estaciones

entonces la matriz A se forma por:

$$A = \sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u})(u_i - \bar{u})^T \quad (7)$$

la misma cuantifica la distancia de todas las estaciones de los L-momentos medios (suma de los producto de los cuadrados). Por tanto la medida de anomalía, D, para el sitio i (expresa la distancia del sitio a los L-momentos medios en relación con la distancia media) será:

$$D_i = \frac{1}{3} N (u_i - \bar{u})^T A^{-1} (u_i - \bar{u}) \quad (8)$$

siendo la condición para declarar un sitio anómalo (si hay al menos 11 sitios) que $D \geq 3$.

Etapa B- Homogeneidad de la región (Medida de heterogeneidad, H).

Objetivo: Estimar el grado de heterogeneidad de un grupo de estaciones, para lo cual se compara la dispersión de los L-momentos adimensionales muestrales del grupo de estaciones con la dispersión obtenida para un grupo homogéneo. Esta etapa se define con la medida H, si la región puede considerarse homogénea o no, dándose los siguientes casos:

- Si $H < 1$ Baja heterogeneidad (el grupo de estaciones puede ser considerado homogéneo).
- Si $1 \leq H < 2$ Moderada heterogeneidad (el grupo de estaciones puede ser o no heterogéneo).
- Si $H \geq 2$ Alta heterogeneidad (la hipótesis de homogeneidad de la región está descartada)

Definición de la homogeneidad de la región.

Procedimiento:

1. Cálculo de los L-CV muestrales
2. Cálculo del L-CV regional, t_2^R , dado por:

$$t_2^R = \frac{\sum_{i=1}^N n_i t_2^{(i)}}{\sum_{i=1}^N n_i} \quad (9)$$

donde:

n_i : longitud de la muestra del sitio i

3. Cálculo de la desviación estándar de los L-CV muestrales (V), empleando la ecuación siguiente:

$$V = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N n_i (t_2^{(i)} - t_2^R)^2}{\sum_{i=1}^N n_i} \right\}^{1/2} \quad (10)$$

donde:

N: número de estaciones i , $t_2^{(i)}$: L-CV para el sitio i

4. Simulación de un número grande de regiones sintéticas, ($N_{sim} > 500$), siguiendo una distribución Kappa (4 parámetros) en la cual las series sintéticas tienen la misma longitud de las series históricas.

5. Cálculo de la media, μ_V , y de la desviación estándar, σ_V , de las regiones sintéticas generadas.

6. Cálculo de H, dado por:

$$H = \frac{(V - \mu_V)}{\sigma_V} \quad (11)$$

Etapa C- Estimación de la distribución (Cálculo de los L-momentos regionales).

Teniendo en cuenta el método del Índice de Avenida:

1. Para cada uno de los N sitios: se dividen las observaciones por la media muestral del sitio correspondiente (adimensionalización).

2. Cálculo de los L-momentos de las N series adimensionales.

3. Para la estimación de la distribución regional de frecuencia del factor de crecida, X' , se usa el método de los L-momentos imponiendo:

$$1. \lambda_1^R = 1 \quad (12)$$

$$2. \tau_i^R \approx t_i^R \quad \text{con } i = 2, 3, \dots y$$

$$\lambda_i^R = \frac{\sum_{i=1}^N n_i t_r^{(i)}}{\sum_{i=1}^N n_i} \quad (13)$$

Fase II: Estimación del factor de escala (disponibilidad de observaciones)

Esta fase se desarrolla en correspondencia con la disponibilidad de información en la zona en estudio, por lo que se pueden dar dos situaciones:

1. Contar con datos en el punto de interés, entonces el factor de escala será el valor medio de la variable analizada.

2. Contar con información en la cuenca, pero no con datos de la variable que se está examinando en el punto de interés, en este caso se debe obtener un modelo multirregresivo, evaluando en él varias variables que tengan relación con la analizada.

CASO DE ESTUDIO: CUENCA DEL RÍO ZAZA

Para el siguiente estudio ha sido empleado el método de análisis regional conocido como el método del Índice

de Avenida. De forma general el método plantea que los datos máximos anuales procedentes de varios sitios sean integrados o agregados y tratados como un solo registro (Campos-Aranda 2008), lo que permite trabajar con una serie más extensa para el análisis de frecuencias. Esta decisión, por supuesto, se tomaría dado que se cumplan algunos requisitos de carácter estadístico.

Se contó para el estudio con un total de 70 equipos ubicados uniformemente en la cuenca (figura 2).

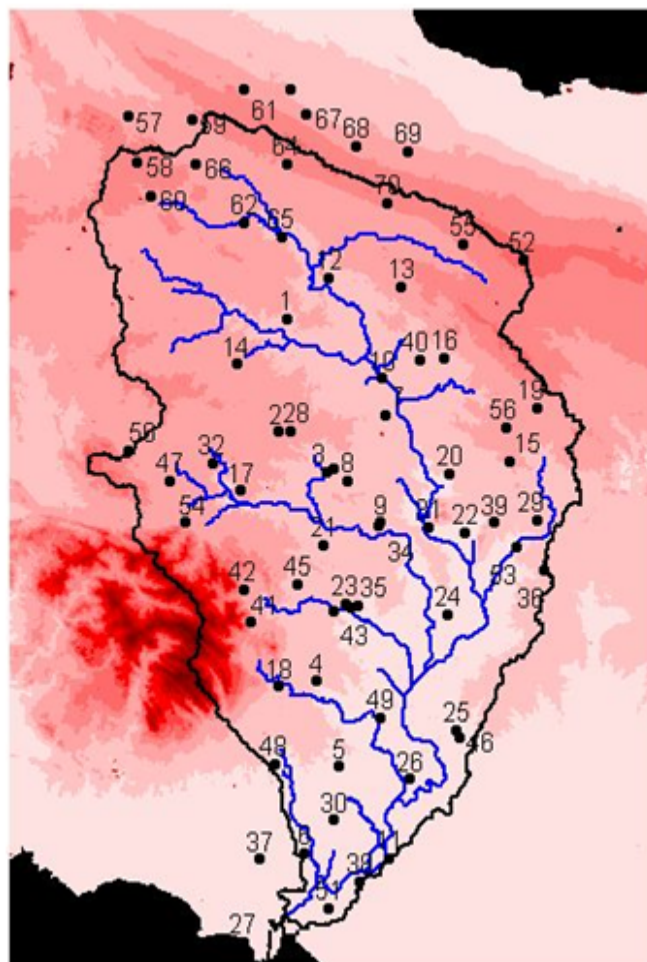


Figura 2.- Representación de los equipos pluviométricos en la cuenca en estudio

Conformación de las subzonas homogéneas

Con la información de los 70 pluviómetros se formaron las series de máximos anuales (tabla 2), para con éstas ejecutar el programa Xtest, que realiza el análisis regional empleando el método del Índice de Avenida.

En un primer intento se evaluaron las lluvias de todos los pluviómetros arrojando como resultado que no se puede considerar toda la cuenca como una región homogénea desde el punto de vista de las lluvias máximas, debido a que el valor de la medida de heterogeneidad, H es igual a 4.16, muy por encima del límite de una región homogénea que es 1.

Tabla 2.- Relación de los equipos empleados en el estudio

Nº	Código	Pmedia	Nº Datos	Cv	Pmáx	Nº	Código	Pmedia	Nº Datos	Cv	Pmáx
1	SS-422	107,99	39	0,47	229,5	39	SS-919	94,72	21	0,37	183,0
2	SS-423	101,66	53	0,39	254,0	40	SS-920	112,69	29	0,71	393,0
3	SS-432	122,67	63	0,49	331,5	41	SS-932	131,60	24	0,78	500,1
4	SS-433	123,14	53	0,53	355,6	42	SS-934	133,03	25	0,74	522,0
5	SS-435	118,74	44	0,55	384,5	43	SS-935	134,49	21	0,49	280,4
6	SS-436	117,22	44	0,67	400,8	44	SS-936	120,29	23	0,45	257,8
7	SS-450	103,19	57	0,52	357,0	45	SS-937	136,15	20	0,56	335,0
8	SS-451	119,14	39	0,50	357,7	46	SS-939	118,61	19	0,40	206,3
9	SS-454	107,53	66	0,57	312,0	47	SS-953	90,05	10	0,50	193,5
10	SS-502	103,78	34	0,61	345,8	48	SS-954	106,52	6	0,56	223,0
11	SS-614	94,31	26	0,48	255,0	49	SS-966	123,83	15	0,72	404,0
12	SS-765	97,15	33	0,44	225,0	50	SS-406	98,32	42	0,52	359,4
13	SS-766	103,16	31	0,54	250,5	51	SS-443	105,65	33	0,58	315,0
14	SS-768	103,81	26	0,55	276,5	52	SS-463	103,28	53	0,42	242,0
15	SS-769	101,56	28	0,38	225,0	53	SS-975	315,88	15	0,45	695,4
16	SS-772	103,34	21	0,45	256,3	54	SS-976	377,03	15	0,46	812,3
17	SS-775	122,26	29	0,78	494,8	55	SS-978	299,90	15	0,41	524,4
18	SS-778	103,56	25	0,44	231,0	56	SS-986	264,86	12	0,48	537,5
19	SS-779	96,64	31	0,44	238,2	57	VC-402	95,26	33	0,50	279,0
20	SS-780	114,23	33	0,51	311,5	58	VC-403	67,53	63	0,43	200,0
21	SS-781	111,45	23	0,48	226,0	59	VC-410	102,67	44	0,36	284,0
22	SS-783	110,47	25	0,41	256,0	60	VC-411	98,59	48	0,35	215,9
23	SS-784	114,44	25	0,50	291,7	61	VC-414	120,48	61	0,42	254,0
24	SS-788	122,81	36	0,49	290,4	62	VC-415	98,71	42	0,30	205,3
25	SS-795	116,38	21	0,31	175,3	63	VC-417	105,16	63	0,39	278,2
26	SS-796	122,65	25	0,70	487,0	64	VC-420	101,86	59	0,39	231,1
27	SS-860	144,93	31	0,79	480,0	65	VC-421	83,10	40	0,28	141,1
28	SS-862	120,15	32	0,57	393,8	66	VC-428	92,27	40	0,36	190,5
29	SS-863	124,85	32	0,61	370,0	67	VC-429	100,89	63	0,35	215,9
30	SS-864	132,46	31	0,75	475,9	68	VC-445	93,51	58	0,40	218,4
31	SS-865	113,82	32	0,52	296,0	69	VC-447	105,59	49	0,42	280,0
32	SS-866	122,15	32	0,73	536,0	70	VC-449	99,85	62	0,37	232,4
33	SS-867	108,46	32	0,57	331,0		Promedio	130,28	31	0,52	341,8
34	SS-868	109,19	31	0,52	293,50						
35	SS-869	125,24	34	0,40	257,80						
36	SS-875	102,76	25	0,51	294,5						
37	SS-897	119,75	23	0,63	375,5						
38	SS-918	141,54	29	0,76	605,7						

Nota: La Pmedia (Precipitación máxima media anual) y la Pmáx (Valor máximo para el equipo de la serie de máximos anuales) están en mm, el resto de los términos de la tabla son adimensionales. La nomenclatura SS significa Sancti Spiritus y VC representa la provincia Villa Clara, a la que pertenecen los equipos.

Seguidamente se trató de conformar subregiones a partir de los valores de la lluvia media máxima anual para cada equipo, contando con la información de los 70 pluviómetros, mediante el empleo del Sistema de Información Geográfica (SIG), ArcView v.3.3, obteniendo un mapa donde se representa esta variable. En este momento se obtuvo una delimitación de subregiones que no estaba muy bien definida, por lo que se procedió a eliminar del análisis los equipos con longitud de series menor de 20 datos (pluviómetros: SS-939, SS-953, SS-954, SS-966, SS-975, SS-976, SS-978 y SS-986), que además, algunos de ellos, registraban valores muy alejados del valor de la lluvia media máxima anual registrada en la zona.

Con los 62 equipos restantes se realizó la representación del comportamiento de los valores de la lluvia máxima media anual en el SIG, obteniendo como resultado tres regiones bien definidas (Figura 3), donde cada gama de color representa la división de la cuenca en zonas para el análisis regional.

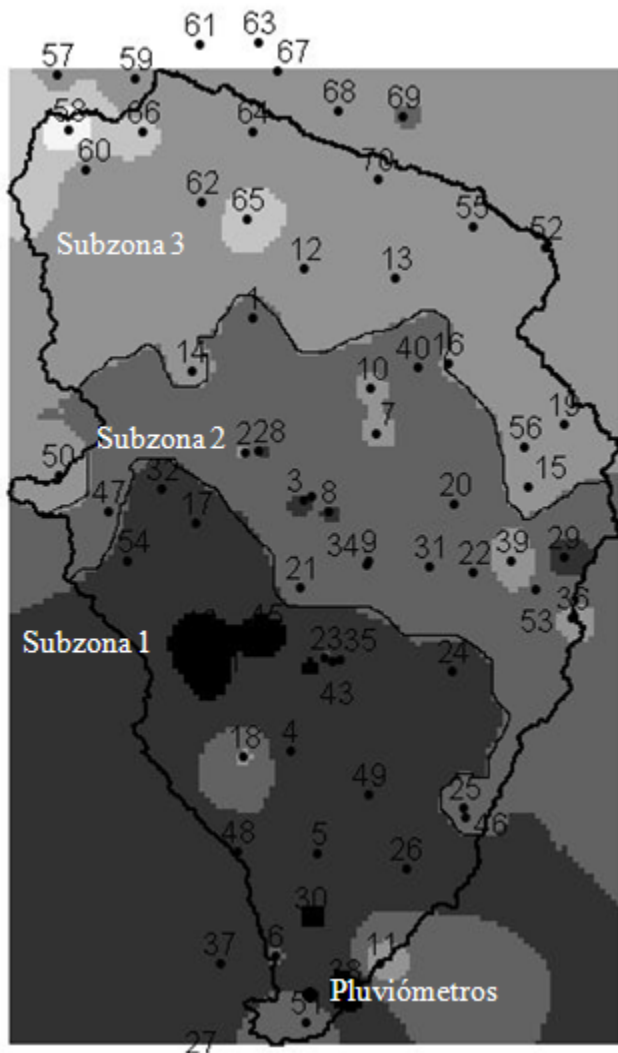


Figura 3.- Mapa de la cuenca con la ubicación de los pluviómetros y la representación del mapa de comportamiento de la lluvia máxima media.

En la tabla 3 se muestra el intervalo que representa cada una de las zonas para los valores de lluvia máxima media anual.

Tabla 3.- Intervalo en el que se mueve la lluvia máxima media anual para las diferentes zonas

Subzona	Intervalo lluvia (mm)
Subzona3	68,00 - 92,75
Subzona2	92,76 – 105,00
Subzona1	105,10 - 141,82

La tabla 4 relaciona los equipos que forman cada subzona para el estudio del análisis regional de las series de máximos anuales en la cuenca Zaza. El total de equipos para cada una es bastante similar por lo que no queda una subzona que tenga un número de pluviómetros muy superior o inferior a otra.

Análisis regional

Se explicará seguidamente como se procede a realizar el análisis regional en cada subzona de la cuenca.

Subzona 1

Aplicando el programa Xtest a la serie de valores de la subzona 1 se obtienen los resultados que se presentan en la tabla 4, donde se muestran los valores de los parámetros: L-coeficiente de variación (L-CV), L-coeficiente de asimetría (L-skew) y L-coeficiente de kurtosis (L-kurt), las longitudes de las series (N) y de la medida de discordancia (D(I)), además se muestran los valores de: la media del L-CV para la región simulada (μ_v), la desviación estándar del L-CV para la región simulada (μ_v) y para los valores observados (V) y el valor de la medida de Heterogeneidad (H).

Para este caso se obtiene que la región puede ser heterogénea y que existen dos estaciones anómalas (las sombreadas en gris en la tabla 4): la SS-614 y la SS-775. Se procedió entonces a eliminar éstas de la base de datos y correr nuevamente el programa Xtest, arrojando como resultado un valor de H igual a 0.56, por lo que ahora se puede considerar la subzona como homogénea.

El análisis de probabilidad dio como resultado que la distribución teórica de probabilidad regional es la Pearson tipo III, a partir de la cual se pueden obtener las láminas para las diferentes probabilidades en cualquiera de los sitios, multiplicando el factor de crecida (tabla 6) por el valor de lluvia máxima media de la estación.

Tabla 4.- Relación de los equipos que conforman cada subzona

Subzona 1		Subzona 2		Subzona 3	
Nº	Nº Control	Nº	Nº Control	Nº	Nº Control
4	SS-433	1	SS-422	12	SS-765
5	SS-435	2	SS-423	13	SS-766
6	SS-436	3	SS-432	14	SS-768
11	SS-614	7	SS-450	15	SS-769
17	SS-775	8	SS-451	16	SS-772
18	SS-778	9	SS-454	19	SS-779
23	SS-784	10	SS-502	50	SS-406
24	SS-788	20	SS-780	52	SS-463
26	SS-796	21	SS-781	57	VC-402
27	SS-860	22	SS-783	58	VC-403
30	SS-864	25	SS-795	59	VC-410
32	SS-866	28	SS-862	60	VC-411
35	SS-869	29	SS-863	61	VC-414
37	SS-897	31	SS-865	62	VC-415
38	SS-918	33	SS-867	63	VC-417
41	SS-932	34	SS-868	64	VC-420
42	SS-934	36	SS-875	65	VC-421
43	SS-935	39	SS-919	66	VC-428
44	SS-936	40	SS-920	67	VC-429
45	SS-937			68	VC-445
51	SS-443			69	VC-447
				70	VC-449

Subzona 2

De la misma forma se procedió en la subzona 2, obteniendo los valores que se muestran en la tabla 7, en este caso no fue necesario eliminar ninguna estación de la subzona resulto ser homogénea con los 19 equipos originales.

Para este caso se obtuvo que la distribución de mejor ajuste fue la Wakeby, mostrándose los resultados del factor de crecida en la tabla 8:

Subzona 3

La subzona 3 fue analizada de la misma manera que las anteriores. El resultado de este análisis fue que esta región no puede considerarse homogénea, a pesar de que ninguna de las estaciones presenta anomalía, como se muestra en la tabla 9, donde además se observa que la heterogeneidad de esta subzona es alta.

Se hicieron varios intentos de homogeneizar la región, eliminando primeramente los equipos que presentaban los valores medios (de la serie de lluvias máximas anuales) más dispersos, pero la heterogeneidad persistía. Luego

se procedió a eliminar los equipos que quedaban fuera de la cuenca y nuevamente se obtuvo el resultado de que la subzona no es homogénea.

La subzona 3 está caracterizada por ser la parte alta de la cuenca (figura 2), es por ello que el efecto de la orografía incide en el comportamiento estadístico de las series de máximos anuales en esta región. Teniendo en cuenta este aspecto se procedió a seleccionar sólo las estaciones (de esta subzona) que se encontraban en la zona de sotavento para que lograr que se cumpliera el principio de homogeneidad.

En un primer intento quedaron 13 estaciones para el análisis, dando que una de ella se comportaba como anómala y la medida de heterogeneidad, H tomó un valor de 1,18, el cual se acerca más a cumplir la condición de homogeneidad. Al eliminar la estación discordante mejoró el valor de H pero no mucho, por lo que se decidió excluir la estación cuyo valor de D estaba más cerca de 3 (SS-406), logrando un resultado de H de 0,77, el que se considera satisfactorio para el estudio de homogeneidad. Este último resultado se muestra en la tabla 10.

Tabla 5.- Resultados de la aplicación del programa Xtest a la subzona 1

Nº	N	Nº Control	L-CV	L-Skew	L-Kurt	D(I)
1	54	SS-433	0.4149	0.1698	0.2009	0.27
2	45	SS-435	0.4351	0.1229	0.0979	0.14
3	44	SS-436	0.4335	0.1859	0.2152	0.46
4	26	SS-614	0.2951	-0.0156	0.2336	3.09
5	29	SS-775	0.2990	0.0745	0.0810	3.86
6	25	SS-778	0.4879	0.1488	0.0686	0.33
7	25	SS-784	0.3937	0.1641	0.1240	0.94
8	36	SS-788	0.4101	0.1510	0.1636	0.11
9	25	SS-796	0.6015	0.2600	-0.0425	1.41
10	31	SS-860	0.4432	0.2885	0.3336	2.92
11	31	SS-864	0.5629	0.2358	0.0300	0.68
12	32	SS-866	0.5498	0.1713	-0.0751	1.18
13	34	SS-869	0.3879	0.1216	0.0936	0.67
14	23	SS-897	0.3869	0.1624	0.2285	0.48
15	29	SS-918	0.4647	0.2338	0.2064	0.70
16	24	SS-932	0.5262	0.1504	-0.0460	0.90
17	25	SS-934	0.4347	0.0761	0.1037	1.26
18	23	SS-936	0.4233	0.1557	0.1270	0.09
19	20	SS-937	0.4419	0.1047	0.1003	0.55
20	33	SS-443	0.5761	0.2569	0.0211	0.91
21	21	SS-935	0.4757	0.1751	0.1013	0.05
V = 0.077			$\mu_V = 0.0587$	$\sigma_V = 0.0099$	H = 1.84 *	

Tabla 6.- Valores del factor de crecida de la subzona 1 para las diferentes probabilidades según la distribución Pearson tipo III.

Probabilidad	0.100	0.200	0.500	0.800	0.900
Factor de crecida	0.05	0.31	0.85	1.64	2.14
Probabilidad	0.950	0.980	0.990	0.999	1.000
Factor de crecida	2.61	3.19	3.61	4.94	6.20

Tabla 7.- Resultados de la aplicación del programa Xtest a la subzona 2.

Nº	N	Nº Control	L-CV	L-Skew	L-Kurt	D(I)
1	39	SS-422	0.4651	0.1430	0.1030	0.29
2	53	SS-423	0.3514	0.0681	0.2258	1.45
3	63	SS-432	0.4201	0.1899	0.1933	1.12
4	57	SS-450	0.3897	0.1101	0.1393	0.42
5	39	SS-451	0.3886	0.0425	0.1057	0.37
6	66	SS-454	0.4260	0.2239	0.1903	2.10
7	34	SS-502	0.2831	-0.0059	0.1391	2.90
8	33	SS-780	0.4837	0.1561	0.0436	0.24
9	23	SS-781	0.6143	0.2654	-0.0683	2.71
10	25	SS-783	0.4156	0.0759	0.0745	0.11
11	21	SS-795	0.4386	0.0331	-0.0062	0.85
12	32	SS-862	0.4159	0.1200	0.1782	0.91
13	32	SS-863	0.4553	0.0874	0.0024	0.52
14	31	SS-864	0.5629	0.2358	0.0300	1.23
15	32	SS-865	0.4089	0.0841	0.0800	0.21
16	32	SS-867	0.4283	0.0278	0.0356	0.87
17	31	SS-868	0.4565	0.0900	0.0465	0.22
18	25	SS-875	0.4634	0.1236	0.1292	1.55
19	21	SS-919	0.4659	0.0566	-0.0324	0.93

$$V=0.0640 \quad \mu_V = 0.0541 \quad \sigma_V = 0.0100 \quad H = 0.99$$

Tabla 8.- Valores del factor de crecida de la subzona 2 para las diferentes probabilidades según la distribución Wakeby

Probabilidad	0.100	0.200	0.500	0.800	0.900
Factor de crecida	0.07	0.26	0.89	1.72	2.12
Probabilidad	0.950	0.980	0.990	0.999	1.000
Factor de crecida	2.38	2.60	2.71	2.87	2.91

Tabla 9.- Resultados de la aplicación del programa Xtest a la subzona 3.

Nº	N	Nº Control	L-CV	L-Skew	L-Kurt	D(I)
1	33	SS-765	0.5670	0.2791	0.1012	1.68
2	32	SS-766	0.4978	0.2261	0.1866	2.01
3	26	SS-768	0.5770	0.1905	-0.1111	1.78
4	28	SS-769	0.5427	0.1775	-0.0423	0.75
5	21	SS-772	0.4111	0.2522	0.2461	1.65
6	32	SS-779	0.5623	0.1931	-0.0547	0.90
7	42	SS-406	0.3838	0.0586	0.1104	0.20
8	53	SS-463	0.3849	0.1169	0.1872	0.23
9	33	VC-402	0.5233	0.2091	0.0978	0.90
10	63	VC-403	0.6017	0.2571	-0.0502	1.30
11	44	VC-410	0.4175	-0.0287	-0.0094	1.43
12	48	VC-411	0.4354	0.0758	0.0617	0.16
13	61	VC-414	0.3840	0.1645	0.1738	0.96
14	42	VC-415	0.4426	0.0462	0.0228	0.49
15	63	VC-417	0.3680	0.0753	0.1421	0.27
16	59	VC-420	0.3437	0.0702	0.1946	0.38
17	40	VC-421	0.3550	-0.0975	0.0687	2.64
18	40	VC-428	0.4516	0.1176	0.0880	0.08
19	63	VC-429	0.3817	0.0962	0.0997	0.88
20	58	VC-445	0.3195	0.0932	0.2570	0.81
21	49	VC-447	0.3571	0.0681	0.2309	1.09
22	62	VC-449	0.2991	0.0669	0.2081	1.41
$V=0.0886 \quad \mu_V = 00.0487 \quad \sigma_V = 0.0080 \quad H = 4.99^{**}$						

Tabla 10.- Resultados de la aplicación del programa Xtest a la subzona 3, para la última prueba.

Nº	N	Nº Control	L-CV	L-Skew	L-Kurt	D(I)
1	33	SS-765	0.5670	0.2791	0.1012	1.53
2	32	SS-766	0.4978	0.2261	0.1866	1.61
3	26	SS-768	0.5770	0.1905	-0.1111	1.02
4	28	SS-769	0.5427	0.1775	-0.0423	0.33
5	32	SS-779	0.5623	0.1931	-0.0547	0.48
6	12	SS-986	0.5834	0.2479	-0.0293	0.50
7	44	VC-410	0.4175	-0.0287	-0.0094	0.87
8	48	VC-411	0.4354	0.0758	0.0617	1.23
9	42	VC-415	0.4426	0.0462	0.0228	0.22
10	40	VC-421	0.3550	-0.0975	0.0687	2.00
11	40	VC-428	0.4516	0.1176	0.0880	1.20
$V=0.0718 \quad \mu_V = 00.0607 \quad \sigma_V = 0.0143 \quad H = 0.77$						

Tabla 11.- Valores del factor de crecida de la subzona 3 para las diferentes probabilidades según la distribución Parapeto Generalizada.

Probabilidad	0.100	0.200	0.500	0.800	0.900
Factor de crecida	-0.04	0.17	0.89	1.81	2.24
Probabilidad	0.950	0.980	0.990	0.999	1.000
Factor de crecida	2.51	2.74	2.84	2.99	3.03

La distribución de mejor ajuste para esta subzona fue la Parapeto Generalizada, mostrándose los resultados del factor de crecida en la tabla 11:

CONCLUSIONES

El método de análisis regional del Índice de Avenida constituye una alternativa útil y toma en consideración las deficiencias de los métodos de análisis local, aumentando la longitud de los registros disponibles mediante la transferencia de información de las diferentes estaciones pluviométricas que componen una supuesta región.

Al identificar regiones homogéneas existe la posibilidad de realizar estudios de frecuencia más certeros, además este puede ser el camino a transitar para la obtención de las curvas que relacionan la intensidad, la frecuencia y la duración de la lluvia (curvas IFD) en zonas donde no existen registros pluviográficos.

Se puede plantear que para la cuenca Zaza se cuenta con un estudio de análisis regional que brinda los índices de crecidas para dos regiones importantes de la cuenca, donde se producen los mayores valores de precipitación, a partir de los cuales se pueden nutrir los diferentes estudios hidrológicos de dicha cuenca.

Se logró representar la cuenca por tres regiones, lográndose homogenizar dichas zonas, determinándose además el factor de crecida para los diferentes valores de probabilidad, representadas por la distribución Pearson tipo III para la primera subzona, por la Wakeby para la región 2 y la Parapeto Generalizada para la subzona 3.

REFERENCIAS

1. **Álvarez, M., Puertas, J., Soto, B. y Díaz-Fierros, F.** (1999). "Análisis regional de las precipitaciones Máximas en Galicia mediante el método del índice de avenida." Ingeniería del Agua, Num. 4, Vol. 6 pp 379-386.
2. **Campos-Aranda, D.F.** (2008). "Ajuste regional de la distribución Gve en 34 estaciones pluviométricas de la zona huasteca de San Luis Potosí, México." Agrociencia, Num. 1, Vol 42, pp 57-70.
3. **Campos, D. F.** (1992). "Procesos del Ciclo Hidrológico". Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México, 524 pp.
4. **Castellarin, A.** (2008). "Analisi di Frequenza delle Serie Idro-pluviometriche. Approcci tradizionali e tecniche innovative basate sugli L-momenti". Corso di aggiornamento e specializzazione. DISTART. Università di Bologna - IILA.
5. **Escalante, C. A. R., L.** (2002). "Técnicas Estadísticas en Hidrología". Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.
6. **Hosking, J. R.** (1997). "Regional frequency analysis: an approach based on L-moments". Cambridge Univ. Press, New York.
7. **Hosking, J.R., Wallis, J.R.** (1997) "Regional Frequency Analysis", Cambridge University Press, U.K.
8. **Kite, G.W.** (1988). "Frequency and risk analysis in Hydrology". Water Resources Publications. USA, 257 pp.

Recibido: marzo del 2011

Aprobado: abril del 2011