



## Análisis regional de frecuencia de precipitación anual para la determinación de mapas de sequías en las cuencas Chillón, Rímac, Lurín y Alto Mantaro

### Regional analysis of annual rainfall frequency for the drought maps in the Chillón, Rimac, Lurin and High Mantaro Basins

JULIA ACUÑA \*<sup>1</sup>, OSCAR FELIPE<sup>1</sup> & CARLOS FERNANDEZ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), Lima 11, Perú

#### RESUMEN

Desde un enfoque probabilístico y regional se analizó dos eventos teóricos de sequías correspondientes al 80% y 60% de déficit de precipitación a la esperada en un año normal, basado en el análisis regional de frecuencia con L Momentos (ARFLM). Este método permite incorporar datos provenientes de estaciones dentro de una región homogénea para mejorar la precisión en las estimaciones de la relación probabilidad cuantil en todos los sitios, de esta manera se compensa la falta de información de registros cortos de cada estación. El área en estudio está ubicada en la zona central del Perú y abarca las cuencas de los ríos Chillón, Rímac, Lurín y Alto Mantaro (CRLAM), tienen una superficie total de 15 081 km<sup>2</sup>, albergan zonas semiáridas y áridas; son cuencas de gran importancia económica y social por su abastecimiento de agua para uso energético y poblacional de Lima y Callao. El área de estudio presenta 4 regiones homogéneas de precipitación, basadas en registros de 41 estaciones. La función de probabilidad de mejor ajuste en común es la Logística Generalizada. Para situaciones de una deficiencia de 80% de lluvia es decir 0.2 de la precipitación normal la sequía tiene períodos de retorno de 25 a 4700 años, las zonas menos vulnerables serán las cuencas altas del Chillón, Rímac y Lurín y la cuenca total Alto Mantaro con períodos de retorno de 100 a 4700 años; las zonas más vulnerables serán las cuencas media y baja del Chillón, Rímac y Lurín con períodos de retorno de 25 a 100 años. Para situaciones de una deficiencia de 60% de lluvia es decir 0.4 de la precipitación normal, el período de retorno de una sequía sería de 7 a 393 años, las zonas menos vulnerables serían las cuencas altas del Chillón, Rímac y Alto Mantaro con períodos de retorno de 50 a 393 años y las zonas más vulnerables serían las cuencas media y baja del Chillón y Rímac; así como la cuenca total Lurín con períodos de retorno de 7 a 50 años.

**Palabras claves:** Sequía, Análisis regional de frecuencia, L-Momentos, Rímac

#### ABSTRACT

From a regional, probabilistic approach, two theoretical drought events were analyzed corresponding to 80% and 60% of rainfall deficit than expected in a normal year, based on the regional frequency analysis with L Moments (ARFLM). This method allows incorporating data from stations within a homogeneous region to improve accuracy in estimating with the probability quantile function in every site, this way it is compensated the lack of information due to short records of each station. The study area is located in the central zone of Peru and it covers the basins of the Chillón, Rimac, Lurin and UpperMantaro(CRLAM Spanish acronym)) rivers, with a total area of 15 081 km<sup>2</sup> that includes semi-arid and arid areas. These basins are of great economic and social importance because they supply water for energy generation and consumption for the population of Lima and Callao. The study area has four homogeneous regions of precipitation, based on records of 41 stations. The probability function that better fits, in common, is the generalized logistic distribution. In a situation of 80% of rainfall deficiency, i.e. 0.2 of normal rainfall, drought shows return periods from 25 to 4700 years, less vulnerable areas would be the Chillón, Rimac and LurinUpper basins and the wholeupper Mantaro basin with return periods from 100 to 4700 years; the most vulnerable areas would be the middle and lower basins of Chillón, Rimac and Lurin with return periods of 25 to 100 years. In a situation of 60% of rainfall deficiency, i.e. 0.4 of normal rainfall, drought return period would be from 7 to 393 years, less vulnerable areas would be the upper basins of the Chillón, Rimac and Upper Mantarowith return

\*jacuna@senamhi.gob.pe

periods from 50 to 393 years, and the most vulnerable areas would be the middle and lower basins of Chillón and Rimac; and the whole Lurín basin with return periods from 7-50 years.

**Keywords:** Droughts, Regional Frequency Analysis, L-Moments, Rímac.

## INTRODUCCIÓN

Dado los impactos que ocasiona la sequía, el Panel Intergubernamental para el cambio climático creado por la ONU (Organización de las Naciones Unidas) ha colocado recientemente a Latinoamérica entre las regiones que pueden verse afectadas con el incremento en la intensidad, duración y frecuencia de estos episodios, debido a su alto nivel de vulnerabilidad; por ello, numerosos países han iniciado la implementación de programas destinados a la gestión nacional de riesgos de origen hidrometeorológico, motivando a que se realicen esfuerzos para evaluar y monitorear la presencia e impactos de episodios de sequía, a fin de mostrar evidencias sobre los desequilibrios creados en torno a la disponibilidad de agua (Dai et al., 2009) y las implicaciones futuras que se puedan generar de cumplirse las previsiones arrojadas por los modelos de cambio climático (Milly et al., 2005).

La sequía es uno de los desastres más complejos, y afecta en muchas partes del mundo, causando pérdidas económicas y sociales. Para la definición de sequía es común encontrar en la literatura perspectivas conceptuales y operacionales, sin embargo, el punto común en las diferentes definiciones es la situación de déficit o escasez prolongada de los recursos hídricos capaz de provocar efectos adversos en la sociedad o los sistemas productivos (Marcos O., 2001). La presencia de las sequías suele ser lenta y, a menudo, no se reconoce hasta que las actividades humanas o el medio ambiente quedan afectados; e incluso sus efectos pueden persistir mucho tiempo después de que haya terminado (Changnon y Easterling, 1989 mencionado en Ferre E., 2012).

Por tanto, el objetivo del presente estudio es analizar y mapear el período de retorno de una sequía teórica severa correspondiente al 80% y 60% de déficit de precipitación a la esperada en un año normal, en las cuencas de los ríos Chillón, Rímac, Lurín y cuenca Alto Mantaro (CRLAM), basado en la metodología de Análisis Regional de Frecuencia con L Momentos (ARFLM); este método fue utilizado también con mucho éxito en la elaboración del Atlas de sequías de EE.UU. (Werick et al., 1995), en el análisis regional de frecuencia para el mapeo de eventos de sequías al norte-centro de Chile (Nuñez et al., 2011) y en el análisis regional de frecuencia de precipitación anual para la determinación de mapas de sequías al norte de Perú (Acuña, et al., 2011), entre otros.

## METODOLOGÍA

### Descripción del area de estudio

Las CRLAM políticamente comprende parte del territorio de los departamentos de Lima, Junín y Pasco. Altitudinalmente, se emplaza entre niveles que varían de 0 y 5647 ms.n.m., y se extiende entre las coordenadas 75°49'2" y 77°14'30" de longitud oeste; y 10°33'36.7" y 12°11'36.2" de latitud sur. Hidrográficamente, las cuencas de los ríos Chillón, Rímac y Lurín se ubican en la Región hidrográfica del Pacífico y la cuenca del Alto Mantaro en la Región hidrográfica del Atlántico.

Según la clasificación climática del Perú elaborado por SENAMHI, 1988, las CRLAM presentan seis tipos de climas que se describen en la Tabla 1; el clima semifrío y lluvioso predomina en gran parte de su territorio, equivalente al 59.1% del total de las cuencas y un clima frío y lluvioso en una menor extensión equivalente al 3.9% del total.

El SENAMHI-DGH (2014), indica que la precipitación y caudal medio multianual en el período 1981-2010 de las cuencas Chillón, Rímac, Lurín y Alto Mantaro respecto al área de control hidrométrico en Puente Magdalena, Chosica, Manchay Bajo y Malpaso respectivamente presentan módulos que se indica en la Tabla 2, siendo la cuenca del Alto Mantaro la de mayor aporte hídrico con 50.1 m<sup>3</sup>/s y la cuenca de Lurín la de menor aporte hídrico con 3.2 m<sup>3</sup>/s.

**Tabla 1.** Clasificación climática de CRLAM

Tipos	Descripción	Código	Área ( $km^2$ )	Área (%)
1	Zona de clima semifrío, lluvioso, con deficiencia de lluvia en invierno con humedad relativa calificada como húmeda.	$B(i)D'H_3$	8908	59.1
2	Zona de clima frío, lluvioso, con deficiencia de lluvias en otoño e invierno, con humedad relativa calificada como húmeda	$B(o, i)C'H_3$	589	3.9
3	Zona semiseca, semifría, con deficiencia de lluvias en otoño, invierno y primavera, con humedad relativa calificada como húmeda.	$C(o, i, p)B'_3H_3$	1235	8.2
4	Zona semiseca, templada, con deficiencia de lluvias en otoño, invierno y primavera, con humedad relativa calificada como húmeda.	$C(o, i, p)B'_2H_3$	1056	1
5	Zona desértica semicálida, con deficiencia de lluvias en todas las estaciones del año, y con humedad relativa calificada como húmeda.	$E(d)B'_1H_3$	3005	2
6	Área con nevados/lagunas	N	286	3
Total			15081	

**Tabla 2.** Precipitación y caudales promedio multianuales período 1981–2010

Cuenca	Estación de control	Área de la cuenca ( $km^2$ )	Precipitación (mm)	Caudales ( $m^3/s$ )
Chillón	Pte. Magdalena	2222.3	272.2	5.9
Rímac	Chosica	3503.9	328.3	32.2
Lurín	Manchay Bajo	1642.5	208.3	3.2
Alto Mantaro	Malpaso	7727.9	699.8	50.1
Total		15081.2		

### Fuente de datos

Se analizaron datos de precipitación total mensual de 59 estaciones que corresponden a la red de observación nacional administrada y operada por Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) y de Electro Perú (cuenca del Mantaro, códigos que empiezan con 2 y 3). La longitud de los registros disponibles varía de 13 (Estación Carac) a 58 (Estación Von Humboldt) años distribuidos en el período 1930–2013. La Tabla 3 presenta información sobre la ubicación geográfica, la longitud de registros y coeficiente de variación de la red de estaciones evaluadas. Cabe mencionar que no se realizó ningún procedimiento para el relleno de datos faltantes.

La Figura 1 muestra la distribución espacial de las estaciones evaluadas sobre el mapa de precipitación normal (PMA) representativo del período 1981–2010, el cual se caracteriza por presentar lluvias de 6 a 954  $mm\ a\ a\ o^{-1}$ , y refleja una relación directa con la altitud, debido a la gran influencia del factor orográfico de las CRLAM.

### Herramientas de análisis

Para el presente trabajo se analizaron las siguientes herramientas:

- Códigos en R elaborado por Nuñez J., 2011; denominado RSARFLM v.1. que comprende opciones de análisis, salidas tabulares, gráficos y mapas y adaptados por Fernandez C, 2014.
- Sistema de información geográfica. ArcGIS v 10.1 para la edición de mapas temáticos.
- Programa Xlstat v.2014 demo, para el análisis de los supuestos de homogeneidad, estacionariedad e independencia.

## ANÁLISIS REGIONAL DE SEQUÍAS EN EL CENTRO DEL PERÚ

**Tabla 3.** Estaciones de precipitación utilizadas para el ARFLM donde: LR es la longitud de registros y Cv es el coeficiente de variación

N°	Código	Estación	Cuenca	Longitud (°O)	Latitud (°S)	Elevación (ms.n.m)	n	CV
1	604	La Oroya	Mantaro	75.97	11.58	4007	19	0.25
2	629	Oroya Fundición	Mantaro	75.9	11.52	3745	27	0.17
3	151204	Arahuay	Chillón	76.7	11.62	2800	28	0.36
4	151205	Canchacalla	Rímac	76.53	11.84	2554	24	0.54
5	151209	Chosica	Rímac	76.73	11.93	850	21	1.49
6	151210	Río Blanco	Rímac	76.26	11.73	3550	24	0.31
7	151213	Sheque	Rímac	76.5	11.67	3214	19	0.36
8	151214	Langa	Rímac	76.4	12.1	2860	29	0.5
9	155107	Pampa Libre	Huaura	76.97	10.87	1800	38	0.58
10	155111	Tingo	Rímac	76.48	11.62	4200	17	0.23
11	155112	Pariacancha	Chillan	76.5	11.38	3800	44	0.19
12	155113	Mina Colqui	Rímac	76.48	11.58	4600	20	0.26
13	155115	Carhuacayan	Mantaro	76.28	11.2	4150	36	0.18
14	155119	Chalilla	Lurin	76.33	11.93	4050	14	0.44
15	155121	Yantac	Mantaro	76.4	11.33	4600	42	0.31
16	155122	Autisha	Rímac	76.61	11.74	2171	30	0.46
17	155200	Paccho	Huaura	76.93	10.95	3250	33	0.4
18	155201	Andajes	Huaura	76.9	10.78	3950	41	0.27
19	155202	Santa Cruz	Huaura	76.63	11.2	3700	22	0.18
20	155203	Carac	Chancay Huaral	76.78	11.18	2600	13	0.31
21	155204	Pachangara	Huaura	76.82	10.78	3600	19	0.44
22	155205	Pallac	Chancay Huaral	76.8	11.35	2333	47	0.39
23	155206	Laguna Surasaca	Huaura	76.78	10.52	4400	18	0.21
24	155207	Pachamachay	Huaura	76.83	11.05	4200	20	0.43
25	155209	Huamantanga	Chillón	76.75	11.5	3392	46	0.38
26	155212	Parquin	Huaura	76.72	10.97	3590	39	0.31
27	155213	Santa Eulalia	Rímac	76.67	11.92	982	35	0.98
28	155214	Pirca	Chancay Huaral	76.65	11.23	3255	42	0.38
29	155217	Lachaqui	Chillón	76.62	11.55	3680	26	0.29
30	155218	Huaros	Chillón	76.57	11.4	3585	40	0.42
31	155219	Tupe	Huaura	76.65	11	4450	17	0.25
32	155223	Carampoma	Rímac	76.52	11.66	3489	32	0.33
33	155224	Santiago de Tuna	Lurin	76.52	11.98	2921	35	0.54
34	155225	San José de Parac	Rímac	76.26	11.8	3866	32	0.25
35	155235	Yauli	Mantaro	76.08	11.67	4141	17	0.53
36	155446	Casapalca	Rímac	76.23	11.65	4214	21	0.24
37	155514	Milloc	Rímac	76.35	11.57	4320	24	0.24
38	156100	Antioquia	Lurin	76.5	12.08	1839	38	0.71
39	156102	San Lázaro De Escoma	Lurin	76.35	12.18	3600	17	0.38
40	156109	Carania	Cañete	75.87	12.34	3875	39	0.28
41	200214	Huenge	Mantaro	76.28	11.24	4175	38	0.15
42	200216	Pachacayo	Mantaro	75.72	11.81	3550	39	0.16
43	200236	Junín	Mantaro	75.99	11.15	4120	36	0.17
44	300001	Atocsaico	Mantaro	76.08	11.3	4200	36	0.22
45	300002	Carhuamayo	Mantaro	76.06	10.92	4125	44	0.15
46	300006	Malpaso	Mantaro	76.04	11.41	3795	41	0.15
47	300007	Morococha	Mantaro	76.13	11.6	4505	41	0.17
48	300013	Upamayo	Mantaro	76.28	10.93	4093	44	0.14
49	501	Alcantarilla	Chancay Huaral	77.55	11.05	120	43	0.83
50	539	Huayan	Chancay Huaral	77.12	11.45	350	41	0.8
51	541	Oyon	Huaura	76.77	10.67	3641	37	0.24
52	542	Picoy	Huaura	76.72	10.88	2900	44	0.23
53	546	Donoso	Chancay Huaral	77.23	11.47	180	25	0.48
54	547	Canta	Chillón	76.63	11.47	2832	20	0.42
55	548	Matucana	Rímac	76.38	11.84	2479	38	0.34
56	549	Marcapomacocha	Mantaro	76.33	11.4	4479	36	0.22
57	610	Von Humboldt	Rímac	76.95	12.08	238	58	0.48
58	617	Modelo	Rímac	77.03	12.08	110	23	0.36
59	633	Huaro chirí	Mala	76.23	12.13	3154	27	0.17

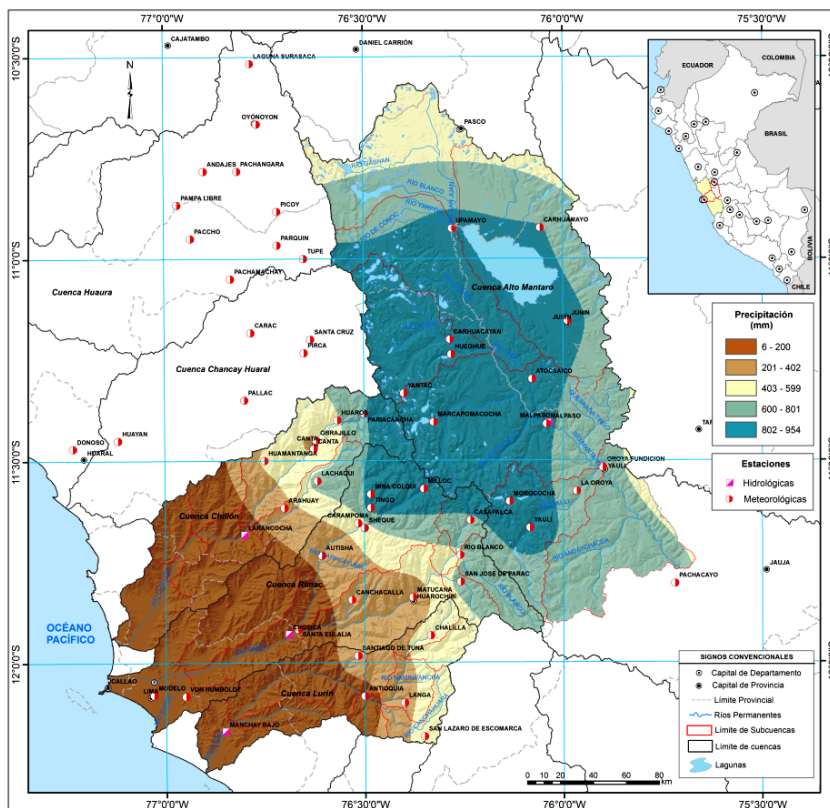


Fig. 1. Área de estudio sobre el mapa de precipitación media anual y 59 estaciones meteorológicas evaluadas

### Procedimiento metodológico

Tomando como referencia los trabajos de Wallis et al., y Schaefer et al. 2007, documentados por UNESCO, 2010; el ARFLM está constituido por cinco etapas descritos a continuación:

#### Control de calidad de datos y revisión de supuestos del análisis regional de frecuencia

En esta etapa se pretende maximizar el entendimiento de nuestros datos, a través de:

- El control de calidad, que comprendió el análisis de datos atípicos basados en los diagramas de cajas y el test de Grubbs (recomendado por la Agencia de Protección Medioambiental de los Estados Unidos–EPA), histograma de frecuencias y curvas cuantil–cuantil (Q–Q); con la finalidad de tener un resumen de las propiedades estadísticas de los datos.
- Revisión de supuestos de:
  - Análisis de consistencia u homogeneidad, para evaluar errores sistemáticos producto de un cambio en su posición o características de funcionamiento de las estaciones de observación, se ha verificado con el test de Pettitt, para un nivel de significancia de 0.05.
  - Análisis de estacionariedad, para verificar que las series no presenten tendencia en el tiempo, mediante el test no paramétrico de Man Kendall.
  - Análisis de independencia serial, para verificar que las series sean independientes en el tiempo, evaluado con la función de autocorrelación y el estadístico Q de Ljung–Box para un nivel de significancia de 0.05.

#### Identificación de regiones homogéneas

De todas las etapas en el análisis regional de frecuencias, la identificación de regiones homogéneas es

**Tabla 4.** Valores críticos de la medida de discordancia, D

N° de estaciones en la región	Valor Crítico D	N° de estaciones en la región	Valor Crítico D
5	1.333	11	2.632
6	1.648	12	2.757
7	1.917	13	2.869
8	2.14	14	2.971
9	2.329	>15	3
10	2.491		

**Tabla 5.** Valores críticos de heterogeneidad originales y actualizados, H

Heterogeneidad	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

generalmente la de mayor dificultad debido a la consideración de criterios subjetivos como: altitud de emplazamiento de las estaciones, cercanía entre ellas, clasificación climática, entre otros. El procedimiento seguido para la identificación de las regiones homogéneas ha sido el siguiente:

- Formación de las regiones mediante métodos multivariados como cluster y kmedias, que fueron aplicados a variables estandarizadas con asignación de pesos.
- Prueba de discordancia (D) y prueba de heterogeneidad (H). La D permite identificar estaciones inusuales en comparación con el resto de las estaciones de cada región homogénea. Para ello, Hosking y Wallis (1997), definieron distintos umbrales en función del número de estaciones que constituyen la región óptima. En la Tabla 4 se muestran los valores críticos de la medida de discordancia. La H compara la variabilidad de los L-Momentos muestrales del grupo de estaciones que conforman la región con la esperada. Existen dos medidas adicionales de heterogeneidad, denominadas H2 y H3, que no se recomienda su uso debido a que se ha comprobado que presentan una notable falta de potencia estadística (Viglioni et al., 2007). La Tabla 5 muestra los rangos del estadístico de heterogeneidad propuestos por Hosking y Wallis, 1997; y Wallis et al., 2007.

Selección de la distribución de frecuencia regional

Una vez definidas las regiones homogéneas se determinó la función de distribución de probabilidad de mejor ajuste, mediante el diagrama de los L-Momentos ratios regionales y el estadístico bondad de ajuste así:

- El diagrama de los L-Momentos ratios regionales es una herramienta útil para la selección adecuada de la distribución regional de frecuencia de los eventos hidrológicos extremos, recomendado por Stendiger et al., 1993, Vogel y Fennessey, 1993 y Hosking y Wallis, 1995.
- El estadístico de bondad de ajuste,  $Z^{DIST}$ , compara L-Cv y L-Sk simulado de una distribución ajustada con los valores de la media regional L-Cv y L-Sk de datos observados, y también permite calcular si el ajuste de una determinada distribución es adecuado, si  $Z^{DIST}$  es suficientemente cercano a cero, siendo un valor razonable para este criterio  $Z^{DIST} \leq 1.64$  lo cual corresponde a la aceptación de la distribución, planteado para un nivel de confianza de 90%.

El ARFLM utiliza modelos de distribuciones mucho más generales y flexibles debido a que están constituidos por 3 o 4 parámetros respecto a los modelos convencionales que son poco flexibles, ya

que están constituidos por 2 parámetros. Las distribuciones analizadas en el presente estudio son de 3 parámetros: Pareto Generalizada, Valor Extremo Generalizado, Generalizada Normal, Pearson Tipo III y Logística Generalizada.

#### Determinación de cuantiles

Conocida la función de distribución regional, se estimaron los cuantiles asociados a un cierto período de retorno. Los cuantiles para cada sitio se estimaron con la ecuación siguiente:

$$Q_i(F) = \mu_i * q(F) \quad (1)$$

Donde  $Q_i(F)$  es la función de cuantil para una estación  $i$ , donde  $0 < F < 1$ ;  $\mu_i$  es el valor medio para la estación  $i$  y  $q(F)$  es la función de cuantiles adimensional.

#### Mapeo de los períodos de retorno

Los procesos necesarios para realizar el mapeo del período de retorno se desarrolla en dos procesos:

- a. Estimar la función que explique de manera razonable la relación entre los L-Momentos y la Precipitación media anual regional (RPMA) mediante la ecuación recomendada por Schaefer et. al., 2006 y Wallis et. al., 2007:

$$L - Momento - Ratio = \alpha.e^{\beta(RMAP)} + \delta \quad (2)$$

Donde RMAP es la Precipitación media anual regional; L-Momentos es el Ratios de los Momentos lineales L-Cv, L-Sk y L-K;  $\alpha$  es el factor de escala;  $\beta$  es el factor de decaimiento y  $\delta$  el valor límite del L-Momento ratio calculado.

El buen ajuste depende del número de pares de puntos disponibles para el gráfico, a medida que se obtengan más puntos se espera un mejor ajuste, principalmente en la determinación de los coeficientes de ajuste, los cuales son específicos para cada L-Momentos. La importancia de esta etapa es poder estimar posteriormente los valores de los L-Momentos en cada punto o sitio de interés donde no se tiene mediciones. Para ello, se recurre al conocimiento de la distribución espacial de una variable altamente disponible en muchos sitios, como es la precipitación media anual. De esta forma, los L-Momentos obtenidos, en cualquier punto, son utilizados en la determinación de los parámetros de las funciones de distribución de probabilidad o cuantiles asociados.

- b. Mapeos

- El mapa de la PMA (precipitación normal anual) es la información inicial del ARFLM. En el presente artículo se ha utilizado el PMA (elaborado por SENAMHI-DGH, 2014), cuya metodología de interpolación es la geoestadística de Co-Kriging que relaciona la altitud y la precipitación.
- Calculadas las funciones de L-Momentos Vs PMA, es posible obtener los mapas L-Cv, L-Sk y L-Ku, y de los parámetros de la distribución a utilizar.
- Finalmente, los mapas de los parámetros de la distribución de probabilidad seleccionados permitirán determinar el mapa de probabilidad o período de retorno para un cuantil definido.

Cabe indicar, frente a una gran cantidad de procedimientos y metodologías utilizadas para la obtención de los mapas de precipitación normal, el analista debe considerar que las estimaciones del mapa del período de retorno están determinadas por la calidad del mapa de PMA a utilizar.

## RESULTADOS

### **Etapa 1. Control de calidad de datos y revisión de supuestos del análisis regional de frecuencia**

Mediante el test de Grubbs se detectó 7 datos atípicos, en las estaciones Autisha, Carac, Santa Eulalia, Tupe, Casapalca, Antioquia y Huayan que corresponden al 0.4% del total analizado. También producto del análisis de homogeneidad, mediante el test de Pettitt se detectaron cambios en la media en 17 de 59 estaciones (La Oroya, Canchacalla, Río Blanco, Tingo, Chalilla, Yantac, Pachangara, Parquin, Huaros, Carampoma, Carania, Huengue, Atosaico, Alcantarilla, Huayan, Matucana y Marcapomacocha), estos cambios se presentaron en los años 1999 (3), 1998 (2), 1970, 2006, 1976, 1997 (2), 1974, 1993 (2), 1975, 1996, 1998 y 1988, que corresponden a años denominados El Niño, La Niña de diferentes intensidades y años Normales según la clasificación mostrada en Lavado W.(2009).

En cuanto a la tendencia o estacionariedad verificado mediante el test Mann Kendall se detectaron tendencias en 10 de las 59 estaciones (La Oroya, Río Blanco, Tingo, Chalilla, Panchangara, Parquin, Carampoma, Casapalca, Huenge y Huarochirí). Finalmente, del análisis de independencia serial se ha detectado series dependientes en el tiempo en 2 de 59 estaciones (Von Humboldt y Huarochirí).

En resumen, en esta etapa, se ha excluido 11 estaciones (Alcantarilla, Chosica, Donoso, Huayan, La Oroya, Modelo, Río Blanco, Santa Cruz, Santa Eulalia, Von Humboldt y Yauli) que no cumplieron con los supuestos regionales.

### **Etapa 2. Identificación de regiones homogéneas**

El agrupamiento se inició con variables estandarizadas de precipitación anual, longitud, latitud y altitud y se asignaron pesos de 2, 1.5, 1 y 1.5 respectivamente, a fin de que en la distribución espacial de los grupos a formarse predomine el comportamiento de la lluvia; se observa que utilizando la técnica de Kmedias las agrupaciones presentan una distribución con menor dispersión respecto al obtenido con Cluster. Además, luego de un proceso iterativo de reformulación de la conformación de regiones y el filtrado de estaciones discordantes, se obtuvieron cuatro regiones homogéneas en las CRLAM, las características estadísticas de cada región se indican en la Tabla 6.

- La región 1 está compuesta por 10 estaciones ubicadas en la cuenca del Alto Mantaro, con precipitaciones entre 571 y 920 mm.año<sup>-1</sup>, los valores de D es menor a 2.491 y presenta un H igual a 0.78.
- La región 2 está compuesta por 18 estaciones ubicadas en la cuenca Chancay Huaral y Cañete, con precipitaciones variables entre 280 y 738 mm.año<sup>-1</sup>, el valor de D es menor a 3.0 y presenta un H igual a -0.24.
- La región 3 está compuesta por 5 estaciones ubicadas en las cuencas Chillón y Lurín, precipitaciones entre 75 y 320 mm.año<sup>-1</sup>, el valor de D es menor a 1.333 y presenta un H igual a -0.43.
- La región 4 está compuesta por 8 estaciones ubicadas en las cuencas Chillón, Rímac y Alto Mantaro con precipitaciones entre 645 y 1155 mm.año<sup>-1</sup>, el valor de D es menor a 2.14 y presenta un H igual a 0.51.

La Figura 2 muestra las cuatro regiones homogéneas delimitadas mediante polígonos de Thiesen sobre CRLAM, las regiones homogéneas 1 y 4 son las que abarcan la mayor y menor extensión territorial, equivalente a 6520 km<sup>2</sup> y 1253 km<sup>2</sup> respectivamente.

### **Etapa 3. Selección de la distribución de frecuencia regional**

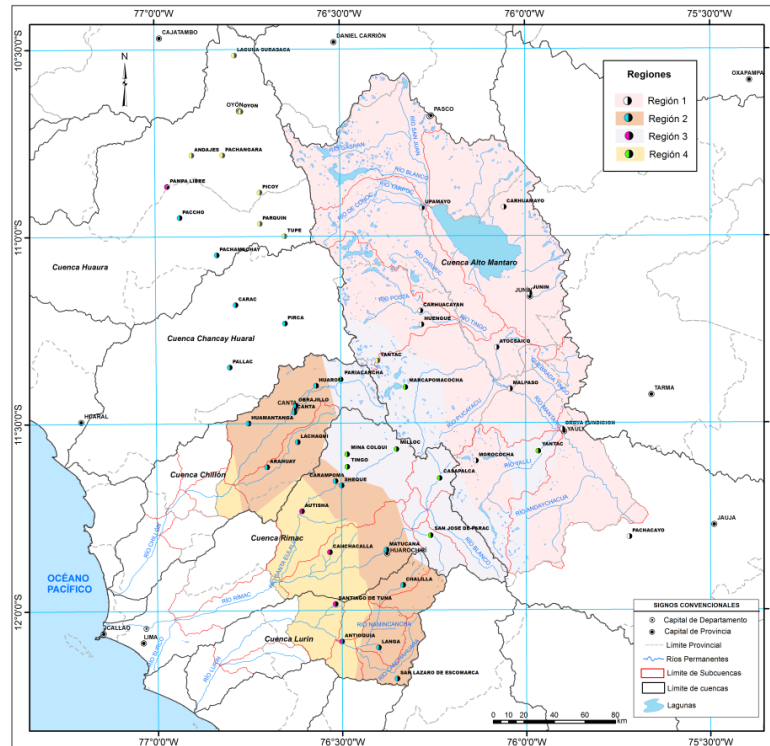
La Figura 3 muestra el diagrama de L-momento-ratio y los L-momentos regionales (círculo color negro) de las cuatro regiones homogéneas; se puede inferir que las regiones 1, 2 y 3 se ajustan a la distribución



**Tabla 6.** Estaciones óptimas que conforman las cuatro regiones homogéneas identificadas. PMA es Precipitación media anual, L-Cv es coeficiente L de variación, L-Sk es coeficiente L de Asimetría, L-Ku es coeficiente L de Kurtosis y H es el índice de heterogeneidad

Nombre	Cuenca	PMA (mm)	L-Cv	L-Sk	L-Ku	D	Dc	H	Región
Oroya	Mantaro	571	0.11	0.03	0.08	1.57			
Fundición	Mantaro	920	0.102	-0.054	0.13	1.34			
Carhuacayan	Mantaro	787	0.088	0.08	0.141	0.75			
Pachacayo	Mantaro	675	0.09	0.014	0.149	0.21			
Junín	Mantaro	855	0.093	0.114	0.203	1.69			
Atocsaico	Mantaro	816	0.126	0.009	0.122	2.08	2.491	0.78	1
Carhuamayo	Mantaro	728	0.084	0.081	0.154	0.67			
Malpaso	Mantaro	802	0.082	0.021	0.186	0.5			
Morococha	Mantaro	830	0.088	0.074	0.181	0.28			
Upamayo	Mantaro	861	0.078	0.016	0.197	0.91			
Chalilla	Lurín	364	0.254	0.138	0.107	1.07			
Obrajillo	Chillón	464	0.15	0.133	0.224	1.09			
Canta	Chillón	421	0.217	0.096	0.343	2.03			
Matucana	Rímac	291	0.182	0.144	0.243	0.87			
Arahuay	Chillón	317	0.209	0.118	0.102	0.27			
Sheque	Rímac	472	0.206	0.166	0.016	1.47			
Langa	Lurín	280	0.238	0.011	0.064	1.72			
Paccho	Huaura	669	0.196	-0.008	0.186	0.79			
Carac	Chancay-Huaral	373	0.188	0.013	0.195	0.44	3	0.24	2
Pallac	Chancay-Huaral	281	0.223	0.004	0.147	1			
Pachamachay	Huaura	738	0.239	0.13	0.145	0.63			
Huamantanga	Chillón	366	0.211	0.075	0.201	0.17			
Pirca	Chancay-Huaral	588	0.201	0.058	0.205	0.14			
Lachaqui	Chillón	627	0.162	0.138	0.034	1.72			
Huaros	Chillón	478	0.199	0.127	0.264	0.83			
Carpoma	Rímac	414	0.179	0.111	0.088	0.53			
San	Lurín	503	0.112	-0.017	0.258	2.25			
Lazaro de E.	Lurín	503	0.112	-0.017	0.258	2.25			
Carania	Cañete	612	0.138	0.025	0.207	0.98			
Canchacalla	Rímac	299	0.302	0.123	0.173	0.84			
Pampa	Huaura	130	0.299	0.305	0.245	1.13			
Libre	Huaura	130	0.299	0.305	0.245	1.13			
Autisha	Rímac	205	0.259	0.102	0.156	0.95	1.333	-0.43	3
Santiago	Lurín	320	0.282	0.211	0.183	0.85			
de Tuna	Lurín	320	0.282	0.211	0.183	0.85			
Antioquia	Lurín	75	0.347	0.096	0.124	1.23			
Mina Colqui	Rímac	720	0.132	0.132	0.181	1.27			
Marcapomacocha	Mantaro	1155	0.129	0.105	0.059	0.52			
Tingo	Rímac	873	0.132	0.112	0.019	1.23			
Pariacancha	Chillón	707	0.109	0.034	0.146	0.89			
Yantac	Mantaro	801	0.132	0.132	0.181	1.75	2.14	0.51	4
San	Rímac	645	0.173	0.153	0.128	1.05			
Jose de P.	Rímac	645	0.173	0.153	0.128	1.05			
Casapalca	Rímac	684	0.14	-0.041	0.241	0.81			
Milloc	Rímac	913	0.137	-0.031	0.216	0.48			

# ANÁLISIS REGIONAL DE SEQUÍAS EN EL CENTRO DEL PERÚ



**Fig. 2.** Regiones homogéneas de precipitación sobre las cuencas CRLAM

**Tabla 7.** Estadístico de bondad de ajuste por regiones homogéneas

Distribuciones probabilísticas	Estadístico de bondad de ajuste, $Z^{DIST}$			
	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$
Distribución Logística Generalizada	<b>0.52</b>	<b>-0.09</b>	<b>0.35</b>	<b>1.38</b>
Distribución Generalizada de valores extremos	-2.45	-2.85	-0.88	<b>-0.74</b>
Distribución de LogNormal	-1.87	-2.49	-1.05	<b>-0.45</b>
Distribución Pearson	-1.91	-2.64	-1.48	<b>-0.55</b>
Distribución Generalizada Pareto	-8.05	-8.28	-3.61	<b>-4.88</b>

Logística Generalizada (GLO) y la región 4 presenta buen ajuste para las distribuciones Pearson (PE3), Valores Extremos (GEV), LogNormal (GNO) y Logística Generalizada (GLO).

Asimismo, mediante el estadístico  $Z^{DIST}$  muestra que las regiones 1, 2, y 3 tienen en común un buen ajuste a la distribución Logística Generalizada, y para la región 4 también presenta cuatro posibilidades siendo las distribuciones PE3, GEV, GLO y GNO, coincidentes con el método gráfico. Ver Tabla 7.

Por tanto se ha seleccionado la GLO como la distribución en común de mejor ajuste, para las cuatro regiones ya que permitió el mapeo más práctico desde un enfoque operacional.

## Etapa 4. Determinación de cuantil

Para nuestro caso, el cuantil de interés es teórico y corresponde a 0.2 y 0.4 de la precipitación normal, es decir 80% y 60% de déficit de precipitación normal respectivamente.

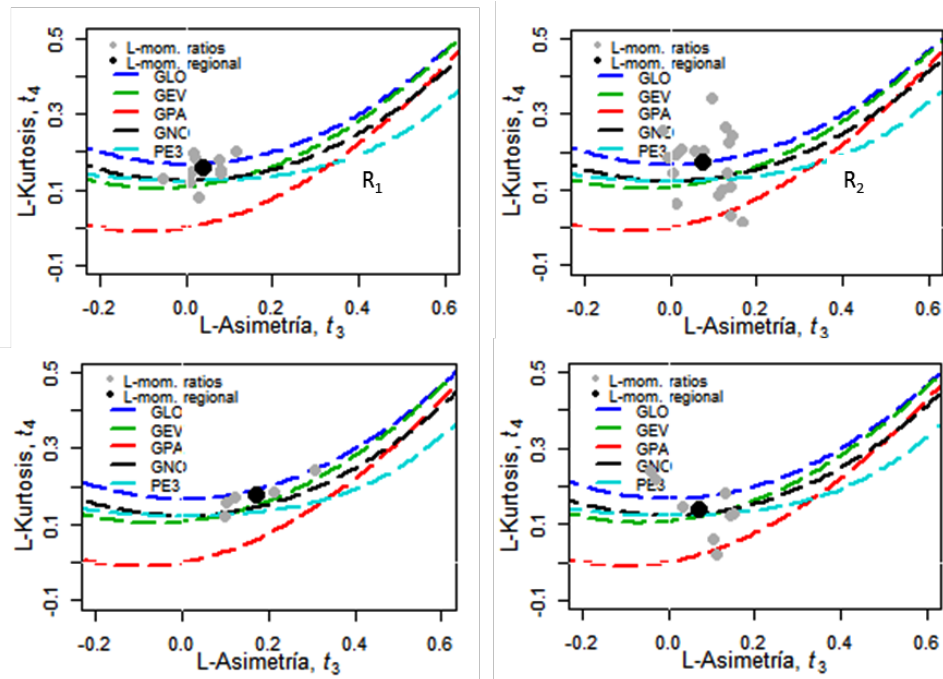


Fig. 3. Diagrama de los ratios de L-Momentos (LM) con el ratio del LM regional para las distribuciones candidatas Donde: las regiones homogéneas 1 ,2 ,3 y 4 serían R1, R2, R3 y R4

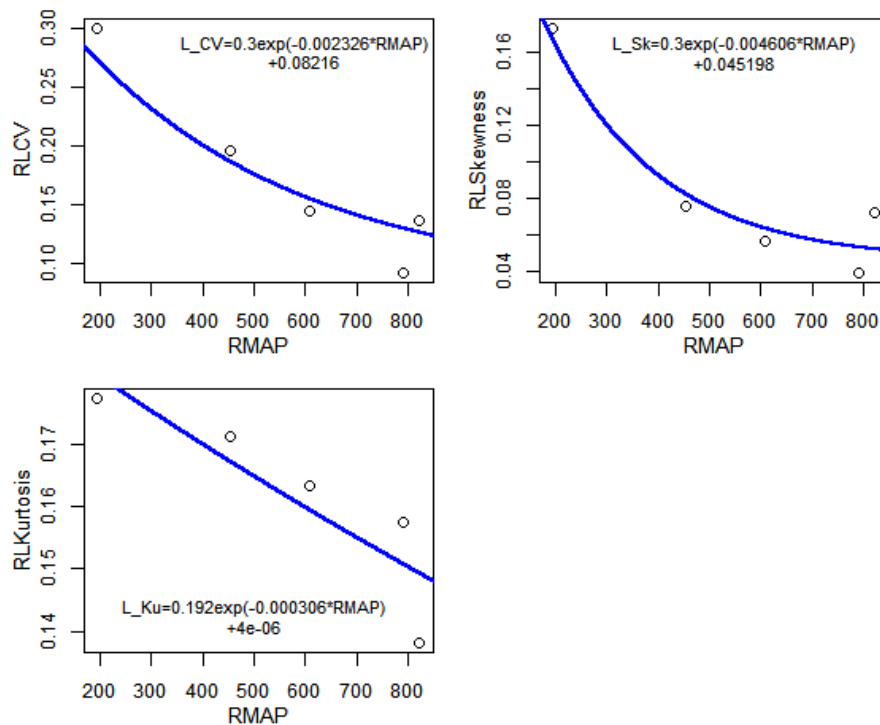


Fig. 4. Curvas regionales de los L-Momentos para las CRLAM

**Etapa 5. Mapeo del período de retorno**

Para la obtención de las funciones de L-Momentos Vs PMA se ha considerado las cuatro regiones homogéneas en el área de interés (CRLAM) y una ubicada en la cuenca de Huaura conformada por las estaciones: Oyon, Picoy, Andajes, Pachangara, Laguna Surasaca, Parquin y Tupe .

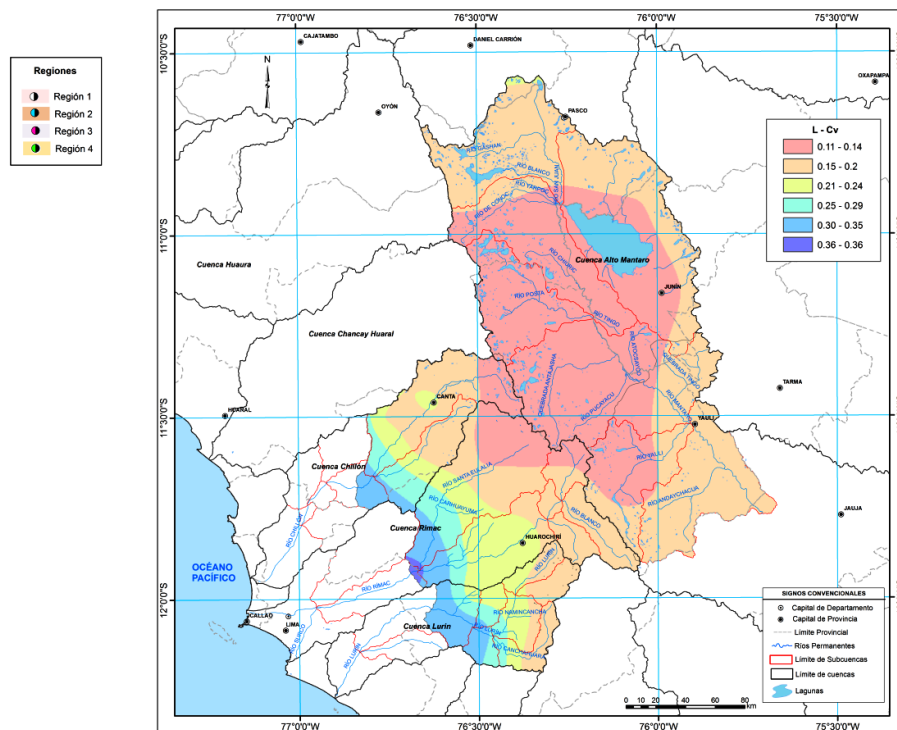
La Tabla 8 y Figura 4 presentan los módulos de la Precipitación media anual regional (RMAP), L-Cv, L-Sk y L-Ku promedio para cada región homogénea, así como las curvas regionales optimizadas, las cuales permitieron obtener la caracterización de los dos episodios de sequías en el área de estudio.

Las Figuras 5 y 6 muestran la espacialización de los estadísticos de L-Cv y L-Sk sobre las CRLAM respectivamente, estos mapas permitieron obtener los parámetros de la distribución Logística Generalizada sobre la CRLAM, los cuales mediante un algebra de mapas permitió determinar los mapas de periodos de retorno.

Las Figuras 7 y 8 muestran la variación espacial de los períodos de retorno asociados a la ocurrencia de una sequía equivalente al 80% y 60% de déficit de la precipitación normal sobre las CRLAM respectivamente.

**Tabla 8.** Módulos regionales de RMAP y L-Momentos

Región	RMAP (mm)	L-Cv	L-Sk	L-Ku
1	784.5	0.094	0.039	0.154
2	648.6	0.145	0.055	0.171
3	458.8	0.195	0.081	0.168
4	205.8	0.298	0.167	0.176
5	812.3	0.136	0.075	0.146



**Fig. 5.** Mapa de los estadísticos L-Cv sobre la CRLAM

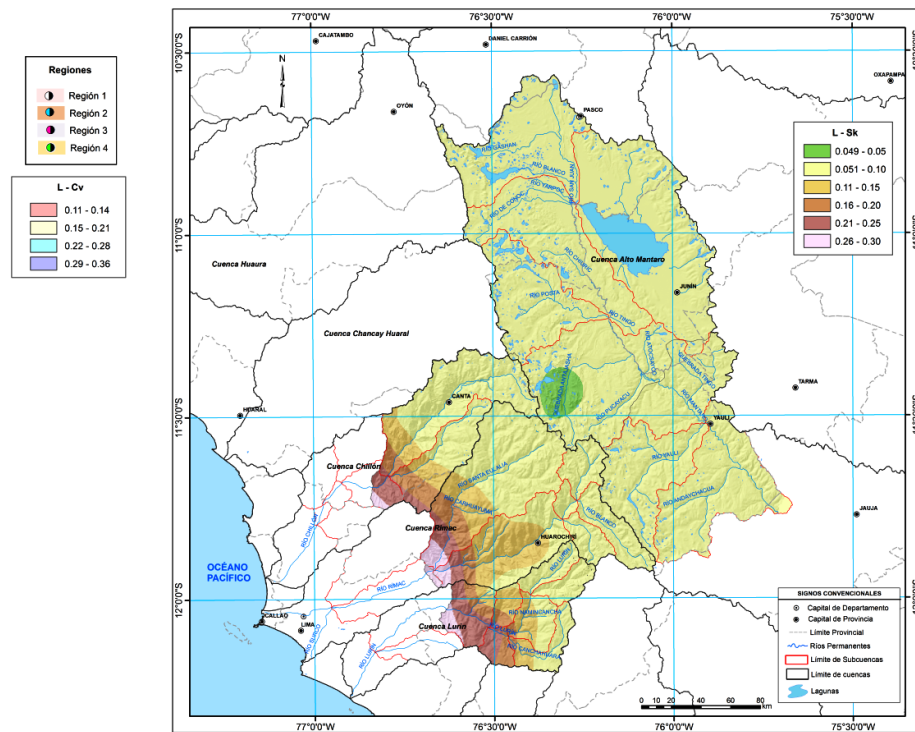


Fig. 6. Mapa de los estadísticos L-Sk sobre CRLAM

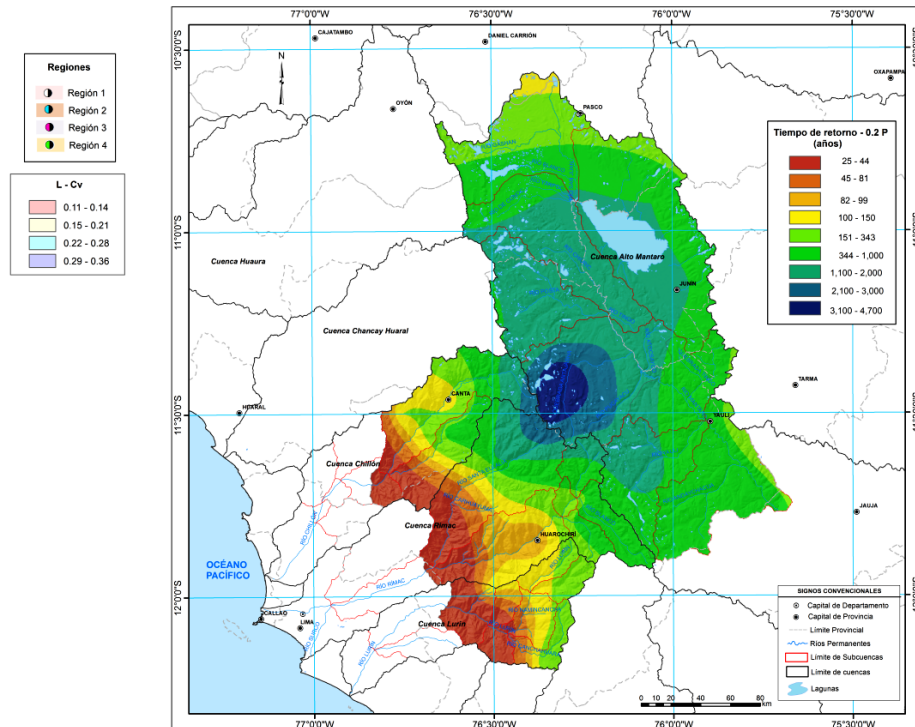


Fig. 7. Mapa de período de retorno de una sequía equivalente a 0.2 de la precipitación normal

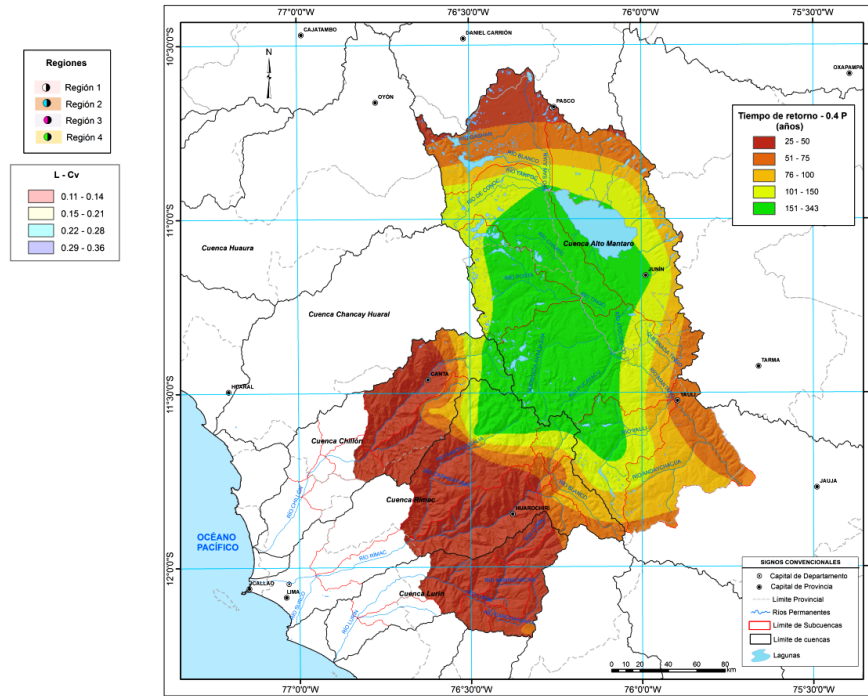


Fig. 8. Mapa de período de retorno de una sequía equivalente a 0.4 de la precipitación normal

Para situaciones de una deficiencia de 80% de lluvia, es decir 0.2 de la precipitación normal la sequía presentaría un período de retorno fluctuante de 25 a 4700 años; las zonas menos vulnerables serían las cuencas alta del Chillón, Rímac y Lurín y la cuenca total del Alto Mantaro con períodos de retorno de 100 a 4700 años, las zonas más vulnerables serían las cuencas media y baja del Chillón, Rímac y Lurín, zonas con períodos de retorno de 25 a 100 años. Para situaciones de una deficiencia de 60% de lluvia, es decir 0.4 de la precipitación normal, el período de retorno varía de 7 a 393 años; las zonas menos vulnerables serían las cuencas alta del Chillón, Rímac y Alto Mantaro con períodos de retorno de 50 a 393 años y las zonas más vulnerables serían las cuencas media y baja del Chillón y Rímac; así como la cuenca total Lurín con períodos de retorno de 7 a 50 años.

**CONCLUSIONES**

La metodología del Análisis regional de frecuencia se sustenta en el análisis probabilístico con aplicación de los L-Momentos, y con el uso conjunto del mapa de precipitación normal grillado permite determinar el período de retorno de una sequía en cualquier punto de interés.

Las cuatro regiones homogéneas definidas sobre las cuencas Chillón, Rímac, Lurín y Alto Mantaro se basa en el registro de 41 estaciones.

La distribución de probabilidad en común para estas regiones homogéneas es la Logística Generalizada. Cuando las regiones homogéneas corresponden al ajuste de diferentes distribuciones de probabilidad regional se tiene que mapear por cada región y luego integrar en un solo mapa los resultados parciales.

Para una deficiencia de 80% de lluvia es decir 0.2 de la precipitación normal las sequías presentarían un período de retorno de 25 a 4700 años; las zonas menos vulnerables serían las cuencas alta del Chillón, Rímac y Lurín y la cuenca total del Alto Mantaro con períodos de retorno de 100 a 4700 años; las zonas más vulnerables serían las cuencas media y baja del Chillón, Rímac y Lurín con períodos de retorno de 25 a 100 años.

Para una deficiencia de 60% de lluvia es decir 0.4 de la precipitación normal, el período de retorno varía de 7 a 393 años, las zonas menos vulnerables serían las cuencas alta del Chillón, Rímac y Alto Mantaro con períodos de retorno de 50 a 393 años y las zonas más vulnerables serían las cuencas media y baja Chillón y Rímac; así como la cuenca total Lurín con períodos de retorno de 7 a 50 años.

La calidad del mapa del período de retorno está directamente relacionada con la calidad del mapa de precipitación normal producto de entrada en el ARFLM. Por tanto, mientras mejores sean los procedimientos para la obtención del mapa de precipitación normal, mejor será la calidad del primero.

## AGRADECIMIENTO

A los coordinadores del Proyecto de Vulnerabilidad climática de los Recursos Hídricos en las cuencas de los ríos Rímac, Chillón, Lurín y parte Alta del Mantaro, ejecutado por SENAMHI en convenio con Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima (SEDAPAL); por su esmero y dedicación a contribuir en la planificación de los recursos hídricos

## BIBLIOGRAFÍA

- Acuña, J. et al. (2011). Análisis regional de frecuencia de precipitación anual para la determinación de mapas de sequías. *Revista Peruana Geoatmosférica RPGA* (3), pp. 104–115.
- Changnon, S. & Easterling, W., 1989. Measuring drought impacts: the Illinois case. *Water Resources Bulletin*. 25, pp. 27–42.
- Cuadrat Prats Y Vicente-Serrano (2005). Comportamiento de las sequías en la Península Ibérica: análisis mediante el Standardized Precipitation Index. *El clima, entre el mar y la montaña* (Santander). Asociación Española de Climatología y Universidad de Cantabria, pp. 245–254.
- Dai, A. et al. (2009). Changes in Continental Freshwater Discharge from 1948 to 2004, *Journal of Climate* 22, 2773–2792.
- Demuth, S. & Kulls, C. (1997). Probability analysis and regional aspects of droughts in southern Germany. *Sustainability of Water Resources under Increasing Uncertainty* (Proceedings of Rabat Symposium SI. IAHS Publ. N°. 240
- Fernandez C. & Lavado W. (2014). Estudio del análisis regional de precipitación máxima en las cuencas Chillón, Rímac, Lurín y parte alta del Mantaro.
- Ferre E. y Ruiz J. Las sequías en la provincia de Almería. *Implicaciones Biogeográficas*. Universidad de Málaga.
- Hosking, J. R. M. (1990). L–Moments: analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics. *J. Roy. Stat. Soc., Series B* 52, 105–124
- Hosking, J. R. M., & Wallis, J.R. (1997). *Regional frequency analysis: an approach based on L–Moments*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 224.
- INEI (2007). Censos Nacionales XI de población y VI de vivienda. En línea <http://censos.inei.gob.pe/cpv2007/tabulados/#>.
- Lavado W. et al. (2009). Impacto de ENOS en la hidrología del Perú (1968-2006). *Revista Peruana Geo–Atmosférica RPGA* (1), 48–57
- Loucks, D. et al. (2005). *Water Resources Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models and Applications*. Paris, France.
- Marcos O. (2001). Sequía: Definiciones, Tipologías y Métodos de cuantificación. *Investigaciones Geográficas* N° 26 pp. 59–80. Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional, Universidad de Barcelona.
- Hallack–Alegria M. & W. Watkins Jr. (2007). Annual and Warm Season Drought Intensity–Duration–Frequency Analysis for Sonora, Mexico. *J. Climate*, 20, 1897–1909.
- Milly PCD, et al. (2005). Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature* 438: 347–350.
- Norbiato, D. et al. (2007). Regional frequency analysis of extreme precipitation in the eastern Italian Alps and the August 29, 2003 flash flood. *Journal of Hydrology*, 345: 149–166.

- Núñez J. et al. (2011). Regional frequency analysis for mapping drought events in north-central Chile. *Journal of Hydrology*. Volume 405, Issues 3–4, 5 August 2011, Pages 352–366.
- Schaefer, M., et al. (2006). Regional precipitation–frequency analysis and spatial mapping for 24-hour and 2-hour durations in Eastern Washington. Prepared for Washington State Department of Transportation. MGS Engineering Consultants, Inc and Oregon Climate Service.
- SENAMHI-DGH 2014. Informe Técnico: Mapas climáticos multimensuales de precipitación de las Cuencas Chillón, Rímac, Lurín y parte Alta del Mantaro. En el marco del estudio de vulnerabilidad climática de los recursos hídricos en las cuencas de los ríos Chillón, Rímac, Lurín y Parte Alta del Mantaro.
- UNESCO (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, N° 27.
- Wallis, J.R., et al. (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.
- Werick W., et al. (1994). National Drought Atlas Developed. EOS, Transactions American Geophysical Union, Washington, D.C. 75: 8–89 pp. *The Cryosphere*, 7(1), 103–118. doi:10.5194/tc-7-103-2013.
- Yurekli, K. & Anli A. (2008). Analyzing Drought Based on Annual Total Rainfalls over Tokat 629 Province. *International Journal of Natural and Engineering Sciences*, 2(2): 21–26.



