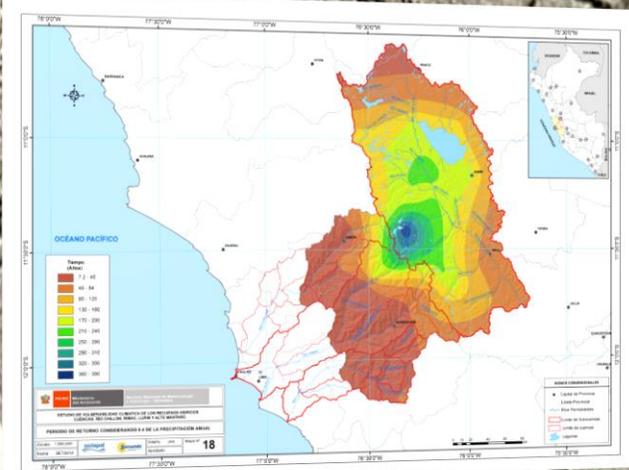
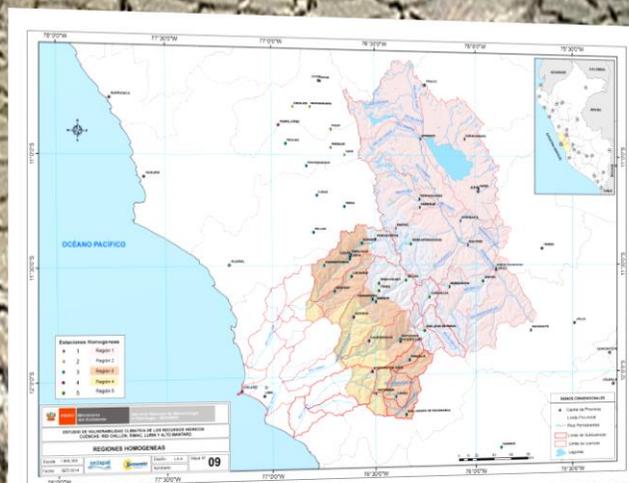
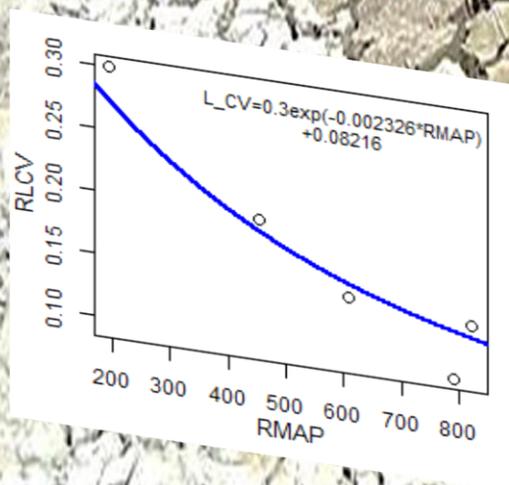
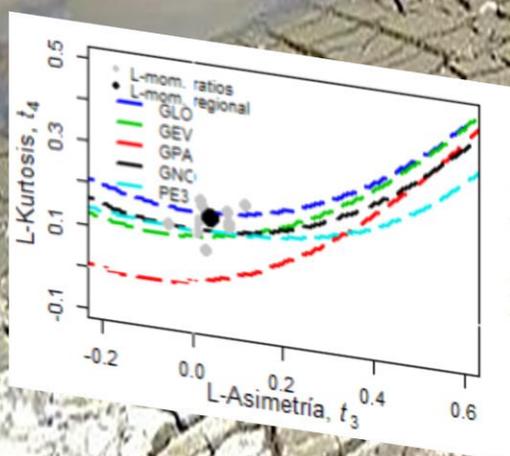


# ESTUDIO DE VULNERABILIDAD CLIMÁTICA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN LAS CUENCAS DE LOS RÍOS CHILLÓN, RÍMAC, LURÍN Y PARTE ALTA DEL MANTARO

## ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DE SEQUÍAS

EN LAS CUENCAS DE LOS RÍOS CHILLÓN, RÍMAC, LURÍN Y ALTO MANTARO





## **DIRECTORIO**

Presidenta Ejecutiva del SENAMHI

Ing. Amelia Díaz Pabló

Director Científico

Ing. Esequiel Villegas Paredes

Director General de Hidrología y Recursos Hídricos

Ing. Oscar G. Felipe Obando

## **RESPONSABLE DE LA ELABORACION**

Especialista en Hidrología

Mg. Sc. Julia Acuña Azarte

## **REVISIÓN Y EDICIÓN**

Ing. Oscar G. Felipe Obando

Bach. Miriam R. Casaverde Riveros

LIMA - PERÚ  
DICIEMBRE - 2014

## CONTENIDO

RESUMEN.....	7
1.INTRODUCCIÓN.....	9
1.1 Antecedentes.....	9
1.2 Justificación.....	9
2. OBJETIVOS.....	10
2.1 Objetivo general.....	10
2.2 Objetivos específicos.....	10
3. MARCO TEÓRICO.....	11
3.1 La sequía y sus definiciones.....	11
3.2 Análisis de frecuencias hidrológicas.....	14
3.3 Regionalización pluviométrica.....	16
3.3.1 Análisis de Conglomerados o Cluster.....	17
3.3.2 Kmeans.....	18
3.3.3 Vector Regional de Índices Pluviométricos.....	18
3.4 Análisis regional de frecuencia basado en L Momentos.....	19
3.4.1 Introducción al concepto L Momentos.....	22
3.4.2 Etapas del ARFLM.....	22
4. MATERIALES Y METODOLOGIA.....	27
4.1 Descripción General del área de estudio.....	27
4.1.1 Ubicación geográfica.....	27
4.1.2 Clima.....	28
4.1.3 Aspectos ecológicos.....	30
4.1.4 Geología.....	32
4.1.5 Capacidad de uso de Suelo.....	34
4.1.6 Fisiografía.....	36
4.1.7 Geomorfología.....	36
4.1.7.1 Formaciones Geomorfológicas.....	36
4.1.7.2 Parámetros morfo métricos.....	39
A. Parámetro de Superficie.....	39
B. Perímetro.....	40
C. Forma de la cuenca.....	40
D. Pendiente media del río.....	41
4.2 Información utilizada.....	42
4.2.1 Información cartográfica.....	43
4.2.2 Programas.....	43
4.2.3 Información climática.....	44
4.3 Aspectos metodológicos.....	47

4.3.1 Selección de estaciones y control de calidad de datos .....	47
4.3.2 Identificación de regiones homogéneas .....	48
4.3.3. Selección de la distribución regional de frecuencia.....	50
4.3.4 Estimación de los cuantiles regionales de frecuencia. ....	51
4.3.5 Mapeo .....	51
5.RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	53
5.1 Etapa 1. Control de calidad de datos y revisión de supuestos del ARF .....	52
5.2 Etapa 2. Identificación de regiones homogéneas.....	65
5.3 Etapa 3. Determinación de la distribución de probabilidad de mejor ajuste.....	65
5.4 Etapa 4. Determinación de cuantiles .....	72
5.5 Etapa 5. Mapeo del periodo de retorno de la sequía.....	72
6. CONCLUSIONES.....	80
7. RECOMENDACIONES.....	82
8. BIBLIOGRAFIA .....	82

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Secuencia de evolucion de los diversos tipos de sequia operacional.....	14
Figura 2. Ubicación geográfica del área de estudio.....	28
Figura 3. Clasificación Climática del área de estudio .....	30
Figura 4. Zonas de vida en el área de estudio.....	32
Figura 5. Formaciones geológicas en el área de estudio.....	34
Figura 6. Capacidad de uso del suelo en el área de estudio .....	36
Figura 7. Fisiografía en el área de estudio .....	37
Figura 8. Formaciones geomorfológicas en el área de estudio .....	39
Figura 9. Perfil longitudinal de los ríos Chillón, Rímac, Lurín y Alto Mantaro.....	42
Figura 10. Red de estaciones meteorológicas evaluadas .....	44
Figura 11. Histograma de longitud de registros.....	47
Figura 12. Series anuales por estación Huamantanga - Casapalca.....	55
Figura 13. Series anuales por estación La Oroya - Mina Colqui.....	56
Figura 14. Series anuales por estación Milloc - Upamayo.....	57
Figura 15. Series anuales por estación Carhuacayan Pachamachay .....	58
Figura 16. Serie anuales por estación Alcantarilla - Huarochiri.....	59
Figura 17. Diagrama de cajas por estación a escala anual.....	60
Figura 18. Autocorrelograma por estación.....	64
Figura 19. Grupos homogéneos de precipitación.....	66
Figura 20. Regiones hidrológicas homogéneas en el área de estudio.....	69
Figura 21. Diagrama de L-Momentos ratio de Skewness & L-Kurtosis por cada región homogénea.....	70
Figura 22. Curvas de crecimiento regional por región.....	71
Figura 23. Curvas regionales de los L-momentos de mejor ajuste.....	72
Figura 24. Precipitación anual del área de interés.....	73
Figura 25. Parámetro LCV espacializado.....	74
Figura 26. Parámetro LSK espacializado .....	74
Figura 27. Parámetro LK espacializado .....	75
Figura 28. Mapa de frecuencia de una sequía equivalente al 20% Precipitación normal	76
Figura 29. Mapa de frecuencia de una sequía equivalente a 40% Precipitación normal	76
Figura 30. Mapa de frecuencia de una sequía equivalente a 60% Precipitación normal	77
Figura 31. Periodo de retorno de una sequía equivalente a 20% Precipitación normal...	78
Figura 32. Periodo de retorno de una sequía equivalente a 40% Precipitación normal...	79
Figura 33. Periodo de retorno de una sequía equivalente a 60% Precipitación normal...	79

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Distribuciones de probabilidad utilizados en hidrología .....	16
Tabla 2. Valores críticos de heterogeneidad originales y actualizados .....	24
Tabla 3. Valores críticos del estadístico “D” de discordancia .....	25
Tabla 4. Precipitación y Caudales promedio multianuales.....	27
Tabla 5. Tipos de Zonas de vida.....	31
Tabla 6. Formaciones Geológicas .....	33
Tabla 7. Características de la capacidad de uso del suelo .....	35
Tabla 8. Características Fisiográficas .....	37
Tabla 9. Características Geomorfológicas .....	38
Tabla 10. Áreas.....	40
Tabla 11. Perimetro .....	40
Tabla 12. Forma de la cuenca.....	41
Tabla 13. Pendiente del rio Principal.....	42
Tabla 14. Estaciones Meteorológica en el área de estudio .....	45
Tabla 15. Valores críticos de heterogeneidad originales y actualizados .....	49
Tabla 16. Valores críticos de la medida de discordancia, D .....	50
Tabla 17. Estadísticas descriptivas de los registros de precipitación.....	54
Tabla 18. Prueba de atípicos Test Grubb.....	62
Tabla 19. Prueba de Tendencia.....	63
Tabla 20. Pesos por variable.....	65
Tabla 21. Estaciones más óptimas por región .....	67
Tabla 22. Estadístico de heterogeneidad por región homogénea.....	67
Tabla 23. Valores de Estadístico de bondad de ajuste por regiones homogéneas .....	71
Tabla 24. Tabla 24. Ratios de los LMomentos regionales .....	71

## RESUMEN

Dentro de los desastres naturales de origen hidrometeorológico que presentan mayor impacto en la actividad agrícola se encuentran las sequías, y ante la preocupación mundial por el cambio y variabilidad climática, las sequías cobran mayor importancia debido a la constatación de que muchas regiones puedan verse incrementadas tanto en intensidad, como en duración y frecuencia, es así que numerosos países han iniciado la implementación de programas destinados a la gestión nacional de riesgos de origen climático, dando énfasis especialmente a los de tipo hidrometeorológico como son la sequía e inundaciones. Por tanto el riesgo de verse enfrentado a una sequía, así como la vulnerabilidad del sector agrícola y otros frente a su impacto (muy especialmente en regiones áridas y semiáridas, consideradas por sí mismas como las más vulnerables) los Estudios Técnicos constituyen la base para la toma de decisiones en los sistemas de gestión. Tanto las aproximaciones tradicionales de análisis de riesgos, como las más actuales que incorporan como aspecto fundamental la cuantificación de la probabilidad de ocurrencia del fenómeno. Sin embargo, pese a la importancia del análisis probabilístico en la evaluación de riesgo, los métodos convencionales de ajuste de una serie de datos a un modelo estocástico (comúnmente basados en el método de los momentos o máxima verosimilitud), presentan serias limitantes, en especial en zonas semiáridas, con series de datos de precipitación de corta longitud y donde los eventos extremos son difíciles de modelar, justamente por ser poco frecuentes. En estas condiciones los métodos de ajuste convencionales son altamente sesgados, haciendo las estimaciones muy poco confiables.

En este contexto, el análisis regional de frecuencia con L-Momentos, presenta ventajas porque permite cuantificar y mapear el período de retorno de una sequía meteorológica desde una perspectiva regional y probabilística y se adapta a regiones donde la cantidad y longitud de series de precipitación es limitada.

Para el caso de sequías, el análisis regional de frecuencia basadas en la estadística L-Momentos ha sido aplicada con mucho éxito en la elaboración del Atlas de sequía de EE.UU. (Werick et al. 1995), análisis de sequías meteorológicas al noroeste de México (Hallack-Alegría & Watkins 2007), análisis de sequías en Turquía (Yurekli & Anli 2008), en el análisis de las sequías hidrológicas al sur de Alemania (Demuth & Kull 1997), Análisis regional de frecuencia para el mapeo de eventos de sequía al norte-centro en Chile (Nuñez et al. 2011), y análisis de sequias al norte de la región hidrográfica del Pacífico en el Perú (Acuña J. et al., 2011), en esta oportunidad, la aplicación se ha realizado para las cuencas del río Chillón, Rímac, Lurín y Alto Mantaro geográficamente son parte de las regiones de Lima, Pasco y Junín y abarcan una superficie total de 15081.2 km<sup>2</sup> y asienta aproximadamente el 24.8% de la poblacional nacional (INEI, 2007).

Entre los resultados se ha obtenido 05 regiones homogéneas de pluviometría basadas en 48 estaciones, cuatro de ellas se emplazan en el área de interés, estas han sido validadas con el test de heterogeneidad propuestas por Wallis et. al. (1997). La función de probabilidad de mejor ajuste en común para regiones emplazadas en el área estudiada presentaron un mejor ajuste a la distribución de probabilidad Logística Generalizada, sobre la base de esta información se ha mapeado los L-Momentos regionales y el periodo de retorno de una sequía teórica equivalente a 80, 60 y 40% de deficiencia pluviométrica, del cual se concluye que existe una mayor probabilidad de ocurrencia de una sequía hacia la cuenca media y baja de los ríos Chillón, Rímac y Lurín; sin embargo por encima de los 4000 msnm, esta probabilidad es mucho menor en el resto del área de estudio. Asimismo, los periodos de retorno de una sequía con deficiencia de 80, 60 y 40% respecto a su valor normal, tienden a expresar un comportamiento similar a sus correspondientes mapas de frecuencia, estimándose periodos de retorno que varían de 25 a 4474 años, 7 y 393 años y 3 y 43 años respectivamente. Cabe resaltar que hacia el nor este de la cuenca del río Rímac con límite con la parte alta del río Chillón y Alto Mantaro el periodo de retorno son más lejanos, sin embargo hacia la cuenca media y baja de los ríos Chillón, Rímac y Lurín, el periodo de retorno se reduce.

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

La Dirección General de Hidrología y Recursos Hídricos del SENAMHI viene desarrollando investigación en el análisis y caracterización de Eventos Extremos, con énfasis particular en la Sequía vista desde una perspectiva regional basado en Análisis Regional de Frecuencias Hidrológicas con L-Moments. En ese contexto se ha programado en el Plan Operativo del presente año el Estudio del Atlas de Sequías de las cuencas de los ríos Chillón, Rímac, Lurín y Alto Mantaro.

La metodología utilizada ha permitido obtener la regionalización de la precipitación en estas cuencas y la caracterización de las sequías por región homogénea, con un enfoque probabilístico para estimar los tiempos de retorno de las condiciones más críticas de sequías, para dos escenarios hipotéticos de deficiencia de lluvias de 60% y 80% con respecto a su valor normal. Los resultados de este estudio contribuirá para que las instituciones que administran las operaciones de generación hidroeléctrica, agua potable e irrigación realicen una mejor planificación y gestión del Recurso Hídrico en estas cuencas en situaciones de deficiencia hídrica.

### 1.2 Justificación

Un estudio reciente del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático de la ONU (Organización de las Naciones Unidas) coloca a Latinoamérica entre las regiones que pueden verse afectados de mayores impactos debido a factores hidrometeorológicos como son los eventos de sequías e inundaciones; y a su alto nivel de vulnerabilidad. Por ello, determinar la probabilidad de ocurrencia y frecuencia de una sequía principalmente, es de relevante importancia para la gestión de los recursos hídricos y sobre todo en el área estudiada, cuencas de los ríos Chillón, Rímac, Lurín y Alto Mantaro debido a que alberga zonas áridas y asienta aproximadamente el 24.8% de la poblacional nacional (INEI, 2007).

Asimismo, debido a que los cambios climáticos influyen en la variabilidad climática natural y la frecuencia e intensidad de fenómenos extremos climáticos como El Niño Oscilación del Sur -ENOS, La Niña Oscilación del sur -LNOS, entre otros, los desastres naturales de origen hidrometeorológico, como las sequías son las que presentan mayor impacto en la actividad agrícola, y ante la preocupación mundial por el cambio y variabilidad climática, las sequías cobran mayor importancia debido a la constatación de que muchas regiones puedan verse incrementadas tanto en intensidad, como en duración y frecuencia, es así que numerosos países han iniciado la implementación de programas destinados a la gestión nacional de riesgos de origen climático, dando énfasis especialmente a los de tipo hidrometeorológico como son la sequía e inundaciones, que afectan a las cuencas altas, medias y bajas del territorio nacional en general; a fin de

contar con información que contribuya a la planificación y gestión del riesgo en el ámbito de gerenciamiento de SEDAPAL se ha elaborado el presente Atlas de sequías para las cuencas del río Rímac, Chillón, Lurín y Alto Mantaro, con la finalidad de presentar la caracterización espacial de una sequía meteorológica con deficiencia de 80, 60 y 40% respecto a su valor normal.

Dado que la sequía meteorológica ocurren temporal y espacialmente de manera aleatoria, con diferentes intensidades y extensión en función de los patrones de circulación atmosférica. La caracterización de sequías preliminarmente requiere de la regionalización pluviométrica, etapa en que se ha derivado los mayores esfuerzos; siendo parte de un etapa importante del análisis regional de frecuencias con L-Momentos, su robustez radica en su enfoque probabilístico, y presenta la ventaja ante los métodos tradicionales, pues sustituye la carencia de información temporal por abundancia en el espacio.

Para el caso de sequías, el análisis regional de frecuencia basadas en la estadística L-momentos ha sido aplicada con mucho éxito en la elaboración del Atlas de sequía de EE.UU. (Werick et al. 1995), análisis de sequías meteorológicas al noroeste de México (Hallack-Alegría & Watkins 2007), análisis de sequías en Turquía (Yurekli & Anli 2008), en el análisis de las sequías hidrológicas al sur de Alemania (Demuth & Kull 1997), Análisis regional de frecuencia para el mapeo de eventos de sequía al norte-centro en Chile (Nuñez et al. 2011), y análisis de sequias al norte de la región hidrográfica del Pacífico en el Perú (Acuña J. et al., 2011).

En este sentido el presente estudio está centrado al análisis de sequía meteorológica basados en el análisis regional de frecuencias con L-Momentos, a fin de responder la pregunta ¿Con qué frecuencia o cada cuántos años es posible esperar una sequía meteorológica tan severa, como aquella consistente en una precipitación anual menor o igual al 20%, 40% y 60% de la esperada en un año considerado normal en las cuencas de los ríos Chillón, Rímac, Lurín y Alto Mantaro?; y presentar como resultado evidencias sobre los patrones espaciales generales, que puedan suscitarse en el área de estudio.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo general

Contribuir a la reducción de la vulnerabilidad del recurso agua en las cuencas del río Chillón, Rímac, Lurín y Alto Mantaro, basado en sólidos conocimientos científicos, sobre identificación de áreas vulnerables ante un episodio de sequía.

### 2.2 Objetivos específicos

- Realizar la selección, control y análisis de calidad de los datos pluviométricos.
- Determinar regiones homogéneas de precipitación.

- Obtención de funciones de probabilidad regional de precipitación anual.
- Generar mapas de frecuencia de sequías y tiempo de retorno de una sequía meteorológica correspondiente a una deficiencia pluviométrica de 80, 60 y 40% respecto a su valor normal para el ámbito de las cuencas del río Rímac, Chillón, Lurín y Alto Mantaro.

### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1 La sequía y sus definiciones

La sequía difiere en varios aspectos de otros fenómenos naturales perjudiciales. Sus efectos se hacen notar de manera lenta; subrepticia, en palabras de algunos. Es una desviación acumulativa respecto de las condiciones normales o previstas de precipitación, es decir, respecto de una media estadística o de un promedio a largo plazo. Este déficit de precipitación puede sobrevenir en poco tiempo o tardar meses en manifestarse a través de la disminución del caudal de los ríos, de los niveles de los embalses o de la altura de las aguas subterráneas. La evolución sigilosa de la sequía hace que, en ocasiones, sus efectos tarden semanas o meses en hacerse presentes. El déficit de precipitación empieza a manifestarse en la disminución de agua en los suelos, por lo que la agricultura suele ser el primer sector afectado.

No existe una definición consensuada de la sequía y dependiendo del área de interés y los impactos que se derivan de ella cada investigador adopta un criterio particular. Por ello es común encontrar en la literatura diferentes posturas conceptuales y operacionales desde el campo de la meteorología, la agrometeorología, la hidrología. 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.

El déficit de agua que provoca la sequía, pone en serias dificultades a las regiones que afecta con consecuencias económicas, sociales y ecológicas indiscutibles, más severas en la medida en que se está menos preparado para afrontarlas.

Los efectos de las sequías no son estructurales y abarcan áreas geográficas más extensas que las afectadas por otros fenómenos tales como crecidas, tempestades tropicales o sismos. La OMM considera en sus planes de Vigilancia y Alerta Temprana de la Sequía los siguientes tipos y son:

- a) Sequía meteorológica: Se define sobre la base del grado de sequedad, en comparación a una cantidad normal o promedio, y la duración del período seco. Las definiciones de este tipo de sequía deben ser específicas de la región, ya que las condiciones atmosféricas que resultan en deficiencias de precipitación son altamente específicas de la región.

La variedad de definiciones meteorológicas en diferentes países ilustra porque no es posible aplicar una definición de sequía desarrollada en una parte del mundo a otra.

Por ejemplo, las siguientes definiciones de sequía se han reportado:

- Estados Unidos (1942) menor que 2.5 mm de lluvia en 48 horas.
- Gran Bretaña (1936) quince días consecutivos con lluvia diaria menor que 0.25 mm
- Libia (1964): Cuando la lluvia anual es menor de 180 mm.
- Bali (1964): Un período de seis días sin lluvia.

b) Sequía Agrícola: Se produce una sequía agrícola cuando no hay suficiente humedad en el suelo para permitir el desarrollo de un cultivo en cualquiera de sus fases de desarrollo.

c) Sequía Hidrológica: Se refiere a la descarga persistentemente baja y/o volumen de agua en corrientes y reservorios, que tardan meses o años. La sequía hidrológica es un fenómeno natural, que puede ser exacerbado por actividades humanas. Las sequías hidrológicas usualmente se relacionan a sequías meteorológicas, y su intervalo de recurrencia varía de acuerdo a esto. Los cambios en el uso de la tierra y su degradación pueden afectar la magnitud y frecuencia de sequías hidrológicas.

d) Sequía socioeconómica: Las definiciones socioeconómicas de sequía asocian el suministro y demanda de algún bien económico con elementos de sequía meteorológica, hidrológica y agrícola. Difiere de los otros tipos de sequía en que su ocurrencia depende de los procesos de suministro y demanda. El suministro de bienes económicos, tal como agua, forraje, semillas, pescado y energía hidroeléctrica, dependen del tiempo atmosférico. Debido a la variabilidad natural del clima, el suministro de agua es bueno en algunos años, pero insuficiente para satisfacer las necesidades humanas y ambientales en otros años.

e) La sequía socioeconómica ocurre cuando la demanda para un bien económico excede el suministro, como resultado del tiempo atmosférico-relacionado a un descenso en el suministro de agua. La sequía puede resultar en una producción de energía eléctrica, significativamente reducida, a causa de que las plantas de energía fueron dependientes del flujo de corriente en lugar de almacenaje para generación de energía.

En términos generales, la sequía socioeconómica sucede a la agrícola, pero en regiones menos desarrolladas, donde este sector tiene un mayor peso en la economía, y su incidencia es más directa e inmediata que en regiones desarrolladas, la sequía agrícola constituye en sí misma el inicio de la sequía socioeconómica. Las diferentes formas en que la sociedad y la economía de una región pueden verse

afectadas por la escasez de precipitaciones quedan reflejadas en las diversas definiciones existentes de este tipo de sequía:

- Escasez de precipitaciones tan cuantiosas y continuada como para afectar dañinamente a la vida animal y vegetal de un lugar, y para reducir las reservas de agua para usos domésticos y para el funcionamiento de plantas energéticas, especialmente en aquellas regiones donde la lluvia es normalmente suficiente para tales necesidades (Havens, 1954).
- Devio negativo extenso y significativo de la precipitación con relación al régimen alrededor del cual una sociedad se ha establecido (Rasmussen, 1987).
- Fenómeno accidental de duración variable, marcado por un déficit anormal de agua, que produce una ruptura del equilibrio natural, una desorganización de la gestión del país, una reducción considerable de la producción, y conflictos sociales que pueden ser irreversibles. Se produce en todos los dominios climáticos, pero afecta más duramente a las regiones semiáridas marcadas por una fuerte variación interanual de las lluvias (Toupet, 1999).
- Déficit hídrico inusual que genera impactos adversos en la sociedad que la padece, alterando el normal desenvolvimiento de su vida colectiva (Pita López, 1995).
- Episodio de baja precipitación y mala distribución de las lluvias, que hace difícil la alimentación de la población y los rebaños, e imposibilita el mantenimiento de las reservas de agua necesarias para el consumo humano y animal (Sudene, 1999).

Durante una sequía no sólo disminuye la tasa de reposición hídrica en la superficie y en el subsuelo, sino que aumenta también enormemente la demanda de esos recursos, en la Figura 1 se muestra la relación entre los principales tipos de sequía, este evento refleja un proceso de evolución de la sequía determinado tanto por la variabilidad natural del clima, como por la duración del evento, y por la interacción entre clima y sociedad.

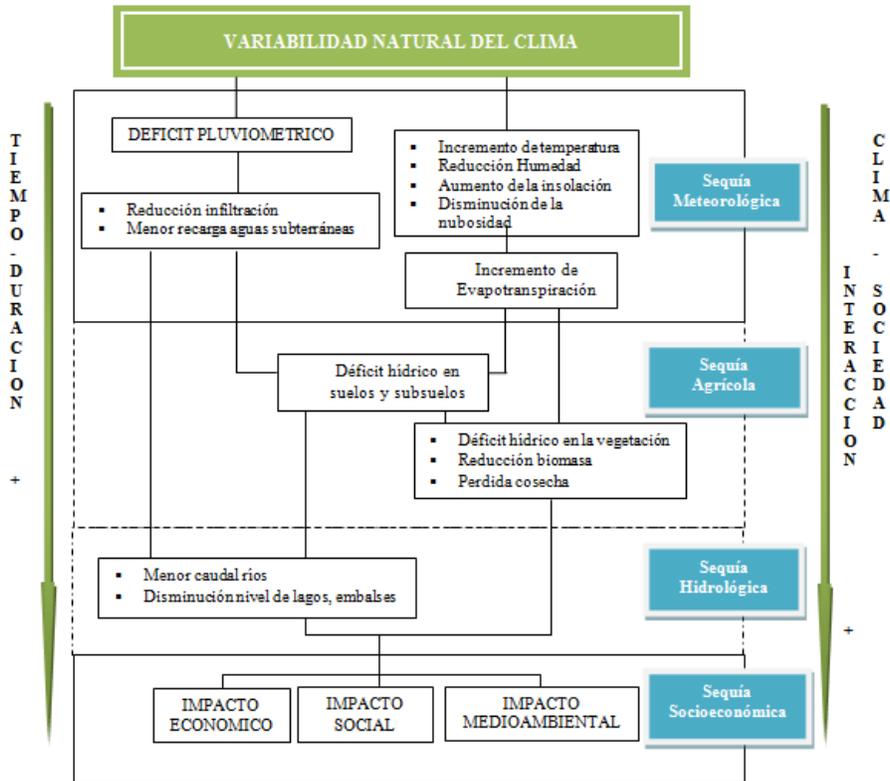


Figura 1. Secuencia de evolución de los diversos tipos de sequía operacional  
 Fuente: Basado en NDMC (Centro Nacional de Mitigación de Sequía de la Universidad de Nebraska, 1995)

### 3.2 Análisis de frecuencias hidrológicas

En el ámbito de la hidrología, numerosos fenómenos extremos no pueden pronosticarse en base a una información determinística, con la suficiente destreza y tiempo de antelación, para poder tomar las decisiones pertinentes a su ocurrencia. En dichos casos, se requiere un enfoque probabilístico con el fin de incorporar los efectos de esos fenómenos en las decisiones. Si se puede suponer que las ocurrencias son temporalmente independientes, esto es, el tiempo y la magnitud de un evento no tiene relación con los eventos anteriores, entonces se puede usar el análisis de frecuencias para describir la probabilidad de cualquier evento o de una combinación de ellos, durante el intervalo de tiempo necesario para una decisión (Tiempo de retorno). Los fenómenos hidrológicos que se describen en general mediante el análisis de frecuencias son las precipitaciones y las crecidas anuales máximas.

El análisis de frecuencias puede ser gráfico o matemático. En el enfoque gráfico, las observaciones históricas de la variable de interés se ordenan en orden ascendente o descendente, y se traza un gráfico de las magnitudes de los eventos en función de su frecuencia de excedencia o intervalo de repetición.

Después, se ajusta una curva a través de los puntos representados gráficamente para describir la probabilidad de ocurrencia futura de cualquier evento. El enfoque matemático para el análisis de frecuencias se basa en la suposición de una descripción matemática específica, conocida como distribución de probabilidades, para definir el equivalente de la curva del enfoque gráfico. Los parámetros de la distribución de probabilidades se definen como funciones de las estadísticas de las observaciones hidrológicas.

Las distribuciones de probabilidades se usan en una amplia variedad de estudios hidrológicos, por ejemplo los estudios de recursos hídricos, de caudales extremos altos y bajos, de sequías, de volúmenes en embalses, de cantidades de lluvia y de modelos de series cronológicas.

Las distribuciones principales que se usan en hidrología se indican en el Tabla 1. Sus definiciones matemáticas se disponen en la publicación de la OMM titulada *Statistical Distributions for Flood Frequency Analysis*.

Además de la elección de una distribución, el método de estimación de parámetros que se usa con la distribución puede tener un efecto en los resultados. Tradicionalmente, el método de momentos ordinarios (MMO) ha sido muy usado en hidrología a pesar de que se ha reconocido que es ineficiente estadísticamente, en comparación con el método de máxima verosimilitud (MV). El método de momentos ponderados de probabilidad (MPP) que introdujo Greenwood, y otros, en muchos casos conveniente aplicarlo, y Hosking, y otros han encontrado que tiene propiedades estadísticas comparables con el MV en cuanto se refiere al tamaño de las muestras que se utilizan en hidrología.

Un método más reciente, basado en las estadísticas de L-momentos. Constituye una mejora considerable con respecto a los métodos más convencionales de máxima verosimilitud o el de momentos.

El análisis de frecuencias de eventos hidrológicos tradicional hace uso, para este propósito, de información proveniente de una serie de datos originada por una estación, constituyendo lo que se denomina, análisis de frecuencia local. Contrariamente, si un número mayor de valores de la variable en cuestión, tomadas en distintos puntos en una región pueden ser empleados conjuntamente en un análisis de inferencia estadística, estamos hablando de un análisis de frecuencia regional.

Tabla 1. Distribuciones de probabilidad utilizados en hidrología

Nombre	Acrónimo	Referencia
Normal	N	Gauss
Log Normal	LN	Hazen, 1914
Pearson de tipo 3	P3	Fosteer, 1924
Valores extremos tipo 1	EV1	Gumbel, 1941
Valores extremos tipo 2	EV2	Gumbel, 1941
Valores extremos tipo 3	EV3	Jenkinson, 1969
Distribución gamma de tres parámetros		Kritsky, Menkel, 1946
Gamma	G	Moran, 1957
Log Pearson tipo 3	LP3	U.S. Water Resources. Council, 1967, 1981)
Valores extremos generalizados	GEV	Jenkinson, 1955
Weibull		Wu et Goodbridge, 1976
Wakeby	WAK	Houghton, 1978
Boughton		Boughton, 1980
Valores extremos con dos componentes	TCEV	Rossi, y col., 1984
Logística logarítmica	LLG	Ahmad, y col., 1988
Logística generalizada	GLG	Ahmad, 1988

Fuente: [www.fluidos.eia.co](http://www.fluidos.eia.co), 2008

En un área caracterizada por la variabilidad de la longitud de los registros de las series hidrológicas, con un gran porcentaje de las mismas con cortas longitudes de registros acompañadas por algunas de gran extensión, el análisis de frecuencias regional se vuelve una alternativa interesante al momento de querer determinar la ocurrencia de eventos raros como la sequía. Esa es la razón fundamental de su elección como herramienta metodológica en este estudio.

### 3.3 Regionalización pluviométrica

La regionalización pluviométrica tiene como objetivo la identificación de zonas homogéneas de precipitación; es decir determinar a partir del conocimiento del comportamiento pluviométrico en las estaciones de observación grupos de estaciones que exhiben semejanzas en los patrones temporales de las series pluviométricas. Según Tucci, en hidrología el término de regiones homogéneas está asociado a regiones que poseen similaridad hidrológica.

Para Tucci las regiones homogéneas no implican necesariamente la existencia de espacios geográficos continuos; sino que la homogeneidad debe ser entendida como una semejanza en la respuesta ante funciones regionales. Por otro lado la determinación de zonas homogéneas de precipitación o caudal puede cumplir dos finalidades, uno determinar las características regionales del comportamiento hidrometeorológico y otro para la construcción de funciones regionales de frecuencias. Una aplicación directa del análisis regional es la transposición de información en puntos donde no se dispone de puestos de observación, procedimiento muy común en el análisis hidrológico.

Los métodos más comunes de regionalización pluviométrica son los que se basan en las propiedades estadísticas de las series pluviométricas y a partir de las cuales se aplican técnicas de agrupamiento mediante procedimientos de análisis estadístico multivariado, como el Análisis de Componentes Principales, Kmeans y de Conglomerados o Cluster. Otros autores proponen complementariamente a los métodos estadísticos; la utilización de otros criterios que incluyen factores climáticos, fisiográficos, geológicos, biológicos y la influencia de factores antrópicos.

La escuela de hidrólogos franceses utiliza el Método del Vector Regional de Índices Pluviométricos, aunque es un método diseñado exclusivamente para la crítica de la calidad y completación de datos, su uso se puede extender para la determinación de regiones homogéneas, como los estudios realizados por SENAMHI a nivel de cuencas en la vertiente Peruana del océano Pacífico, vertiente del Titicaca y la vertiente del Amazonas.

Para evitar la subjetividad en la conformación de las regiones homogéneas se proponen test de homogeneidad para asegurar la buena conformación de los grupos homogéneos. Entre los test más utilizados se encuentran los test de discordancia y de heterogeneidad basados en la metodología de L-Momentos propuestas por Hosking's y Wallis en 1997.

### 3.3.1 Análisis de Conglomerados o Clúster

El Análisis de Conglomerados o Clúster (AC) no es más que un conjunto de técnicas que se utilizan para clasificar los objetos o casos en grupos relativamente homogéneos llamados conglomerados (clúster). Los objetos en cada grupo (conglomerado) tienden a ser similares entre sí (alta homogeneidad interna dentro del clúster) y diferentes a los objetos de los otros grupos (alta heterogeneidad externa entre clúster) con respecto a algún criterio de selección predeterminado. De este modo, si la clasificación es un éxito, los objetos dentro del clúster estarán muy cercanos unos de otros en la representación geométrica, y los clúster diferentes estarán muy apartados. Este análisis se conoce también como análisis de clasificación o taxonomía numérica.

El AC tiene como propósito esencial, agrupar aquellos objetos que reúnan idénticas características, es decir, se convierte así en una técnica de análisis exploratorio diseñada para revelar las agrupaciones naturales dentro de una colección de datos. Este análisis no hace ninguna distinción entre variables dependientes y variables independientes sino que calcula las relaciones interdependientes de todo el conjunto de variables. Para la formación de los clúster o grupos existe diferentes criterios en las diferentes formas de agrupamiento jerárquico y no jerárquico. Los programas computacionales disponibles permiten explorar diferentes formas de los clúster.

### 3.3.2 K-Medias

Es un método de agrupamiento, que tiene como objetivo la partición de un conjunto de  $n$  observaciones en  $k$  grupos en el que cada observación pertenece al grupo más cercano a la media. El método de K-Medias se aplica basado en el número de grupos encontrados a través de los clúster. Este método se basa en iteraciones consecutivas que permiten reducir la variancia dentro del grupo de individuos y aumentar la variancia entre los grupos. El número de interacciones es variable. Aunque los grupos se pueden crear sobre la base de clúster, el método de las K-Medias permite obtener varias clasificaciones e identificar estaciones estables e inestables (que pertenecen a diferentes clúster en diferentes iteraciones).

### 3.3.3 Vector Regional de Índices Pluviométricos

Es un método de cálculo que proporciona una gran ayuda en tres tareas definidas que son la crítica, la homogeneización y la extensión de las precipitaciones anuales. El MVR (método de vector regional) fue desarrollado en ORSTOM por los investigadores Hiez G. (1977) y Brunet-Moret (1977). Actualmente este método viene incorporado como utilitario dentro del programa Hydraces creado por el IRD-Francia.

Está basada en la hipótesis que para una misma zona climática sometida a un mismo régimen de precipitaciones los totales pluviométricos anuales son pseudo-proporcionales, es decir que la razón entre los totales anuales de las estaciones de la zona tomadas 2 por 2 se conserva más o menos constante en el curso del tiempo, con una pequeña variación aleatoria cada año debida a la repartición de las lluvias dentro de la zona (tal tormenta localizada afectó solamente a un grupo de estaciones).

La idea básica del vector regional de índices pluviométricos anuales es la siguiente: en vez de comparar dos por dos estaciones por correlación o doble masa como se hace en los métodos clásicos, vamos a elaborar a partir de los datos disponibles una estación ficticia que sea una especie de promedio de todas las estaciones de la zona, con la cual vamos a comparar cada una de las estaciones.

El método del Vector Regional de índices pluviométricos anuales está basado sobre estas ideas sencillas. Si consideramos una zona del país con M estaciones y un período de estudio de N años, podemos buscar por el método de mínimos cuadrados cuales son los índices pluviométricos “regionales” anuales  $Z_i$  y las precipitaciones promedio extendidas que minimicen la sumatoria:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \left( \frac{P_{ij}}{P_j} - Z_i \right) \quad (1)$$

Donde:

I	:	índice de año
j	:	índice de estación
N	:	número de años
M	:	número de estaciones
$P_{ij}$	:	precipitación anual en la estación j el año i
$P_j$	:	precipitación media extendida al período de N años
$Z_i$	:	índice pluviométrico regional del año i

La resolución del problema es dificultada por el hecho que ciertos de los  $P_{ij}$  no fueron observados y faltan. Sin embargo, es posible mediante el uso de una computadora, por descomposición en un sistema de (M-1) ecuaciones lineales a (M-1) desconocidas. La serie de los índices cronológicos  $Z_i$  se llama Vector Regional de Índices Pluviométricos Anuales.

Cabe mencionar que para este estudio se ha tomado en cuenta las agrupaciones pluviométricas que se realizaron en el estudio de SENAMHI-DGH, 2012.

### 3.4 Análisis regional de frecuencia basado en L Momentos

#### 3.4.1 Introducción al concepto L Momentos

Los Momentos Ponderados probabilísticamente PWM son utilizados para estimar los parámetros de las distribuciones probabilísticas que pueden ser expresadas explícitamente en forma inversa  $X=X(F)$ . Los Momentos PWM de una variable aleatoria X en función de la distribución acumulativa F. pueden ser descritos matemáticamente como (Greenwood, 1979, Hosking 1990, 1993).

$$M_{p,r,s} = E \left[ x(F)^p \cdot \{F(x)\}^r \cdot \{1 - F(x)\}^s \right] = \int_0^1 x(F)^p \cdot \{F(x)\}^r \cdot \{1 - F(x)\}^s \cdot dF \quad (1)$$

Particularmente los Momentos  $\alpha_s = M_{1,0,s}$  y  $\beta_r = M_{1,r,0}$  son empleados para la estimación de los parámetros de distribuciones probabilísticas:

$$\alpha_s = \int_0^1 x(F) \cdot \{1 - F(x)\}^s \cdot dF \quad (2)$$

$$\beta_r = \int_0^1 x(F) \cdot \{F(x)\}^r \cdot dF \quad (3)$$

Además  $\alpha_s, \beta_r$ , están interrelacionados dependientemente:

$$\alpha_s = \sum_{k=0}^s \binom{s}{k} \cdot (-1)^k \cdot \beta_k \quad (4)$$

$$\beta_r = \sum_{k=0}^r \binom{r}{k} \cdot (-1)^k \cdot \alpha_k \quad (5)$$

Los Momentos L Momentos son definidos en términos de los Momentos PWM  $\alpha_s$  y  $\beta_r$  (Hosking 1990, 1993). Donde:

$$\lambda_{r+1} = (-1)^r \cdot \sum_{k=0}^r p_{r,k}^* \cdot \alpha_k = (-1)^k \cdot \sum_{k=0}^r p_{r,k}^* \cdot \beta_k \quad (6)$$

$$P_{r,k}^* = (-1)^k \cdot \binom{r}{k} \binom{r+k}{k} = \frac{(-1)^{r-k} \cdot (r+k)!}{(k!)^2 \cdot (r-k)!} \quad (7)$$

Desarrollando algebraicamente las ecuaciones (6) y (7) se obtiene los Momentos L Momento obsérvese que los Momento L Momento son realmente lineales a los Momentos PWM:

$$\lambda_1 = M_{100} \quad (8)$$

$$\lambda_2 = 2M_{110} - M_{100} \quad (9)$$

$$\lambda_3 = 6M_{120} - 6M_{110} + M_{100} \quad (10)$$

$$\lambda_4 = 20M_{130} - 30M_{120} + 12M_{110} - M_{100} \quad (11)$$

Donde:

El primer orden ( $\lambda_1$ ) es el parámetro de localización o media de la distribución, mientras que el segundo ( $\lambda_2$ ) mide la escala de la distribución indicando el grado de dispersión entre los datos.

Estos cuatro L-momentos guardan cierta relación con los cuatro primeros momentos convencionales de la variable aleatoria  $x$ . Es muy conveniente definir los L-momentos de forma adimensional, lo que permite la comparación entre estaciones del mismo modo que se hace con los momentos convencionales. Como se puede observar, los L-momentos tienen las mismas dimensiones que la variable aleatoria  $x$ .

Se puede definir un coeficiente-L de variación o coeficiente de variación L-CV como:  
 Coeficiente de variación L-CV:

$$LC_V = \tau_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \quad (12)$$

Mientras que los coeficientes-L de asimetría y curtosis serían respectivamente:

$$LC_S = \tau_3 = \frac{\lambda_3}{\lambda_2} \quad (13)$$

$$LC_K = \tau_4 = \frac{\lambda_4}{\lambda_2} \quad (14)$$

br son los estimadores muestrales de  $\beta_r$  los datos deben ser ordenados de menor a mayor:

$$b_r = \frac{1}{n} \dots \sum_{j=1}^n \frac{(j-1).(j-2)...(j-r)}{(n-1).(n-2)...(n-r)} \dots, r=1,2,\dots \quad (15)$$

La utilidad del Método L-Momentos es que permite determinar con mayor precisión los parámetros de la distribución de probabilidad que mejor se ajusta a nuestros datos, determinando un único modelo probabilístico regional que caracteriza a toda una zona pluviométrica.

El objetivo fundamental del análisis de frecuencias con L Momentos (ARFLM) es la estimación de los sucesos máximos (precipitaciones máximas, caudales y otros) correspondientes a diferentes períodos de retorno mediante el uso de funciones de distribución de probabilidad.

La estimación de la frecuencia de los eventos es compleja, dado que los registros de las series de observaciones o no existen o son demasiado cortos para poder extrapolar con criterio.

Nuñez, 2011. Indica que lo que le caracteriza al método de los momentos, es que siempre, especialmente en muestras pequeñas, las estadísticas de coeficiente de variación (CV), Asimetría y Curtosis (y otros momento-ratios) son menores al valor verdadero. Es decir, siempre indican que las distribuciones estimadas presentan menor dispersión y con menores extremos que las reales. Esto puede llevar a una alta subestimación de lo extremo que pueden ser algunos eventos climáticos en un determinado lugar. Para hacer frente a estas serias limitaciones, desde hace décadas, especialmente desde mediados de los años 60, se viene recomendando la aplicación de un enfoque de análisis regional de frecuencias. Desde el punto de vista de su desarrollo teórico, ha habido avances en procedimientos de regionalización, incorporación de nueva variantes de los L-momentos, incorporación de estadísticas robustas de discordancia y heterogeneidad, así como nuevos modelos de probabilidad.

Uno de los procedimientos que ha ido ganando gran aceptación en la comunidad internacional, para la aplicación del análisis regional de frecuencias, es el de Hosking y Wallis (1997), basado en el índices de avenida, cuyo origen se remonta a lo Momentos Ponderador por Probabilidad (Greenwood et al, 1979) y al índice de avenida o Index Flood (Dalrymple, 1960).

#### 3.4.2 Etapas del ARFLM

De acuerdo con Hosking y Wallis (1997), el análisis regional de frecuencias con LMomentos (ARFLM) aumenta la fiabilidad de las estimaciones de las magnitudes de avenidas extremas (cuantiles) de la estación de aforo de interés, ya que incluye los datos de otras estaciones que presentan distribuciones de frecuencia similares a las de la primera estación, paliando la carencia en el tiempo con la abundancia en el espacio. Las etapas relevantes en la aplicación de este enfoque probabilístico basado en LM son :

1. Análisis y filtrado de los datos primarios de observaciones.
2. Identificación de regiones homogéneas.
3. Selección de la distribución regional de frecuencia.
4. Estimación de los cuantiles regionales de frecuencia.
5. Mapeo

La Etapa 1 tiene el objetivo de satisfacer que los datos recogidos en un sitio sean una representación real de las cantidades observadas, por lo que se deben eliminar el mayor número de errores derivados de las circunstancias de medición y transcripción. La idea, entonces, es tener un resumen de las propiedades estadísticas de las series de datos, previo a su análisis mediante ARF-LM.

La Etapa 2, La identificación y formación de regiones homogéneas es el segundo paso en el ARF-LM. Este es un proceso iterativo (Schaefer et al, 2007). Algunos de los métodos más utilizados para formular a priori Son el análisis clúster, métodos multivariados, métodos basados en atributos geográficos y climáticos del área de estudio, región de influencia, lógica difusa, mapas auto organizados e índice de estacionalidad (Gaál et al, 2007; Gaál y Kyselý, 2009; Fowler y Kilsby, 2003; Chavochoi y Soleiman, 2009; Burn y Goel, 2000; Kohnova et al, 2009; Lin y Chen, 2004).

En este trabajo se ha utilizado la magnitud de la precipitación media anual, como criterio de agrupamiento de estaciones, para la formulación a priori de regiones homogéneas. Este criterio ha sido recomendado como el más adecuado para agrupar estaciones con miras a un análisis regional de frecuencia de precipitaciones en el contexto de la caracterización probabilística de eventos de sequía. Este criterio tiene su justificación en el sentido de que lo que se busca es agrupar estaciones cuyo origen de la lluvia sea el mismo. Al ser el mismo origen, entonces las lluvias debieran afectar de la

misma forma a todas las estaciones dentro de la región homogénea, y por lo tanto, verse reflejado en la distribución de probabilidad en todas las escalas temporales.

- La Medida de heterogeneidad para aceptación de las regiones homogéneas propuestas:

El supuesto básico del análisis regional de frecuencias es que la distribución subyacente para un conjunto de sitios es la misma, dentro de una región homogénea. Por lo tanto, se requiere de una medida de este grado de homogeneidad, o de manera complementaria, en términos de la heterogeneidad que esta región presenta. Medidas de heterogeneidad -como la estadística H1- han sido desarrolladas por Hosking y Wallis (1997) como un indicador del grado de heterogeneidad en los L-momento-ratios para un grupo de sitios/estaciones. La estadística H1 mide la variabilidad relativa del coeficiente de L-Variación (L-CV, en inglés) observado a partir de la muestra, y es utilizada para analizar la heterogeneidad en cada una de las regiones homogéneas propuestas (Wallis *et al*, 2007).

Existen dos medidas adicionales de heterogeneidad, denominadas H<sub>2</sub> y H<sub>3</sub>. Sin embargo, no se recomienda su utilización debido a que se ha comprobado que presentan una notable falta de potencia estadística (Viglioni *et al*, 2007). El fundamento teórico y procedimiento de cálculo de la medida de heterogeneidad H1 está ampliamente descrita por Hosking y Wallis (1996).

La medida de la heterogeneidad se lleva a cabo sobre un grupo de estaciones que supuestamente constituyen una región, estima su grado de coherencia como región homogénea. En particular la medida de heterogeneidad H, compara la variabilidad de los L-momentos muestrales del grupo de estaciones que conforman la región con la esperada "homogénea", obtenida a partir de técnicas de simulación. La medida de heterogeneidad H se define como:

$$H = (V - \mu_v) / \sigma_v \quad (16)$$

Donde:

V : Es el coeficiente de variación lineal de cada estación, y  
( $\mu_v, \sigma_v$ ) : La media y la desviación estándar de V, lo que se logra mediante los experimentos de simulación.

El criterio de homogeneidad utilizado en el presente estudio se basa en Wallis *et al* (2007), quienes sugieren los siguientes rangos, a diferencia de los rangos originales descritos por Hosking y Wallis (1997), presentados en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores críticos de heterogeneidad originales y actualizados

Heterogeneidad	Hosking y Wallis (1997)	Wallis et al (2007)
Homogénea	$H_1 < 1$	$H_1 < 2$
Posiblemente heterogénea	$1 < H_1 < 2$	$2 < H_1 < 3$
Heterogénea	$H_1 > 2$	$H_1 < 3$

Esta determinación se fundamenta en que los límites propuestos originalmente por Hosking y Wallis (1997), sólo tenían en cuenta la variabilidad estadística. Sin embargo, las mediciones de precipitación habitualmente contienen otras fuentes de variación, tales como el movimiento de estaciones durante sus años de funcionamiento, cambio de operadores, datos faltantes surgidos de reportes inconsistentes, falta de atención para medir la precisión y condiciones específicas del sitio, debido a construcciones, crecimiento de árboles alrededor de la estación, todos factores que incrementan en algún grado la heterogeneidad natural de las regiones, por muy homogéneas que sean desde el punto de vista meramente estadístico.

- Medida de la discordancia de una estación dentro de una región homogénea

Un adecuado criterio en la formulación de regiones homogéneas es que las estaciones que la integran no presenten propiedades que las hagan discordantes con el resto de las estaciones dentro de la región homogénea. Hosking y Wallis (1997) presentan una medida de discordancia, la cual permite evaluar el grado en que los L-momentos de una estación, se apartan significativamente del patrón medio de los L-momentos regionales. Para ello, los autores construyen una elipse concéntrica cuyas coordenadas corresponden a un par de puntos (por ejemplo, sobre una gráfica L-CV vs L-Skewness) con valores correspondientes a los L-Cv y L-Skewness regionales. La elipse presenta el eje mayor y menor, escogidos para dar el mejor ajuste a los datos, determinados por la matriz muestral de covarianza de los L-momento-ratios de los sitios.

Formalmente, ese grado de alejamiento del centro de la elipse, se mide en términos de una prueba de discordancia  $D_i$ , la cual sirve para identificar estaciones cuyos valores muestrales de los L-momentos difieren significativamente de las otras estaciones de la supuesta región homogénea. Esta medida de discordancia puede ser utilizada en el proceso de control de calidad de los datos e indica los sitios dentro de la región donde los datos deben ser sometidos a un análisis de calidad más profundo.

Se considera que el vector de L-momentos (LCv, LSkewness, LKurtosis) 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 de éstos deberá ser considerado como discordante.

Para saber si una estación es discordante, es necesario conocer el número de estaciones dentro de la región homogénea que se está analizando. Para un determinado número de estaciones existe un valor crítico de  $D_i$ . Sobre ese valor, la estación es considerada discordante.

De esta manera, cualquier punto que se aleje del centro de gravedad de esta nube de puntos deberá ser considerado como discordante. La medida de discordancia se define a partir del siguiente estadístico:

$$S = \sum_{i=1}^N (u_i - u_\mu) (u_i - u_\mu) \quad (17)$$

$$D_i = N/3(N-1)(u_i - u_\mu)^T S^{-1}(u_i - u_\mu) \quad (18)$$

$$u_\mu = N^{-1} \sum_{i=1}^N u_i \quad (19)$$

Los valores elevados de  $D_i$  son característicos de estaciones que se apartan del comportamiento general del resto de estaciones. Se definen distintos umbrales en función del número de estaciones que constituyen la región según el Tabla 3.

Tabla 3. Valores críticos del estadístico “D” de discordancia

Nº de estaciones en la región	Valor Crítico, D	Nº 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	2.140	14	2.971
9	2.329	>15	3.000
10	2.491		

En la Etapa 3 Una vez que una región homogénea ha satisfecho la condición de homogeneidad es posible, entonces, determinar, basados tanto en el uso del diagrama de los L-momento-ratios regionales respecto a los L-momentos teóricos, para diversos tipos de modelos de distribución de probabilidad, es una etapa fundamental en el ARF basado en L-momentos. Vogel y Fennessey (1993) y Peel *et al*, (2001) indican que los diagramas de L-momento-ratios son una herramienta útil para la selección de la distribución de probabilidad aunque no suficientes, por lo que recomiendan el uso de medidas de bondad de ajuste basados en los L-momentos regionales.

Hosking y Wallis (1996) desarrollan una medida de bondad de ajuste basada en las estadísticas medidas de los L-momentos regionales. Los autores indican que el procedimiento para aceptar una o varias distribuciones de mejor ajuste se basan en el

valor  $Z_{DIST}$ . Si  $Z_{DIST} < |1.64|$ , entonces se acepta la hipótesis de buen ajuste de la distribución, caso contrario, se rechaza. La expresión matemática de calcularse es:

$$Z^{DIST} = (\tau_4^{DIST} - t_4^R + B_4) / \sigma_4 \quad (20)$$

Donde:

- $\tau_4^{DIST}$  : coeficiente lineal de sesgo para la distribución propuesta
- $t_4^R$  : coeficiente lineal de curtosis para la región
- $\sigma_4$  : desviación estándar  $t_4^R$
- $B_4$  : coeficiente dependiente del número de simulaciones y de  $t_4^R$

Se considera que el ajuste de una determinada distribución es adecuado si el estadístico  $Z^{DIST}$  es suficientemente cercano a 0, siendo un valor razonable para este criterio el grado de significación del 90%, que corresponde a un valor absoluto de  $Z^{DIST}$  menor o igual a 1,64

En la Etapa 4, una vez determinadas las funciones de distribución que pueden proporcionar un buen ajuste de los datos correspondientes a una región homogénea, se estiman los cuantiles asociados a un cierto período para cada estación. Obtenidos los L-momentos regionales y caracterizada a través de ellos la función de distribución acumulada  $x = X(F)$  para distintos períodos de retorno se calculan los cuantiles de cada estación, dividiendo estos valores extremos regionales por la media muestral.

Los cuantiles para cada sitio pueden ser estimados según la ecuación siguiente:

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

Donde:

- $Q_i(F)$  : Función de cuantil para una estación i, donde  $0 < F < 1$ .
- $\mu_i$  : Es el valor medio para la estación i
- $q(F)$  : Es función de cuantiles adimensional

En la Etapa 5, se evalúa el error del modelo regional. Los cuantiles estimados y el crecimiento de la curva son comparados con los valores reales de la distribución de frecuencia correspondiente a cada estación, calculándose los estimadores de precisión de las medidas, sesgo y error medio cuadrático.

## 4. MATERIALES Y METODOLOGIA

### 4.1 Descripción General del área de estudio

#### 4.1.1 Ubicación geográfica

El área de estudio está ubicada en la parte central del Perú comprende las cuencas del río Rímac, Chillón, Lurín y Alto Mantaro, políticamente pertenece a los departamentos de Lima, Junín y Pasco. Su cobertura espacial se extiende entre las coordenadas  $-75.67^{\circ}$  y  $-77.16^{\circ}$  de longitud oeste;  $-10.57^{\circ}$  y  $-12.27^{\circ}$  de latitud sur. Las cuencas del río Chillón, Rímac y Lurín se emplazan en la vertiente del Pacífico y la cuenca del Alto Mantaro en la vertiente del Atlántico. Abarcan un área total de 15081.5 km<sup>2</sup> distribuidas entre niveles altitudinales que varían entre 0 y 5650 m.s.n.m.

Limita al norte con la cuenca del río Chancay Huaral e Intercuenca Alto Huallaga, al sur con la cuenca del río Mala, Chilca e Intercuenca 1375533, al este con la cuenca del río Perene y al oeste con la vertiente del Pacífico.

El Área de estudio alberga aproximadamente el 24.8% de la poblacional nacional (INEI, 2007).

La Figura 2 muestra la ubicación geográfica del área de estudio sobre el modelo de elevación del terreno, de gran influencia sobre las condiciones hidroclimáticas en la superficie en estudio, en general.

Las principales características de las variables hidrológicas, precipitaciones y caudales a nivel medio multianual de las cuencas de estudio se indican en la Tabla 4. Cabe mencionar que los módulos de lluvias son respecto a la cuenca total y los caudales son respecto a la estación control hidrométrica.

Tabla 4. Precipitación y Caudales promedio multianuales

Cuenca	Estación Hidrométrica	PPmedia (mm)	Caudales* (m <sup>3</sup> /s)
Chillón	Larancocha	272.2	5.9
Rímac	Chosica	328.3	32.2
Lurín	Manchay Bajo	208.3	3.2
Alto Mantaro	Malpaso	699.8	50.1

Fuente: SENAMHI, 2014; período 1981-2010 (\*)

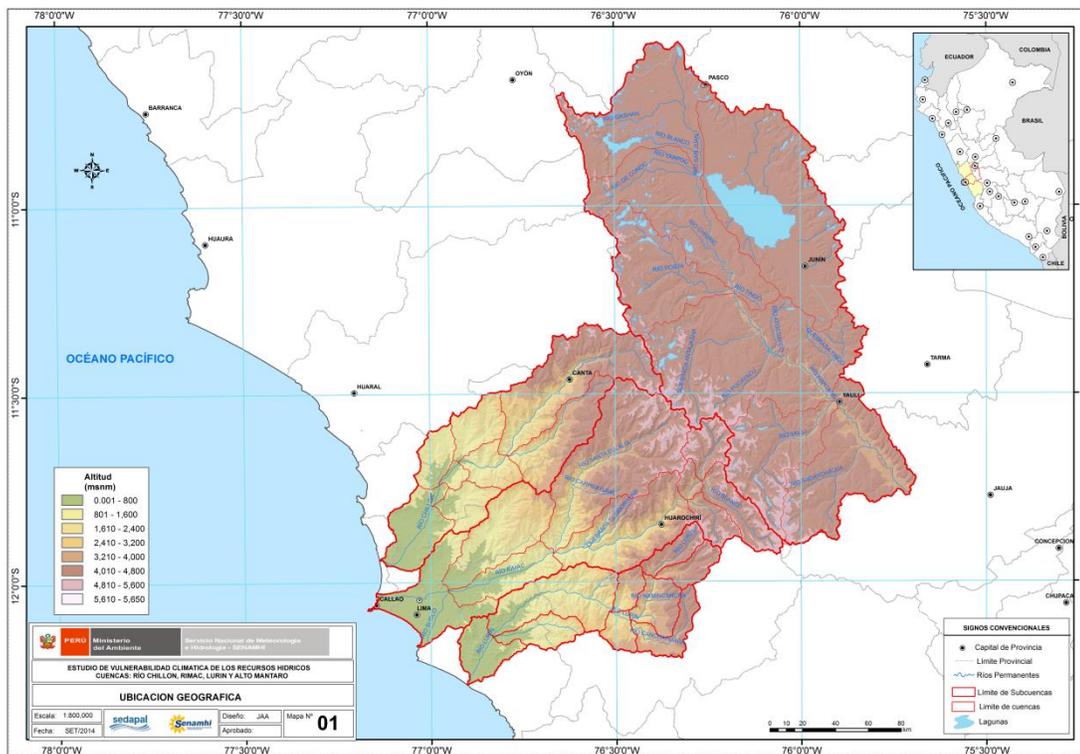


Figura 2. Ubicación geográfica del área de estudio

A continuación se presenta las principales características físicas biológicas que corresponden a las cuencas Chillón, Rímac, Lurín y Alto Mantaro. Cabe mencionar que la información zonas de vida, geológica, capacidad de uso del suelo y geomorfología presentada está basada en el Plan de gestión de riesgo y adaptación al cambio climático en el sector agrario, periodo 2012-2021 - PLANGRACC elaborado por el Ministerio de Agricultura, 2012

#### 4.1.2 Clima

SENAMHI (1988), ha elaborado la clasificación climática a nivel nacional, el cual ha sido elaborada considerando factores que determinan de manera preponderante el clima, como la latitud, la altitud, la cordillera de los Andes, la corriente Costera Peruana (de aguas frías), el anticiclón del Pacífico sur y la continentalidad. La información base de esta clasificación se sustenta en datos meteorológicos de veinte años (1965-1984), a partir de la cual se formularon los índices climáticos basados en el Sistema de Clasificación de Climas de Warren Thornthwaite.

Según la mencionada clasificación en la Figura 3 muestra la distribución espacial de esta clasificación climática del área de estudio y las principales características se describen a continuación:

- Zona de clima semifrío, lluvioso, con deficiencia de lluvia en invierno con humedad relativa calificada como húmeda identificada con la nomenclatura de B(i) D' H<sub>3</sub> . Corresponde este tipo climático a los lugares siguientes: Surasaca, Marcapomacocha, Milpo, Cerro de Pasco, Pachachaca, Junín, Morococha, Pomacocha y Yauricocha. El área que abarca es de 59.1% del total.
- Zona de clima frío, lluvioso, con deficiencia de lluvias en otoño e invierno, con humedad relativa calificada como húmeda. Identificada con la nomenclatura de B(o,i) C' H<sub>3</sub>. Corresponde este tipo climático a los lugares siguientes: Huallanca, Panao, Tarma, La Oroya, Pampas, Paucarbamba, Huancavelica, La Quinua, Yauri, Jauja, Concepción y Huancayo. El área que abarca es de 3.9% del total.
- Zona semiseca, semifrío, con deficiencia de lluvias en otoño, invierno y primavera, con humedad relativa calificada como húmeda, identificada con la nomenclatura C(o,i,p) B'3 H<sub>3</sub>. Corresponde este tipo climático a los lugares siguientes: Santiago de Chuco, Conchucos, Corongo, Bambamarca, Huaraz. El área que abarca es de 8.2% del total.
- Zona semiseca, templada, con deficiencia de lluvias en otoño, invierno y primavera, con humedad relativa calificada como húmeda, identificada con la nomenclatura de C(o,i,p) B'<sub>2</sub> H<sub>3</sub> . Corresponde este tipo climático a los lugares siguientes: Huancabamba, Huambos, Santa Cruz, Cajamarca, Contumaza, Otuzco, Caraz, Canta, Matucana. El área que abarca es de 7% del total.
- Zona desértica semicálida, con deficiencia de lluvias en todas las estaciones del año, y con humedad relativa calificada como húmeda, identificada con la nomenclatura de E(d) B'1 H<sub>3</sub> . Corresponden este tipo de clima a los lugares tales como: Talara, Bayóvar, Jayanca, Ferreñafe, Tinajones, Lambayeque, Chiclayo, Pimentel, Cayaltí, Casa Grande, Cartavio, Jequetepeque, Laredo Trujillo, Paramonga, Huacho, Lomas de Lachay, Huaral, Lima Metropolitana, Cañete, Pampa de Majes, Vitor, La Joya, Moquegua, Pisco, Ocucaje, Palpa y Tacna. El área que abarca es de 19.9 del total.
- Área de Nevados y Lagunas, que abarca es de 1.9% del total.

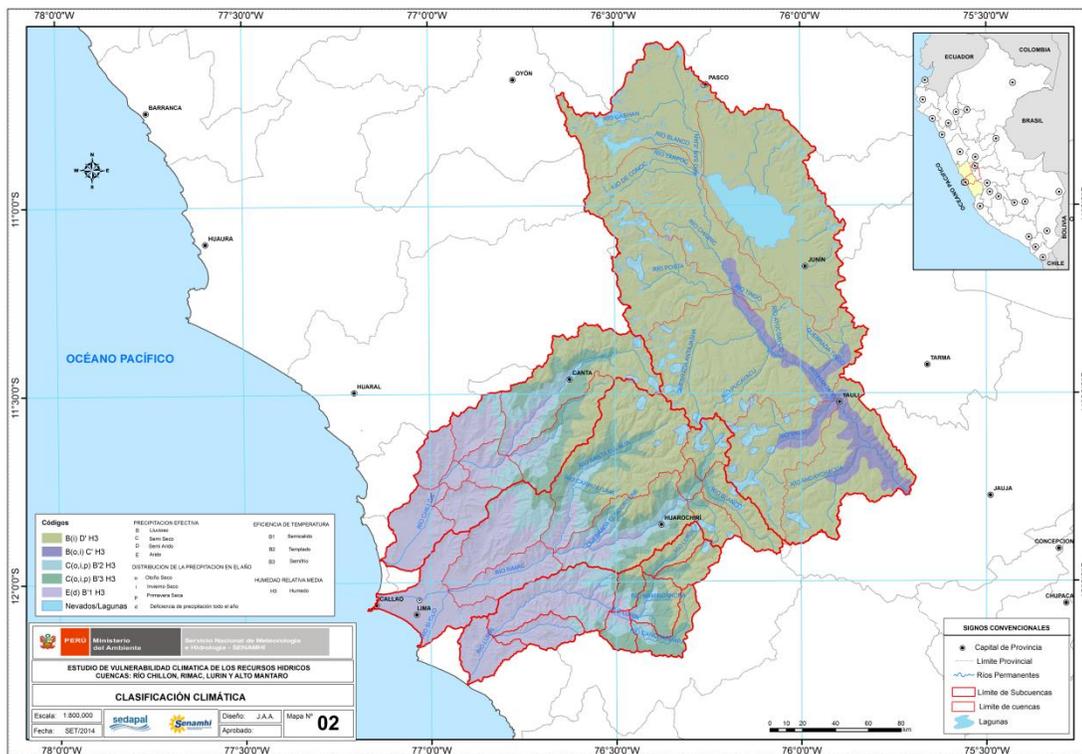


Figura 3. Clasificación Climática del área de estudio

#### 4.1.3 Aspectos ecológicos

De acuerdo al Sistema de Clasificación de Zonas de Vida propuesto por el Dr. Leslie R. Holdridge se han identificado diecisiete (17) formaciones ecológicas cuya clasificación se presenta en el Tabla 5, del cual se destaca que la mayor superficie es abarca por el tipo Paramo Pluvial Subalpino Tropical que corresponde a la cuenca del Alto Mantaro y representa el 45% de la superficie total analizada y la menor superficie es abarca por matorral desértico subalpino tropical con 0.3% del área total.

La Figura 4 muestra distribución espacial de los tipos de zonas de vida que caracterizan al área de interés.

Tabla 5. Tipos de Zonas de vida

No	Descripción	Símbolo	Área km <sup>2</sup>	Área (%)
1	Bosque Húmedo Montano Tropical	bh - MT	680.5	5
2	Bosque Muy Húmedo Montano Tropical	bmh - MT	127.2	1
3	Desierto Desechado Subtropical	dd - S	883.8	6
4	Desierto Perarido Montano Bajo Subtropical	dp - MBS	245.4	2
5	Desierto Perarido Montano Bajo Tropical	dp - MBT	88.7	1
6	Desierto Perarido Premontano Tropical	dp - PT	900.0	6
7	Desierto Superarido Subtropical	ds - S	851.0	6
8	Estepa Espinosa Montano Bajo Tropical	ee - MBT	447.8	3
9	Estepa Montano Tropical	e - MT	804.5	5
10	Matorral Desértico Montano Bajo Tropical	md - MBT	484.6	3
11	Matorral Desértico Montano Tropical	md - MT	166.6	1
12	Matorral Desértico Pre montano Tropical	md - PT	180.2	1
13	Matorral Desértico Subalpino Tropical	md - SaT	38.0	0.3
14	Nival Tropical	NT	222.3	1
15	Paramo Húmedo Subalpino Tropical	ph - SaT	493.5	3
16	Paramo Pluvial Subalpino Tropical	pmh - SaT	6815.2	45
17	Tundra Pluvial Alpino Tropical	tp - AT	1651.7	11
	Total General		15081.0	100

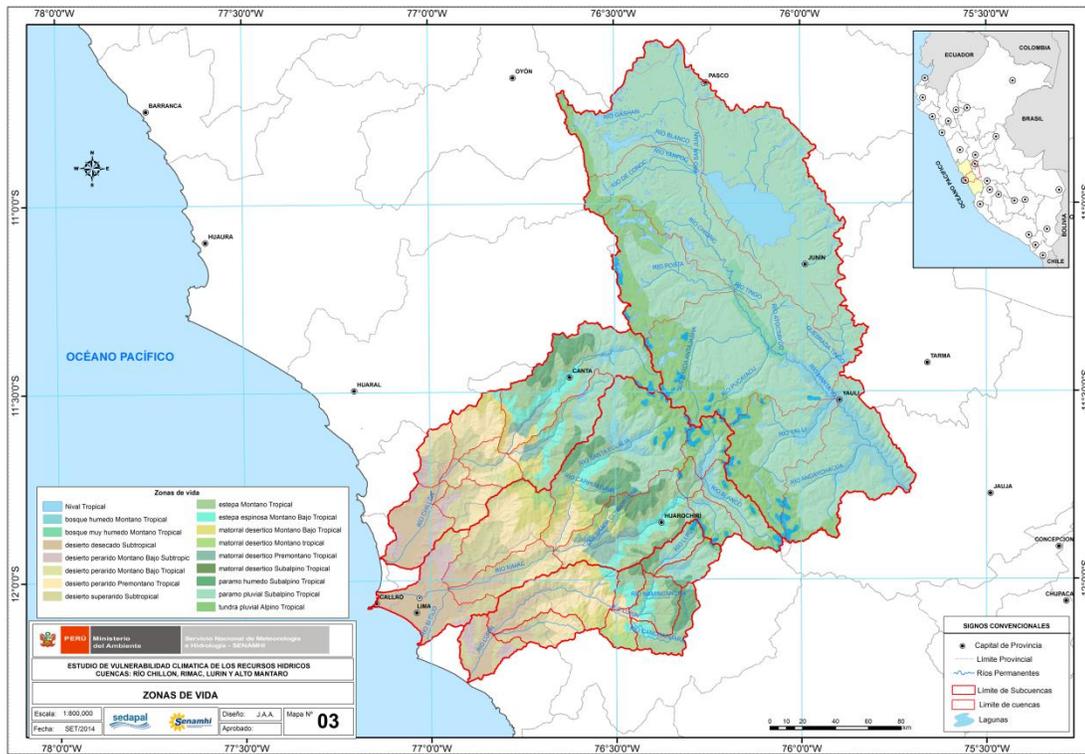


Figura 4. Zonas de vida en el área de estudio

#### 4.1.4 Geología

La Geología es variada, se han identificado 31 unidades geológicas en el área de estudio, cuya descripción, simbología y superficie abarcada por cada una de ellas, se presenta en la Tabla 6, del cual se puede observar que la formación Palegono Neogeno, Vulcano sedimentario (PN-vs) es el de mayor superficie y abarca el 20% del área total y la menor superficie es abarcada por cuerpos subvolcanicos 0.003% del área total.

La Figura 5 muestra distribución espacial de las características geológicas en el área de interés.

Tabla 6. Formaciones Geológicas

No	Descripción	Símbolo	Área km <sup>2</sup>	Área (%)
1	Carbonífero inferior continental	Ci-c	24.2	0.2
2	Carbonífero superior-Pérmico	CsP-m	48.5	0.3
3	Cretáceo superior inferior, volc-sed.	Kis-vs	1008.0	7
4	Cretáceo In. microgranito/granodiorita.	Ki-mzgr/gdi-j	8.1	0.1
5	Cretáceo Inf. Marino.	Ki-m	129.3	1
6	Cretáceo inf. sup. Marino.	Kis-m	1113.6	7
7	Cretaceo-sup. Subvolcanico Lurín	Ks-an	9.4	0.1
8	Cretáceo su. Paleogeno, continental.	KsP-c	1858.3	12
9	Cretáceo inf. Marino, Continental	Ki-mc	497.5	3
10	Cuaternario holoceno-continental.	Qh-c	1605.8	11
11	Cuerpos Subvolcanicos	P-an/ri	0.4	0.0
12	Devonico, marino.	D-m	75.0	0.5
13	Jurasico sup.-cretaceo inf. volc-sed.	JsKi-vs	43.0	0.3
14	Lagunas.	Lagunas	267.9	2
15	Neogeno mioceno plioceno-volcanico.	Nmp-v	341.8	2
16	Neogeno mioceno, volc-sedimentario.	Nm-vs	480.5	3
17	Neogeno plioceno-volcanico	Np-v	199.8	1
18	Neogeno, andesita-riolita,.	N-an/ri	169.1	1
19	Neogeno, granodiorita-tonalita.	N-gd/to	115.0	1
20	Paleogeno Neogeno, Volc. Sed.	PN-vs	3033.8	20
21	Permico superior continental.	Ps-c	265.2	2
22	Precambrico	PeA-e/gn	13.3	0.1
23	Silurico-Devonico, metasedimento	SD-ms	39.2	0.3
24	Stockcs de la region Andina.	PN-mgr/gr	40.6	0.3
25	Super Unidades, Santa Rosa	Ks-mzgr/gdi-sr	1444.3	10
26	Super Unidades, Tiabaya	Ks-mzgr/gdi-t	46.1	0.3
27	Superunidad Pampahuasi.	Ks-gd/to-pa	275.7	2
28	Superunidad, La Mina, Humaya.	Ks-di/to/gd	18.5	0.1
29	Superunidad, Patap.	Ki-di/gb-pt	195.7	1
30	Tonalitas y granodioritas paleogenas	P-to/gd	86.3	1
31	Triasico Sup, Jurasico inf. marino	Tsji-m	1626.9	11
	Total general		15081.0	100

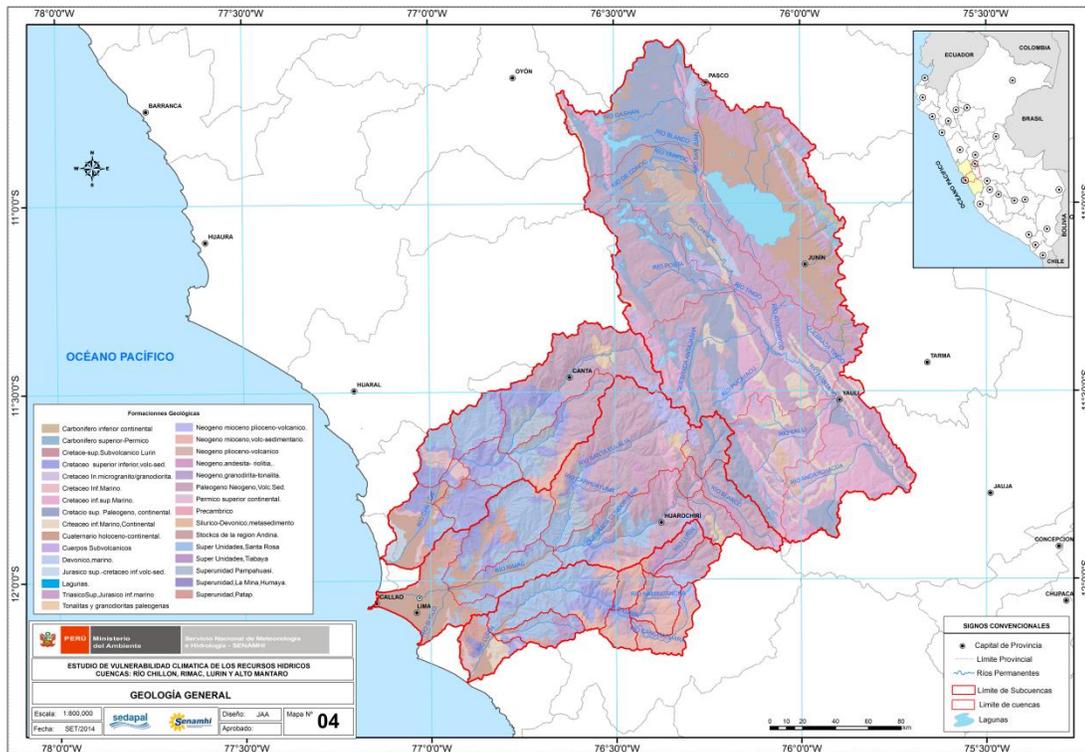


Figura 5. Formaciones geológicas en el área de estudio

#### 4.1.5 Capacidad de uso de Suelo

Los tipos de Capacidad de uso de suelo es variada, se han identificado 21, cuya descripción, simbología y superficie abarcada por cada una de ellas, se presenta en la Tabla 7, donde predominantemente se observa gran superficie con pastos de calidad agrológica baja que corresponde al 21% del área total y la menor superficie con 0.2% también de pastos con calidad agrológica baja y en estado de protección.

La Figura 6 se muestra distribución espacial de las características de la capacidad de uso del suelo en el área de interés.

Tabla 7. Características de la capacidad de uso del suelo

No	Descripción	Símbolo	Área km <sup>2</sup>	Área (%)
1	Centros poblados	Centros poblados	318.3	2
2	Cultivo en Limpio - Cultivo permanente, de calidad agrologica Alta y Media, respectivamente. Requieren riego continuo	A1s(r)-C2s(r)	159.1	1
3	Cultivo en Limpio - Cultivo permanente, de calidad agrologica Media y Baja, respectivamente. Requieren riego continuo	A2s(r)-C3s(r)	44.8	0.3
4	Lagunas	Lagunas	430.7	3
5	Nevados	Nevados	88.5	1
6	Pastos de calidad agrologica Baja - Protección	P3sec-Xse	951.4	6
7	Pastos de calidad agrologica Media - Protección	P2sc-Xse	444.4	3
8	Pastos de calidad agrologica Media y Baja, respectivamente, donde P3 presenta problemas de drenaje	P2sc-P3scw	331.5	2
9	Pastos de calidad agrologica Media, con riesgo de erosión - Protección	P2sec-Xse	2652.9	18
10	Protección - Cultivo Permanente - cultivo en Limpio, ambas de calidad agrologica Baja, requiere riego suplementario	Xse-C3se(r*)-A3se(r*)	58.7	0.4
11	Protección - Cultivo Permanente, cultivo en Limpio, ambas de calidad agrologica Baja, requiere riego continuo	Xse-C3s(r)-A3s(r)	0.3	0.002
12	Protección - Pastos de calidad agrologica Baja	Xse-P3sec	3133.9	21
13	Protección - Pastos Temporales   cultivo en Limpio, ambas de calidad agrologica Baja, los cultivos requieren riego suplementario	Xse-P3se(t)-A3se(r*)	839.2	6
14	Protección - Pastos Temporales, de calidad agrologica Baja	Xse-P3se(t)	413.4	3
15	Protección - Pastos, de calidad agrologica Baja	Xse-P3sc	23.0	0.2
16	Protección - Pastos, de calidad agrologica Media	Xse-P2sec	1259.8	8
17	Protección - Producción Forestal en Sierra - cultivo en Limpio, ambas de calidad agrologica Baja	Xse-F3se*-A3sec	516.4	3
18	Protección, en laderas de montaña con afloramiento litycos	Xse(le)	2819.0	19
19	Protección, en laderas de montaña glaciario	Xse(g)	469.7	3
20	Protección, en zonas con limitaciones por suelo y riesgo de erosión	Xse	53.7	0.4
21	Protección, en zonas de afloramiento litycos y mantos de arena	Xse(ld)	72.4	0.5
	Total general		15081.0	100

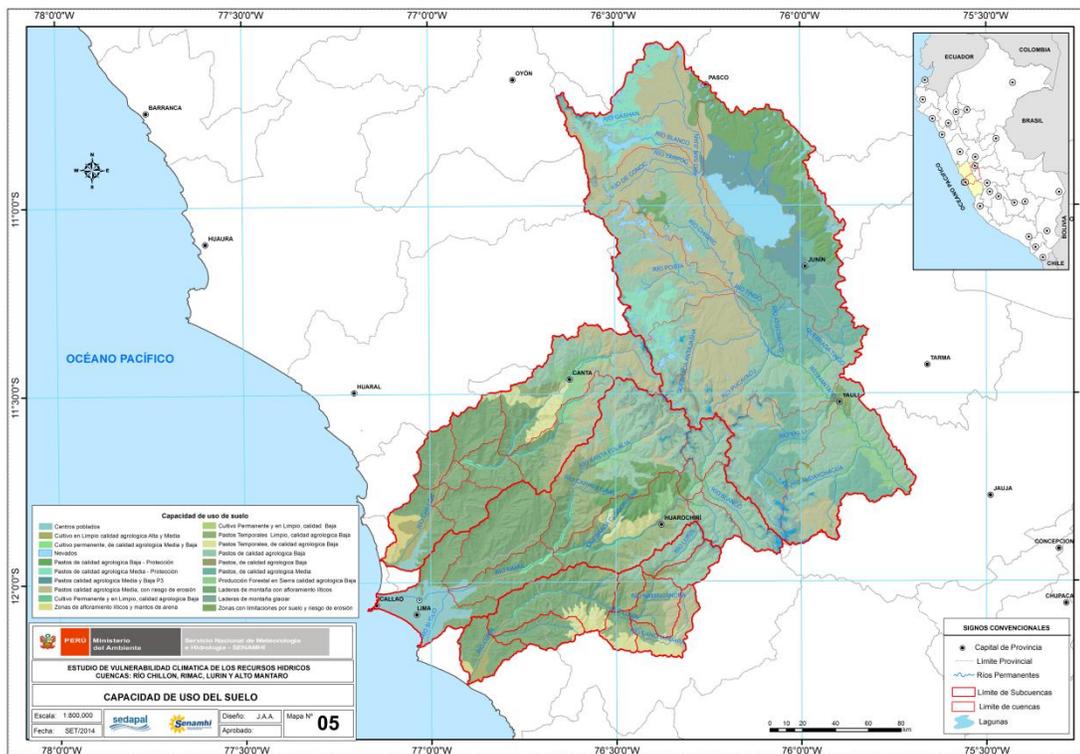


Figura 6. Capacidad de uso del suelo en el área de estudio

#### 4.1.6 Fisiografía

La Fisiografía en el área de estudio es variada, se han identificado 13 tipos, cuya descripción, simbología y superficie abarcada por cada una de ellas, se presenta en la Tabla 8, la fisiográfica más predominante es de características sierra altoandina colina y montaña una superficie que abarca el 48% del área total y la de menor superficie es de tipo sierra bajoandina planicie con 0.02% del área total.

En La Figura 7 se muestra la distribución espacial de las características fisiográficas del área de estudio.

#### 4.1.7 Geomorfología

##### 4.1.7.1 Formaciones Geomorfológicas

Las formaciones geomorfológicas en el área de estudio es variada, se han identificado 22 tipos, cuya descripción, simbología y superficie abarcada por cada una de ellas, se presenta en la Tabla 9, del cual se observa que la superficie más predominantes es la que se caracteriza por presentar elevación de mayor a 1000 m de altura y pendiente predominante con una superficie correspondiente al 35% del total. En La Figura 8 se muestra la distribución espacial de las formaciones geomorfológicas del área de estudio.

Tabla 8. Características Fisiográficas

No	Descripción	Área km <sup>2</sup>	Área %
1	Costa_Colina y Montaña	1701.7	11
2	Costa_Planicie	268.7	2
3	Costa_Planicie ondulada a disectada	23.4	0.2
4	Lagunas	424.4	3
5	Nevado	91.4	1
6	Centros Poblados	330.5	2
7	Sierra Altoandina_Colina y Montaña	7223.5	48
8	Sierra Altoandina_Planicie	498.2	3
9	Sierra Altoandina_Planicie ondulada a disectada	1437.3	10
10	Sierra Bajoandina_Montaña	1367.5	9
11	Sierra Bajoandina_Planicie	3.1	0.02
12	Sierra Mesoandina_Montaña	1681.7	11
13	Sierra Mesoandina_Planicie ondulada a disectada	29.6	0.2
	Total general	15081.0	100

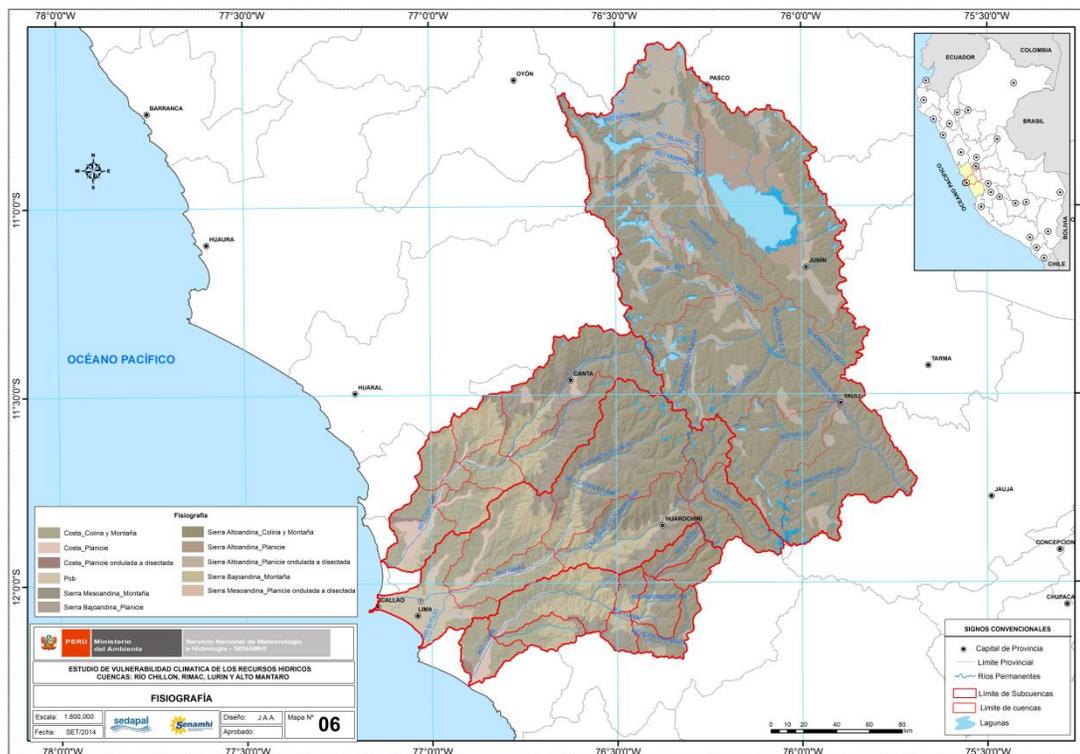


Figura 7. Fisiografía en el área de estudio

Tabla 9. Características Geomorfológicas

No	Descripción	Símbolo	Área km <sup>2</sup>	Área (%)
1	Llanura, de 0 a 4 % de pendiente	A-a	447.5	3
2	Llanura disectada, de 15 a 25 % de pendiente predominante	Ad-c	695.0	5
3	Llanura de 4 a 15 % de pendiente	Ao-b	743.5	5
4	Colina y vertiente montañosa modeladas en los volúmenes rocosos de litología heterogénea de la cordillera costanera y occidental andina.	C-d	1.9	0.01
5	Acumulación fluvial y torrencial reciente (holoconí)	Fv3-a	3.1	0.02
6	Lagunas	Lag	424.4	3
7	Planicie desértica, de 0 a 4 % de pendiente	Ll-a	100.2	1
8	Depresión topográfica y cuenca sedimentaria de edad diversa, así como superficie de estructura y superficie de erosión del sustrato geológico, rellenado y/o parcialmente cubierta por depósito glaciar, periglacial, aluvial y lacustre.	Llo-b	23.4	0.2
9	Nevados	Nev	91.4	1
10	Centros Poblados	Pob	336.5	2
11	Acumulación fluvial reciente (holocénica, preholocénica)	V-a	169.3	1
12	Colina y vertiente montañosa modeladas en los volúmenes rocosos de litología heterogénea de la cordillera costanera y occidental andina.	Vc-d	43.0	0.3
13	Elevación de 300 a 1000 m de altura y pendiente predominante	Vc-e	1656.9	11
14	Terreno plano, de 0 a 4 % de pendiente, con accidentes	Vg-a	50.7	0.3
15	Elevación de 0 a 1000 m de altura y pendiente predominante	Vs1-d	1863.7	12
16	Elevación mayor a 1000 m de altura y pendiente predominante	Vs1-e	5353.1	35
17	Elevaciones de 300 a 1000 m de altura y pendiente predominante	Vs2-d	100.3	1
18	Elevación de 300 a más de 1000 m de altura y pendiente	Vs2-e	1581.5	10
20	Elevación de 300 a 1000 m de altura y pendiente predominante	Vs3-d	3.3	0.02
21	Elevación de 300 a 1000 m de altura y pendiente mayores	Vs3-e	1364.2	9
22	Superficie de erosión local, acumulación coluvial	Vso-c	29.6	0.2
	Total General		15081.0	100

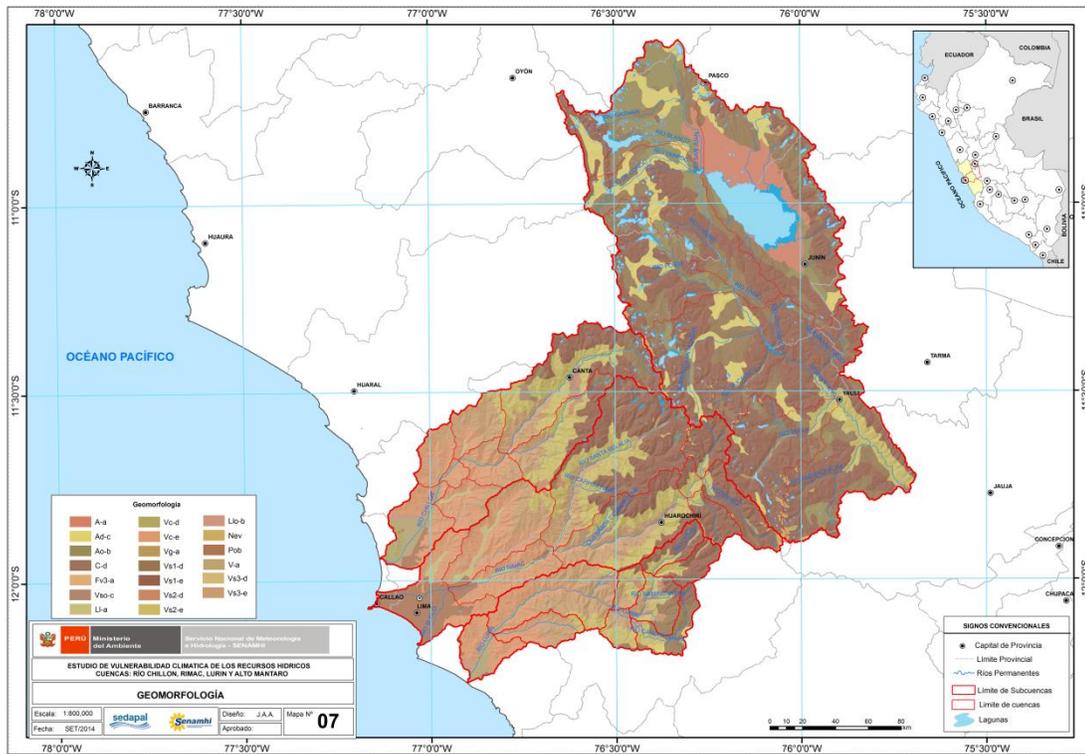


Figura 8. Formaciones geomorfológicas en el área de estudio

#### 4.1.7.2 Parámetros morfo métricos

Los parámetros morfométricos permiten analizar las características de la forma, relieve y red de drenaje del área de estudio, el cálculo de ello, es de gran importancia por que influyen de manera decisiva en la caracterización física de la cuenca y su respuesta hidrológica. Las características morfométricas estarán referidas al área de control hidrométrico en las estaciones Puente Magdalena, Chosica, Antapucro y Malpaso que corresponden a las cuencas Chillón, Rímac, Lurín, y Alto Mantaro respectivamente, con la finalidad de mostrar información adicional a la que ya se conoce.

#### A. Parámetro de Superficie

Se considera a toda el área cuyas precipitaciones son evacuadas por un sistema común de cauces de agua estando comprendido desde el punto donde se inicia esta evacuación hasta la desembocadura u otro punto de interés.

En la Tabla 10 se presenta las superficies totales para cada una de las cuencas comprendidas en el área de estudio.

Tabla 10. Áreas

No	Cuenca	Área Km <sup>2</sup>	Área de Control Km <sup>2</sup>
1	Chillón	2222.3	1257.9
2	Rímac	3503.9	2374.0
3	Lurín	1642.5	1475.0
4	Alto Mantaro	7727.9	5174.0
	Total	15081.2	

### B. Perímetro

El perímetro, está definido por la longitud de la línea de división de aguas, que se conoce como el parte aguas o divortium acuarium, el valor para cada cuenca de recepción en estudio se indica en la Tabla 11.

Tabla 11. Perimetro

No	Cuenca	Perímetro Km	Perímetro respecto al área de control (Km)
1	Chillón	305.7	266.4
2	Rímac	419.0	355.6
3	Lurín	252.4	216.2
4	Alto Mantaro	583.4	432.0

### C. Forma de la cuenca

Dada la importancia de la configuración de las cuencas, esta característica se cuantifica por medio de índices o coeficientes, los cuales relacionan el movimiento del agua y las respuestas de la cuenca a tal movimiento. La clasificación de la forma de la cuenca depende de la evaluación de los siguientes índices:

C.1 Índice de Gravelius, definió al índice de compacidad como la relación entre el perímetro y el perímetro de un círculo que contenga la misma área de la cuenca hidrográfica donde R es el radio del círculo equivalente en área a la cuenca. Por la forma como fue definido como K.  $K \neq 1$  es de forma alargada y para el caso  $K = 1$ , obtenemos una cuenca circular. La razón para usar la relación del área equivalente a la ocupada por un círculo es porque una cuenca circular tiene mayores posibilidades de producir avenidas superiores dadas su simetría.

C.2 Factor de forma. Es la relación entre el ancho medio (L) y la longitud del curso de agua más larga de la cuenca (L). El ancho medio se obtiene dividiendo el área de la cuenca por la longitud del curso de agua principal, este último se mide desde la desembocadura hasta la cabecera más distante de la cuenca.

Las expresiones matemáticas de cálculo el índice de Gravelius y Factor de forma es:

$$Kc = 0.28 * \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (21)$$

$$Ff = \frac{A_m}{L} = \frac{A / L}{L} = \frac{A}{L^2} \quad (22)$$

Donde:

- P : Perímetro (km)  
 A : Áreas de la cuenca hidrográfica (km<sup>2</sup>)  
 L : Longitud del río Principal (km)

En la Tabla 12 se presenta el valor del índice de Gravelius y factor de forma para cada cuenca de recepción en estudio. Cabe mencionar que preliminarmente se calcula la longitud del río principal para cada cuenca receptora.

Tabla 12. Forma de la cuenca

No	Área de control hidrométrico	Cuenca	Índice de Gravelius	Factor de Forma	
				Longitud de ríos (km)	Ff (adimensional)
1	Estación Puente Magdalena	Chillón	2.10	77.4	0.21
2	Estación Chosica	Rímac	2.04	92.7	0.28
3	Estación Antapucro	Lurín	1.58	64.1	0.36
4	Estación Malpaso	Alto Mantaro	1.68	83.6	0.74

#### D. Pendiente media del río

La pendiente media del río es un parámetro empleado para determinar la declividad de una corriente de agua entre dos puntos extremos, este influye en la velocidad de la esorrentía superficial de los cursos de agua; así a mayor pendiente habrá mayor velocidad de escurrimiento. La pendiente del cauce principal se ha obtenido a través de expresiones matemáticas como la propuesta por Taylor y Schwarz el cual está basado en la consideración de que el río está formado por tramos desiguales y pendientes desiguales. La expresión matemática de cálculo es:

$$S = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n Li}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{Li}{\sqrt{Si}} \right)} \right]^2 \quad (23)$$

Donde:

- S : Pendiente del cauce (m/m)  
 Li : Longitud del tramo i  
 Si : Pendiente del tramo i

En la Tabla 13 se presenta las pendientes estimadas para cada río principal y en la Figura 9 se observa el perfil del río Rímac, Chillón, Lurín y Alto Mantaro respecto a la estación de control hidrométrico Chosica, Puente Magdalena, Antapucro y Malpaso. En el Anexo se muestra el cálculo de la pendiente por tramos para respecto a la cuenca con control hidrométrico

Tabla 13. Pendiente del río Principal

No	Área de control hidrométrico	Cuenca	Pendiente (%)
1	Estación Chosica	Rímac	5.0
2	Estación Puente Magdalena	Chillón	5.4
3	Estación Antapucro	Lurín	6.3
4	Estación Malpaso	Alto Mantaro	0.5

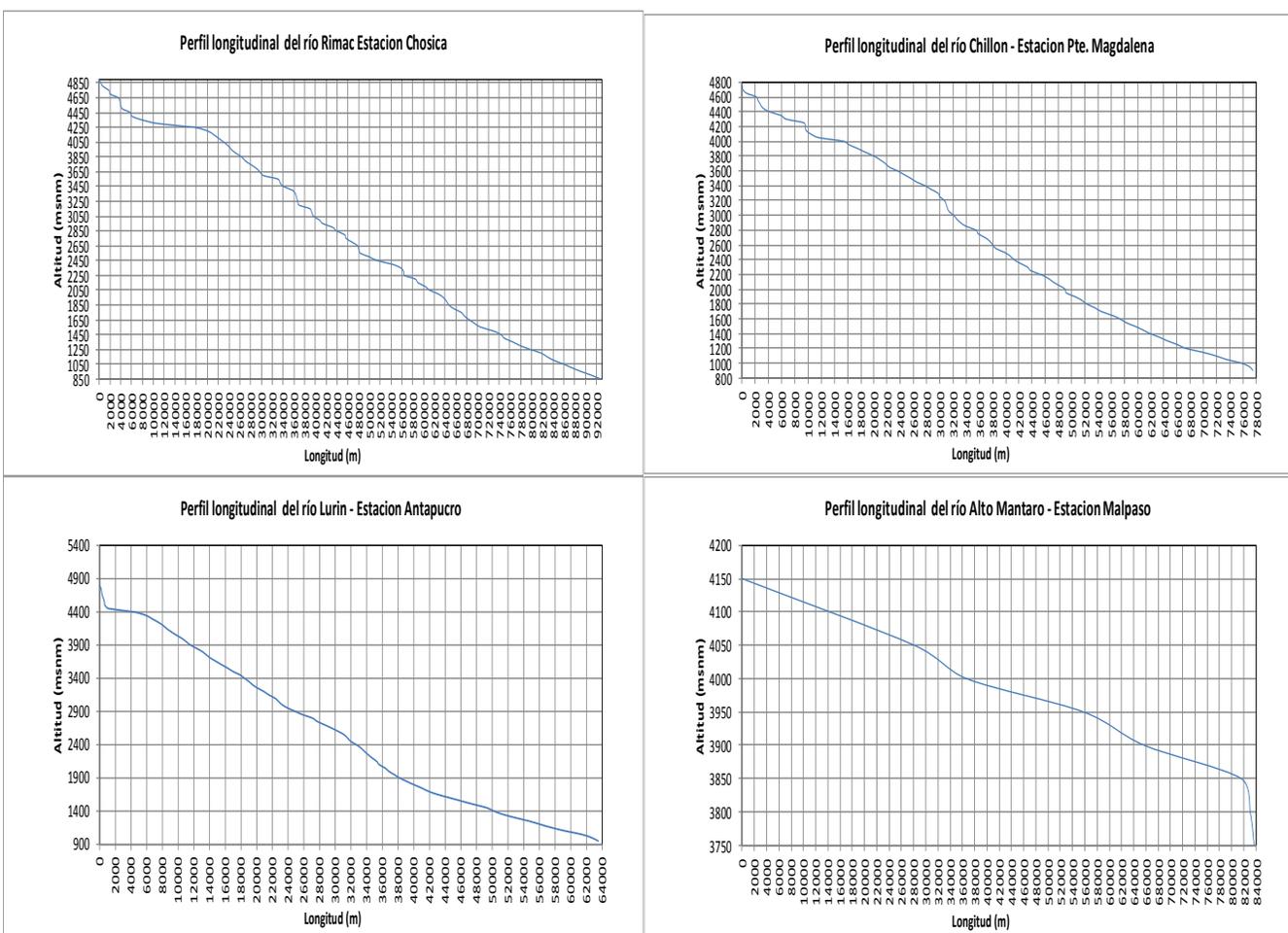


Figura 9. Perfil longitudinal de los ríos Chillón, Rímac, Lurín y Alto Mantaro

#### 4.2.1 Información cartográfica

- Para la ubicación del ámbito de estudio se utilizó la base digital del Perú disponibilizada en el año 2002 por el Ministerio de Educación a escala 1/100000; y digitalizada por el Instituto Geográfico Nacional - IGN (información sobre ríos, curvas de nivel, centros poblados, lagos y otros en formato shape).
- Para la delimitación de la Subcuenca se utilizó el Modelo Numérico del Terreno de 90 m de resolución espacial disponibilizada por el Proyecto SRTM de USA del sitio WEB <http://srtm.csi.cgiar.org>. Este modelo fue re proyectado ya que el original está en coordenadas geográficas y datum WGS84. Además, se descargó el Modelo Numérico del Terreno ASTER-GDEM de 30 m de resolución espacial de libre disponibilidad en imágenes de (1° x 1°) <http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem-wist.asp>. Esta información da un mejor detalle de la red hídrica.
- El límite de unidades hidrográficas se recopiló del estudio Delimitación y Codificación de Unidades Hidrográficas del Perú, elaborado por la Ex Intendencia de Recursos Hídricos del INRENA, en el 2007, aplicando la metodología de Pfafstetter.
- Mapas de características biofísicas del Perú (geomorfología, capacidad de uso del suelo, geología y zonas de vida) elaborado por el Ministerio de Agricultura - PLANGRAC, 2012.

#### 4.2.2 Programas

Las herramientas informáticas utilizadas para el tratamiento de los datos espaciales y tabulares para el presente estudio son:

- ArcGIS
- Microsoft Excel - Word 2010.
- R.

Para el desarrollo del análisis regional de frecuencias basado en LM, CAZALAC con el soporte de IWR y MGS Engineering Consultants, WA,USA, elaboró L-RAP, en ambiente windows. Este es un software comercial que aplica las primeras 4 de las 5 etapas conocidas de la metodología. Para adicionar capacidades de mapeo, CAZALAC elaboró L-MAP. Un esfuerzo adicional lo ha hecho recientemente el Centro Categoría 2 de UNESCO ICIWarm, al generar el software gratuito ICI-RAFT, en ambiente windows. Más recientemente, con apoyo de los proyectos EUROCLIMA-RALCEA, de la Comisión Europea para ALC, el Centro Común de Investigación (JRC) ha financiado la elaboración de un software gratuito para la aplicación de la metodología. El software elaborado por JRC se basa en los scripts en R elaborados por Núñez (2010-2012) . Finalmente, Núñez (2012-2013) ha puesto a disposición de los interesados, una versión gratuita en ambiente R de la metodología que permite su aplicación completa, con la incorporación de una amplia gama de opciones de análisis, salidas tabulares, gráficas y mapas y es la que se ha utilizado en el presente estudio.

#### 4.2.3 Información climática

La Información de precipitación correspondiente al todo el registro histórico de las estaciones distribuidas en las cuencas de los ríos Chillón, Rímac, Lurín y Alto Mantaro, proporcionada por el servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú -SENAMHI.

En la Tabla 14 muestra las características de ubicación geográfica de la red de estaciones recopiladas para el análisis de la caracterización de la sequía meteorológica, cabe indicar la precipitación media es el promedio de su registro histórico de años completos. Cabe indicar que no se ha realizado ningún procedimiento para el relleno de datos faltantes. Se recopilieron datos del record histórico de 59 estaciones que es administrada y operada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), la longitud de sus registros varían de 13 a 58 años (1930-2013).

En la Figura 10 se muestra la distribución espacial, cabe mencionar que las estaciones se emplazan desde el norte hacia el sur cuencas del río Huaura hasta cuenca del río Cañete, en la vertiente del Pacífico y cuenca del río Mantaro en la vertiente del Atlántico.

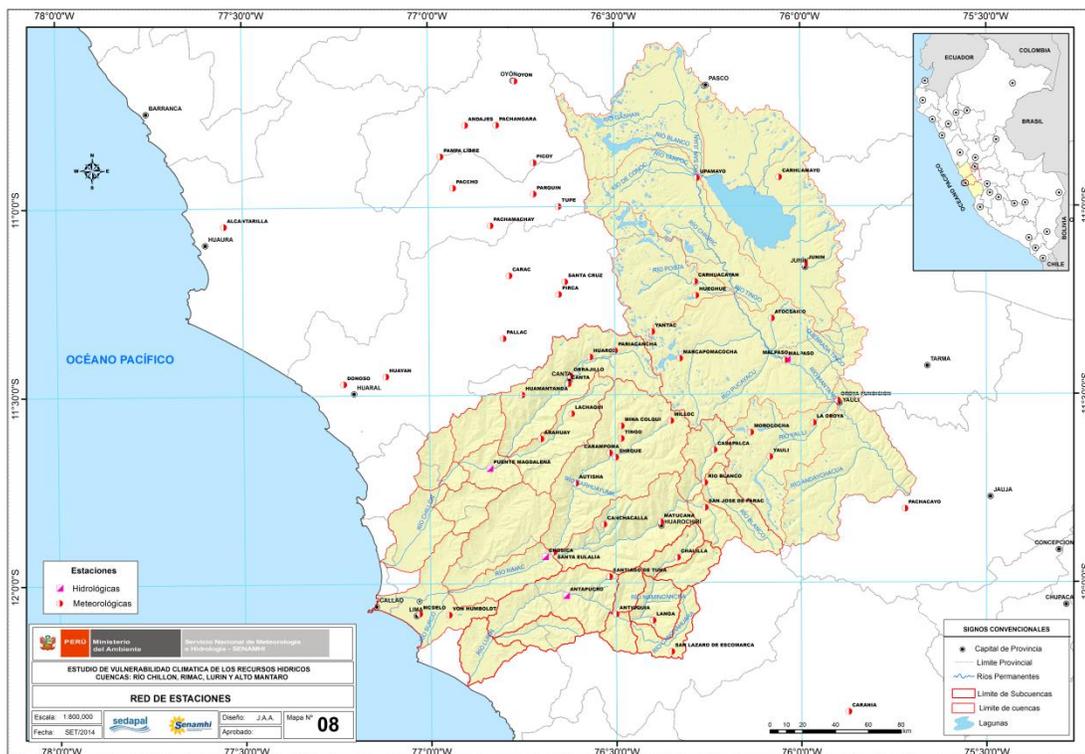


Figura 10. Red de estaciones meteorológicas evaluadas

Tabla 14. Estaciones Meteorológica en el área de estudio

No	Código	Estación	Cuenca	Longitud (grados)	Latitud (grados)	n	CV
1	000604	La Oroya	Mantaro	-75.97	-11.58	19	0.25
2	000629	Oroya Fundición	Mantaro	-75.90	-11.52	27	0.17
3	151204	Arahuay	Chillón	-76.70	-11.62	28	0.36
4	151205	Canchacalla	Rímac	-76.53	-11.84	24	0.54
5	151209	Chosica	Rímac	-76.73	-11.93	21	1.49
6	151210	Rio Blanco	Rímac	-76.26	-11.73	24	0.31
7	151213	Sheque	Rímac	-76.50	-11.67	19	0.36
8	151214	Langa	Rímac	-76.40	-12.10	29	0.50
9	155107	Pampa Libre	Huaura	-76.97	-10.87	38	0.58
10	155111	Tingo	Rímac	-76.48	-11.62	17	0.23
11	155112	Pariacancha	Chillón	-76.50	-11.38	44	0.19
12	155113	Mina Colqui	Rímac	-76.48	-11.58	20	0.26
13	155115	Carhuacayan	Mantaro	-76.28	-11.20	36	0.18
14	155119	Chalilla	Lurín	-76.33	-11.93	14	0.44
15	155121	Yantac	Mantaro	-76.40	-11.33	42	0.31
16	155122	Autisha	Rímac	-76.61	-11.74	30	0.46
17	155200	Paccho	Huaura	-76.93	-10.95	33	0.40
18	155201	Andajes	Huaura	-76.90	-10.78	41	0.27
19	155202	Santa Cruz	Huaura	-76.63	-11.20	22	0.18
20	155203	Carac	Chancay Huaral	-76.78	-11.18	13	0.31
21	155204	Pachangara	Huaura	-76.82	-10.78	19	0.44
22	155205	Pallac	Chancay Huaral	-76.80	-11.35	47	0.39
23	155206	Laguna Surasaca	Huaura	-76.78	-10.52	18	0.21
24	155207	Pachamachay	Huaura	-76.83	-11.05	20	0.43
25	155209	Huamantanga	Chillón	-76.75	-11.50	46	0.38
26	155212	Parquin	Huaura	-76.72	-10.97	39	0.31
27	155213	Santa Eulalia	Rímac	-76.67	-11.92	35	0.98
28	155214	Pirca	Chancay Huaral	-76.65	-11.23	42	0.38
29	155217	Lachaqui	Chillón	-76.62	-11.55	26	0.29
30	155218	Huaros	Chillón	-76.57	-11.40	40	0.42

Continua

No	Código	Estación	Cuenca	Longitud (grados)	Latitud (grados)	n	CV
31	155219	Tupe	Huaura	-76.65	-11.00	17	0.25
32	155223	Carampoma	Rímac	-76.52	-11.66	32	0.33
33	155224	Santiago de Tuna	Lurín	-76.52	-11.98	35	0.54
34	155225	San Jose de Parac	Rímac	-76.26	-11.80	32	0.25
35	155235	Yauli	Mantaro	-76.08	-11.67	17	0.53
36	155446	Casapalca	Rímac	-76.23	-11.65	21	0.24
37	155514	Milloc	Rímac	-76.35	-11.57	24	0.24
38	156100	Antioquia	Lurín	-76.50	-12.08	38	0.71
39	156102	San Lazaro de E.	Lurín	-76.35	-12.18	17	0.38
40	156109	Carania	Cañete	-75.87	-12.34	39	0.28
41	200214	Huengue	Mantaro	-76.28	-11.24	38	0.15
42	200216	Pachacayo	Mantaro	-75.72	-11.81	39	0.16
43	200236	Junin	Mantaro	-75.99	-11.15	36	0.17
44	300001	Atocsaico	Mantaro	-76.08	-11.30	36	0.22
45	300002	Carhuamayo	Mantaro	-76.06	-10.92	44	0.15
46	300006	Malpaso	Mantaro	-76.04	-11.41	41	0.15
47	300007	Morococha	Mantaro	-76.13	-11.60	41	0.17
48	300013	Upamayo	Mantaro	-76.28	-10.93	44	0.14
49	000501	Alcantarilla	Chancay Huaral	-77.55	-11.05	43	0.83
50	000539	Huayan	Chancay Huaral	-77.12	-11.45	41	0.80
51	000541	Oyon	Huaura	-76.77	-10.67	37	0.24
52	000542	Picoy	Huaura	-76.72	-10.88	44	0.23
53	000546	Donoso	Chancay Huaral	-77.23	-11.47	25	0.48
54	000547	Canta	Chillón	-76.63	-11.47	20	0.42
55	000548	Matucana	Rímac	-76.38	-11.84	38	0.34
56	000549	Marcapomacocha	Mantaro	-76.33	-11.40	36	0.22
57	000610	Von Humboldt	Rímac	-76.95	-12.08	58	0.48
58	000617	Modelo	Rímac	-77.03	-12.08	23	0.36
59	000633	Huarochiri	Mala	-76.23	-12.13	27	0.17

Donde:

m : longitud de la serie anual con los doce meses completos

La Figura 11 muestra el histograma de distribución de la longitud de datos de precipitación de las 60 estaciones recopiladas para el análisis, en él se observa la mayor frecuencia (14%) corresponde a una longitud de entre 35 a 40 años de información y la menor frecuencia (2%) equivale a longitudes entre 10 y 15 años de información.

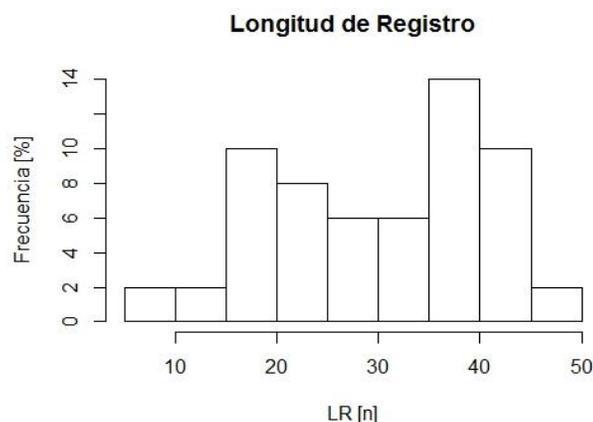


Figura 11. Histograma de longitud de registros

### 4.3 Aspectos metodológicos

El desarrollo metodológico ha tomado como referencia las directrices de manuales preparados por CAZALAC elaborados durante el 2008-2012 a fin de estandarizar los métodos de análisis para la elaboración del Atlas Regional de Sequías que involucra a los países de Latina América y el Caribe.

#### 4.3.1 Selección de estaciones y control de calidad de datos

En la zona de estudio se ha logrado recopilar 50 estaciones meteorológicas que tuvieron diferentes periodos de observación, algunas fueron clausuradas o paralizadas porque cumplieron objetivos específicos y otras actualmente están en funcionamiento. Para los fines de este proyecto se han seleccionado solo las que cuentan con información de precipitación superior a 10 años, siendo sugerido 15 años como mínimo para el Análisis regional de frecuencias. Los datos pluviométricos mensuales han sido organizados en una base de datos de Microsoft Access para ser administrados por el software hidrológico HYDRACCESS. HYDRACCESS V.4.2 desarrollado por el IRD (Instituto Francés para el Desarrollo). El programa está disponible en el siguiente sitio web: [http://www.mpl.ird.fr/hybam/outils/hydraccess\\_sp.htm](http://www.mpl.ird.fr/hybam/outils/hydraccess_sp.htm)

Para verificar los supuestos del análisis de frecuencia regional, es una práctica habitual verificar la hipótesis de que las observaciones en diversos sitios son estacionarios o libres de tendencias, independientes y homogéneos y/o idénticamente distribuidos. El Análisis Exploratorio de Datos, ha comprendido la elaboración de diagramas de cajas, Histogramas de frecuencia de frecuencia de precipitación y gráficos que relacionan los

cuantiles teóricos y observados para cada estación a fin de identificar los datos que se apartan del comportamiento general de la muestra, a escala anual y mensual.

Este tipo análisis aunque detecta la posible presencia de datos dudosos dentro de una estación, para la depuración de los mismos ha sido necesario corroborar con información existente en estaciones vecinas o que forman parte de una misma región climática, en cierta manera se ha hecho un control espacial que pueden ser producidos por eventos climáticos, como el ENOS (El Niño Oscilación Sur) que tiene un fuerte impacto la vertiente del Pacífico.

La evaluación de la tendencia de los datos de precipitación anual por estación fue sometida al test de Mann-Kendall (MK) y la estadística de pendiente Sen. Estos test son de los más recomendados para analizar tendencia de una serie de tiempo de datos hidrológicos. Se contrastó la hipótesis nula de tendencia igual a 0 respecto a la hipótesis alternativa de tendencia distinta de 0. La prueba de MK, también llamada prueba de Kendall tau por Mann (1945) y Kendall (1975), es la prueba no paramétrica basada en el rango para evaluar la importancia de una tendencia, y ha sido ampliamente utilizado en detección de tendencia en estudios hidrológicos.

La hipótesis nula  $H_0$ : No existe una tendencia en la serie  $\{X_i, i = 1, 2, \dots, n\}$ .

La hipótesis alternativa es  $H_a$ : Hay una tendencia en la serie. Se basa en la prueba de Mann-Whitney, donde una ruptura puede ser definida de manera general por un cambio en la ley de probabilidad  $f(x)$  de una serie cronológica en un instante dado (normalmente desconocido).

El análisis de independencia serial o análisis de autocorrelación se verificó para las series mediante el gráfico de autocorrelogramas. La función de autocorrelación (FAC) y la función de autocorrelación parcial (FAP) son herramientas cualitativas útiles para evaluar la presencia de autocorrelación en retardos individuales. Para comprobar la correlación serial de la serie de precipitaciones mensuales para las 60 estaciones recopiladas.

#### 4.3.2 Identificación de regiones homogéneas

Para determinar las regiones homogéneas preliminarmente se ha realizado un agrupamiento de estaciones mediante métodos estadísticos multivariados: Análisis de Conglomerados o Cluster y K-means; así como se tomó a priori la agrupación obtenida con el método regional de Índices pluviométricos (SENAMHI, 2012). Con estas técnicas se busca determinar grupos de estaciones que sintetice el comportamiento pluviométrico regional de cada grupo.

El agrupamiento definitivo de las estaciones determinado fue testado para ratificar las regiones homogéneas de precipitación, mediante el test de discordancia y de homogeneidad, propuestas por Hosking y Wallis.

Para el análisis de Conglomerados ó Cluster, Kmeans , tendencia e independencia se ha aplicado el programa XLSTAT, que es un complemento en Excel y tiene diferentes opciones para los agrupamientos, los cuales se han explorado para obtener agrupamientos coherentes con las características climáticas de la zona de estudio. XLSTAT v.2014 está disponible en forma gratuita durante 30 días en el siguiente sitio web <http://www.xlstat.com/es>.

En resumen, este es un proceso iterativo para lo cual se utilizaron dos procedimientos: a) métodos multivariados: cluster y kmeans y b) verificación de cada región basadas en la prueba de heterogeneidad ( $H_1$ ) definido por Hosking & Wallis, 1997; y se utiliza para evaluar cuando un grupo de estaciones pueden ser tratadas en su conjunto como una región homogénea. En particular,  $H_1$  compara la variabilidad de los L-Momentos muestrales del grupo de estaciones que conforman la región con la esperada, obtenida a partir del empleo de técnicas de simulación. Este análisis permite evaluar cuando la variabilidad observada en las relaciones de los L-Momentos del grupo de estaciones que conforman la región es atribuible a variaciones fortuitas o por el contrario muestra la existencia de heterogeneidad. La prueba de heterogeneidad empleada está basada en el coeficiente de L-Variación (L-CV). Existen dos medidas adicionales de heterogeneidad, denominadas  $H_2$  y  $H_3$ , 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 15 muestra los rangos del estadístico de heterogeneidad propuestos por Wallis et. al., 2007) y por Hosking y Wallis, 1997.

Tabla 15. Valores críticos de heterogeneidad originales y actualizados

Heterogeneidad	Hosking y Wallis (1997)	Wallis et al (2007)
Homogénea	$H_1 < 1$	$H_1 < 2$
Posiblemente heterogénea	$1 < H_1 < 2$	$2 < H_1 < 3$
Heterogénea	$H_1 > 2$	$H_1 < 3$

Por otro lado, un adecuado criterio en la formulación de regiones homogéneas es que las estaciones que la integran no presenten propiedades que las hagan discordantes con el resto de las estaciones dentro de la región, para ello Hosking y Wallis (1997) propone el estadístico, medida de discordancia (D) para la identificación de estaciones inusuales en comparación con el resto de las estaciones de la región.

Para ello, los autores construyen una elipse concéntrica cuyas coordenadas corresponden a un par de puntos (por ejemplo, sobre una gráfica L-CV vs L-CS) con valores correspondientes a los L-CV y L-SK regionales. La elipse presenta los ejes mayores y menor, escogidos para dar el mejor ajuste a los datos, determinados por la matriz muestral de covarianza de los L-Momentos ratios de los sitios. Los valores elevados de D son característicos de estaciones que se apartan del comportamiento general del resto de estaciones. Se definen distintos umbrales en función del número de estaciones que constituyen la región óptima según lo indica en la Tabla 16.

Tabla 16. Valores críticos de la medida de discordancia, D

Nº de estaciones en la región	Valor Critico, D	Nº de estaciones en la región	Valor Critico D
5	1.333	11	2.632
6	1.648	12	2.757
7	1.917	13	2.869
8	2.140	14	2.971
9	2.329	>15	3.000
10	2.491		

#### 4.3.3. Selección de la distribución regional de frecuencia.

Una vez comprobado que la región resulta homogénea, la prueba de bondad de ajuste tiene por objetivo constatar objetivamente cuándo una distribución determinada se ajusta a los datos aceptablemente; si se dispone de un conjunto de distribuciones candidatas, el objeto es seleccionar aquella que mejor se ajusta. La bondad de ajuste juzgará en qué medida los momentos LSk y Lk de la distribución seleccionada se ajustan bien al promedio regional de LSk y Lk de los datos observados.

La medida de la bondad de ajuste para una distribución de tres parámetros propuesta por Hosking y Wallis (1993) se expresa como  $Z^{DIST}$  es suficientemente cercano a cero, siendo un valor razonable para este criterio el grado de significación del 90%, que corresponde a  $|Z^{DIST}| < 1.64$ .

En el ARFLM se utiliza modelos de distribuciones mucho más generales y flexibles a la hora de ajustar los datos debido a que están constituidos por 3 o 4 parámetros respecto a los modelos convencionales que son poco flexibles ya que está constituido por 2 parámetros. Las distribuciones analizadas en el presente estudio son de 3 parámetros como: Pareto Generalizada, Valor Extremo Generalizado, Generalizada Normal, Pearson Tipo III y Logística Generalizada.

#### 4.3.4 Estimación de los cuantiles regionales de frecuencia.

Una vez escogida una función de distribución, se estimarán los cuantiles asociados a un cierto período de retorno. Para cada una de las  $M$  estaciones de la región se determinan los primeros cuatro L-momentos  $\lambda_j$ , y se hacen adimensionales dividiendo cada uno de ellos por la media de serie  $\lambda_1$ . Los valores adimensionales los L Momentos, son usados para determinar los correspondientes valores regionales  $\lambda_j^R$

$$\lambda^R(j) = \sum_{s=1}^M \lambda(j) g_s \cdot [N_s/L] \quad (24)$$

Donde la contribución de cada estación con  $N_i$  observaciones al promedio se pondera en función de la longitud de la serie como:

$$L = \sum_{j=1}^M N_j \quad (25)$$

Obtenidos los L-momentos muestrales y caracterizada a través de ellos la función de distribución acumulada, se puede plantear  $x = x(F)$  para distintos períodos de retorno y obtener los cuantiles dividiendo estos valores extremos de la variable por la media anual muestral. Esto es:

$$Q_i(F) = \mu_i q(F) \quad (26)$$

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

#### 4.3.5 Mapeo

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.

El mapeo comprende la especialización de la caracterización de una sequía empírica a un determinado tiempo de retorno.

- Ajuste de la función L-momentos versus Precipitación media anual

La base del mapeo de cuantiles, probabilidades o periodos de retorno, aplicando el ARF basado en L-momentos, es la búsqueda de una función de mejor ajuste que describa la relación entre los L-momentos y la PMA. Schaefer *et al* (2006) y Wallis *et al* (2007) consideran la siguiente ecuación como la más recomendada para realizar el ajuste:

$$L - \text{Momento} - \text{Ratio} = \alpha \cdot e^{-\beta (RPMA)} + \delta \quad (27)$$

Donde:

RPMA	: Ratio Precipitación media anual,
L-Momento	: Momentos lineales LCv, LSk y LK
$\alpha$ , Alfa	: Factor de escala
$\beta$ , Beta	: Factor de decaimiento
$\delta$ , Delta	: Valor límite del L-Momento calculado

El buen ajuste depende del número de pares de puntos disponibles para su gráfico y análisis, a medida que se obtengan más puntos, se espera un mejor ajuste. Sin embargo, un mayor número de puntos, para una misma cantidad de estaciones disponibles, implica mayor número de regiones con menos estaciones por región homogénea. De este modo se debe alcanzar un equilibrio entre estos factores. El aspecto fundamental en el procedimiento de ajuste, consiste 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 tengan 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, obtenidos los L-momentos en cualquier punto, son utilizados en la determinación de los parámetros de las funciones de densidad de probabilidad y, por tanto, de las probabilidades o cuantiles asociados. La determinación de los parámetros de la función puede calcularse mediante técnicas de optimización.

Los valores de los pares de puntos a utilizar en el ajuste no son los L-momentos de cada estación, sino los correspondientes a los L-momentos de cada una de las regiones evaluadas, a lo largo de un gradiente de precipitación media anual. Para la obtención de un conjunto de L-momentos regionales, se debe al menos obtener una subdivisión en términos de sub-regiones homogéneas. Esto, debido a que los L-momentos de los sitios (estaciones) desde donde se obtienen las observaciones, presentan una alta variabilidad debido, sobre todo, a distinta longitud de los registros.

- Mapeo de cuantiles /probabilidades mediante uso de información geográfica  
Desde el punto de vista del tipo de información que se puede obtener de un análisis regional de frecuencias basado en L-momentos para en hidrología, existen tres tipos de productos:

- Un mapa de probabilidades, el cual represente en un medio cartográfico adecuado, la probabilidad ocurrencia de un evento especificado. Por ejemplo, la probabilidad de que la precipitación anual en un sitio cualquiera, sea de un 40% de la que se esperaría en un año normal, considerando éste último como un año promedio, por ejemplo. Esto es equivalente a un 60% de déficit.
- Un mapa de cuantiles, el cual, para una determinada probabilidad de ocurrencia, represente la magnitud de un evento asociado. Por ejemplo, cual es la precipitación anual esperada, con una probabilidad del 85% o un periodo de retorno de X años, por ejemplo.
- Un mapa de períodos de retorno, el cual representa el periodo de recurrencia medio de un evento con determinada magnitud. Para el caso de sequías, es decir, probabilidad de no excedencia, expresaría cada cuantos años en promedio, sería esperable que la precipitación anual no supere, por ejemplo, el 40% de la precipitación esperada en un año promedio.

En algunos casos, como en el caso de los mapas de cuantiles, se requerirá que la función de densidad de probabilidad sea invertible o relativamente fácil de determinar por métodos numéricos. En casos de funciones más complejas, como las funciones Kappa de 4 parámetros, o la distribución Wakeby de 5 parámetros, puede verse limitado el uso de métodos tradicionales basados en álgebra de mapas para la obtención de los productos mencionados.

Cabe indicar que habiendo una gran cantidad de procedimientos y metodologías utilizadas para la obtención de mapas de precipitación, el analista debe estar consciente de que las estimaciones del mapa de cuantiles, probabilidad o periodo de retorno, están determinadas por la calidad del mapa de precipitación media anual utilizado.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1 Etapa 1. Control de calidad de datos y revisión de supuestos del ARF

Se realizó un esfuerzo considerable en la revisión y control de calidad de los datos de la variable precipitación, con la finalidad de eliminar falsos valores, asociados a una amplia variedad de mediciones, su registro, presencia de errores de transcripción entre otros. La Tabla 17 presenta las características más resaltantes de la información de las 59 estaciones recopiladas. La longitud del período de registro varió de 13 años como mínimo (estación Carac) y 58 años como máximo (estación Von Humboldt) , el coeficiente de variación varia de 14% (estación Upamayo) y 98 % (estación santa Eulalia).

Tabla 17. Estadísticas descriptivas de los registros de precipitación

Variables	Estadísticas
Total de estaciones	59
Rango de Precipitación media anual promedio (mm)	6 y 1155
Rango de Precipitación media mínimo anual (mm)	0 y 663
Rango de Precipitación media máximo anual (mm)	18 y 2400
Desviación estándar de la precipitación media anual (mm)	4 y 550
Coefficiente de variación de la precipitación media anual (%)	14 y 98
Récords total de años completos	1918
Longitud de series (años)	13 y 58

La Figura 12 al 16 muestra la distribución temporal de toda la información de precipitación disponible a escala anual, de ello se deduce que la distribución de la lluvia en estaciones emplazadas en la cuencas Chillón, Rímac y Lurín fluctúan en el rango de 6 mm (Estación Alcantarilla) a 913 mm (Estación Milloc), asimismo las estaciones emplazadas en la cuenca del Alto Mantaro fluctúan entre 563 mm (Estación Oroya Fundición) a 1167.4 mm (Estación Marcapomacocha) según lo observado presentan una alta variabilidad, y la mayor amplitud de variación se presenta en Yauli.

La amplitud de variación para estaciones emplazadas en la vertiente del Pacífico y Atlántico tienen alta variabilidad debido principalmente a la influencia de la elevación o topografía.

Asimismo, en la distribución temporal de datos podemos apreciar la longitud de la información disponible y periodos o años con información faltante, así como las series de mayor registro en el periodo 1940 al 2013. El único valor que causo sospecha de ser incorrecto fue lo registrados en la estación Pachangara con una precipitación 1872.5 mm en 1964, el cual fue excluido del análisis, ya que esto modulo no se asemeja a lo registro en estaciones vecinas además.

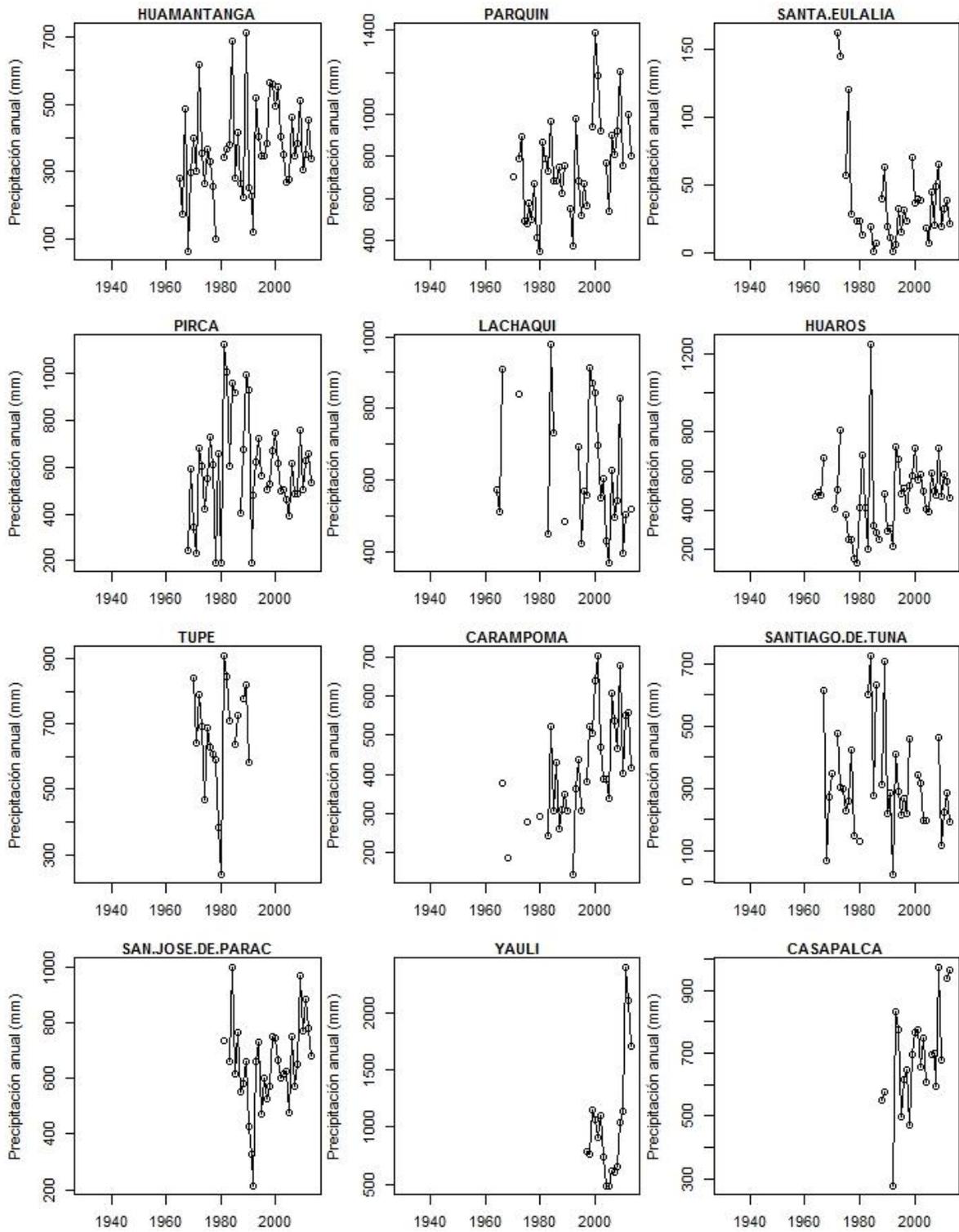


Figura 12. Series anuales por estación Huamantanga – Casapalca

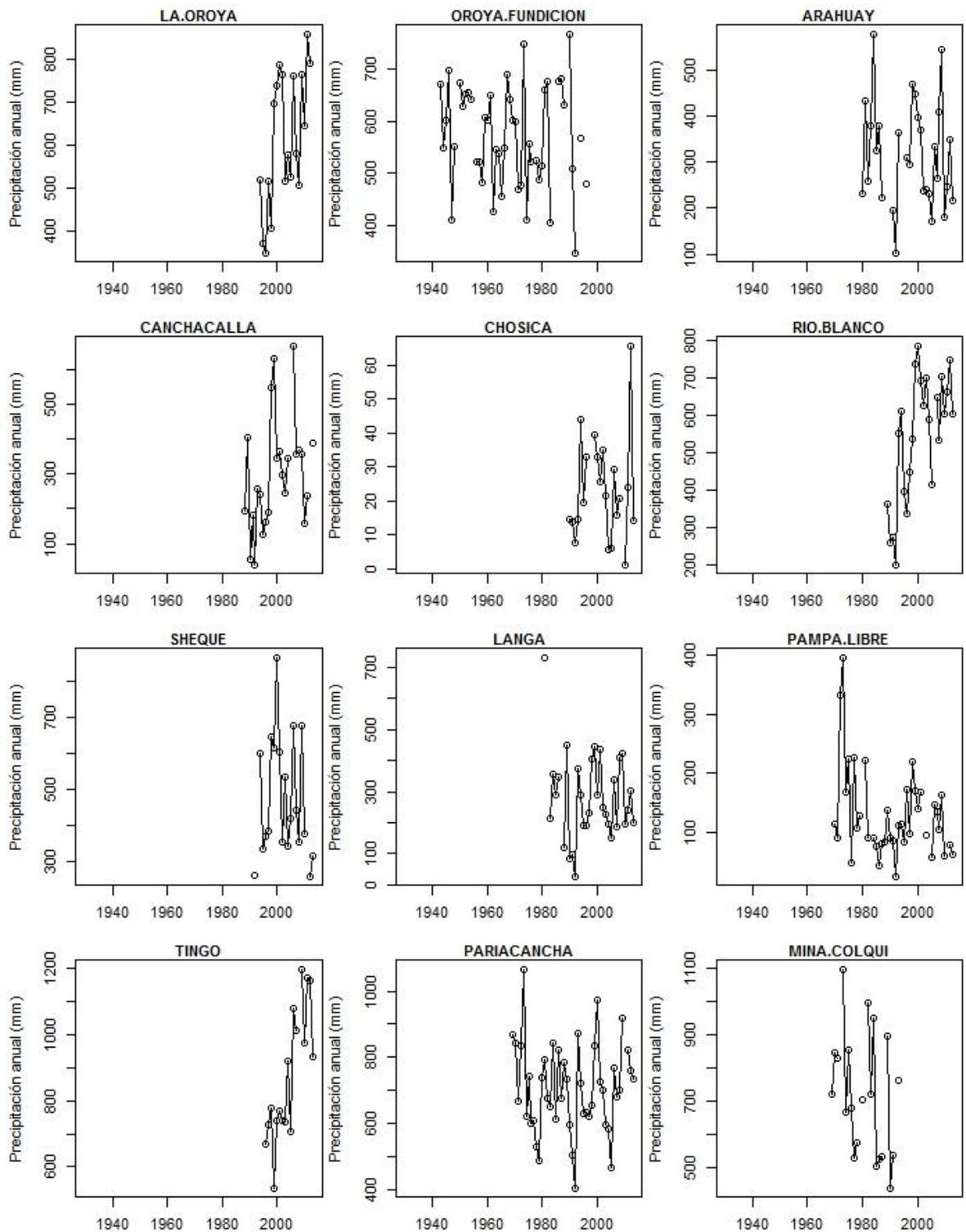


Figura 13. Series anuales por estación La Oroya - Mina Colqui

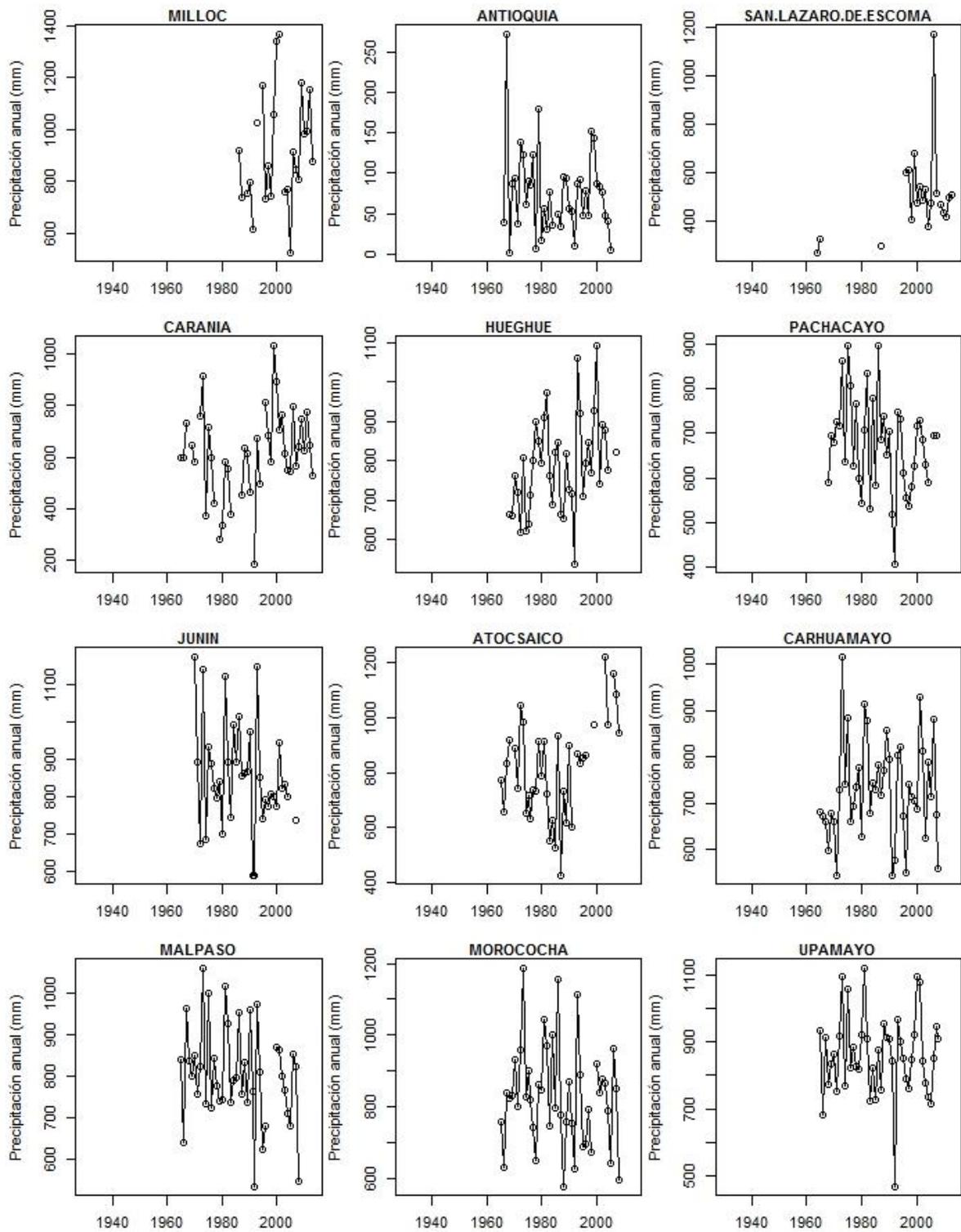


Figura 14. Series anuales por estación Milloc - Upamayo

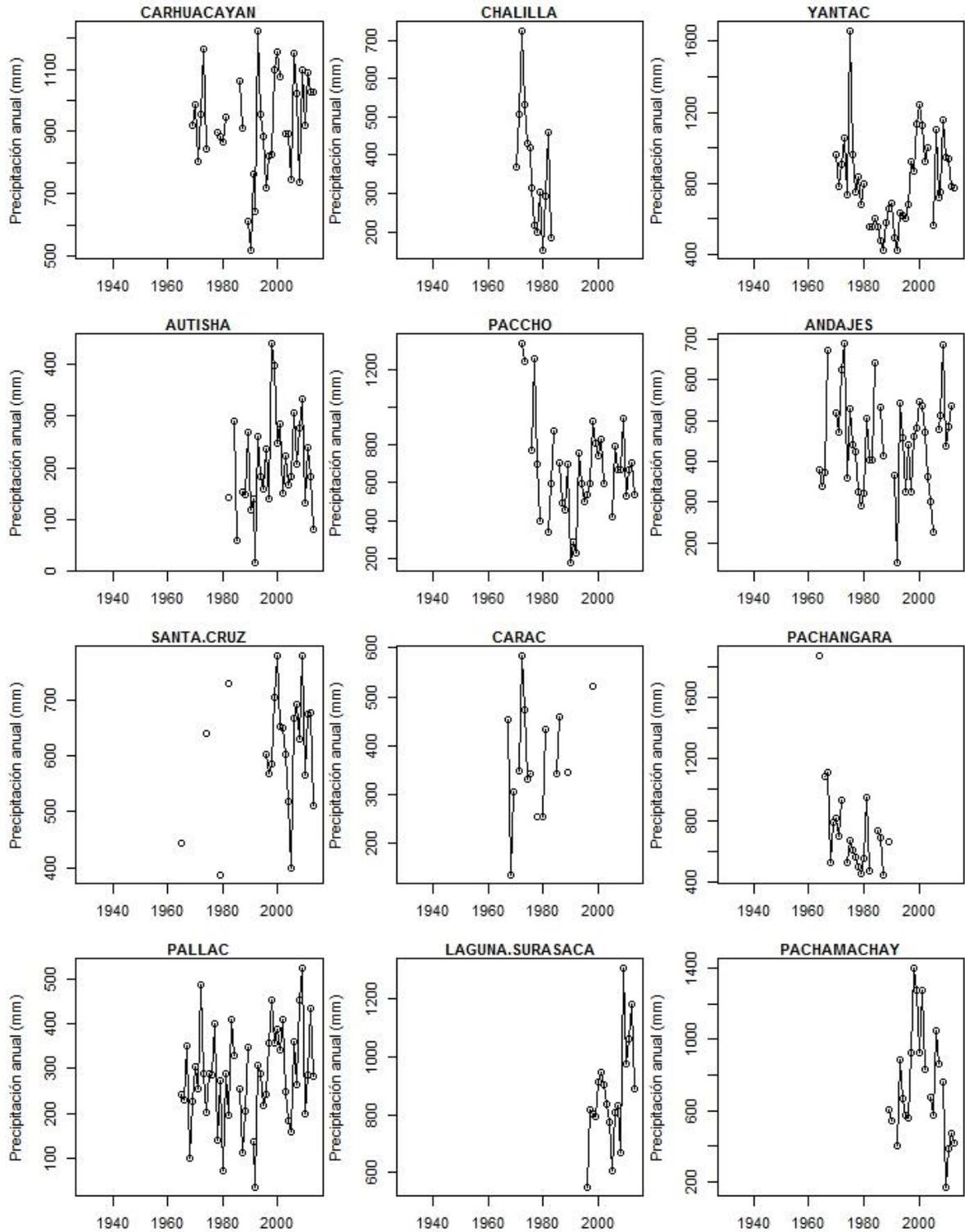


Figura 15. Series anuales por estación Carhuacayan Pachamachay

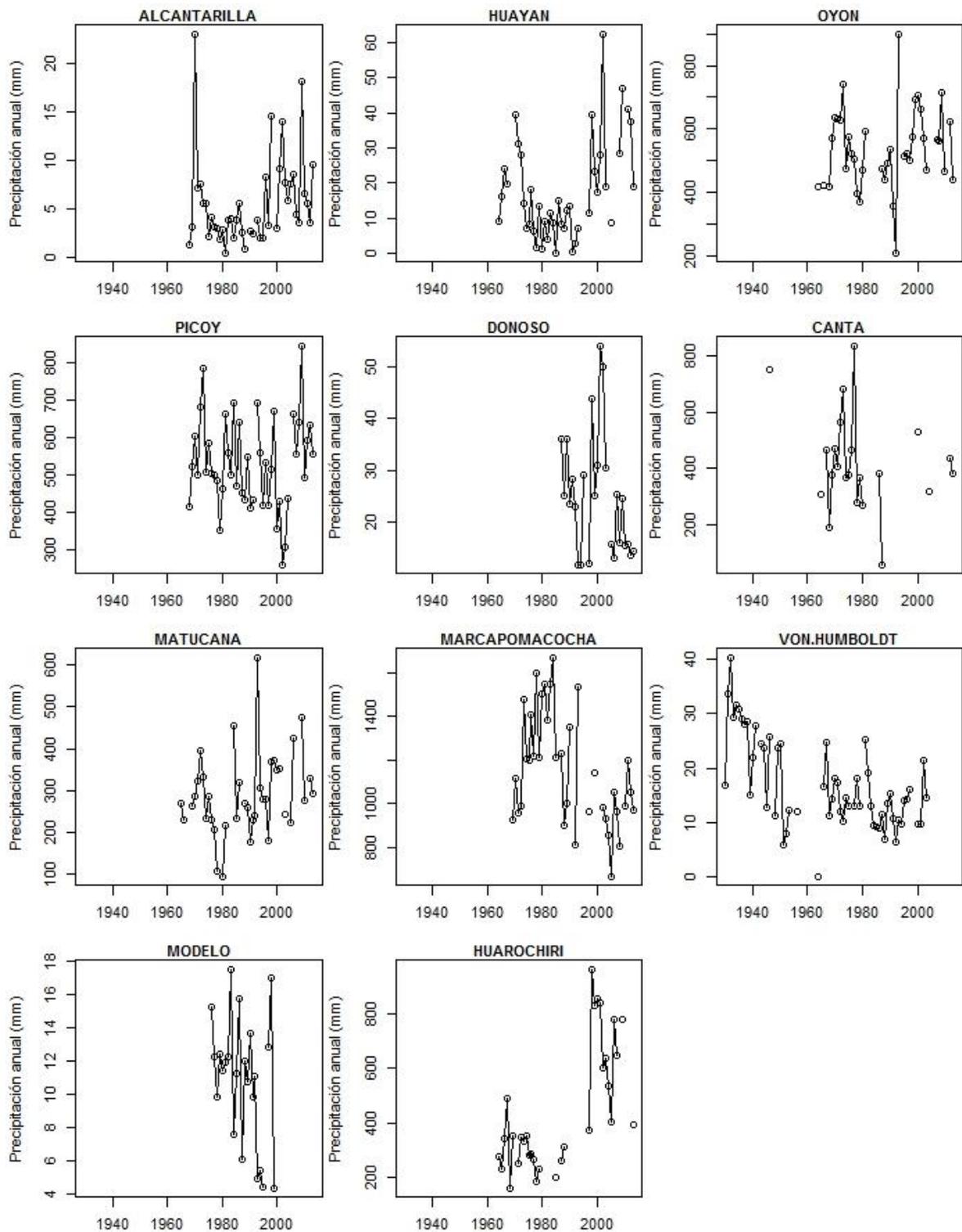


Figura 16. Serie anuales por estación Alcantarilla - Huarochiri.

En la Figura 17 se muestra los box plots de cada una de las estaciones recopiladas para el estudio a escala anual, los cuales indican la existencia de una importante variabilidad de la precipitación anual, así como la presencia de datos extremos o outliers, sin embargo se descarta esta condición ya que al ser contrastadas en forma espacial y regional con estaciones de régimen pluviométrico similar se presenta similares módulos. Estos outlier también fueron verificados estadísticamente con el test de Grubbs, recomendado por la Agencia de Protección Medioambiental de los Estados Unidos (Environmental Protection Agency - EPA), cabe mencionar que se recomienda convertir los datos medioambientales en logaritmos, que son a menudo distribuidos log-normal para descartar la condición de outlier.

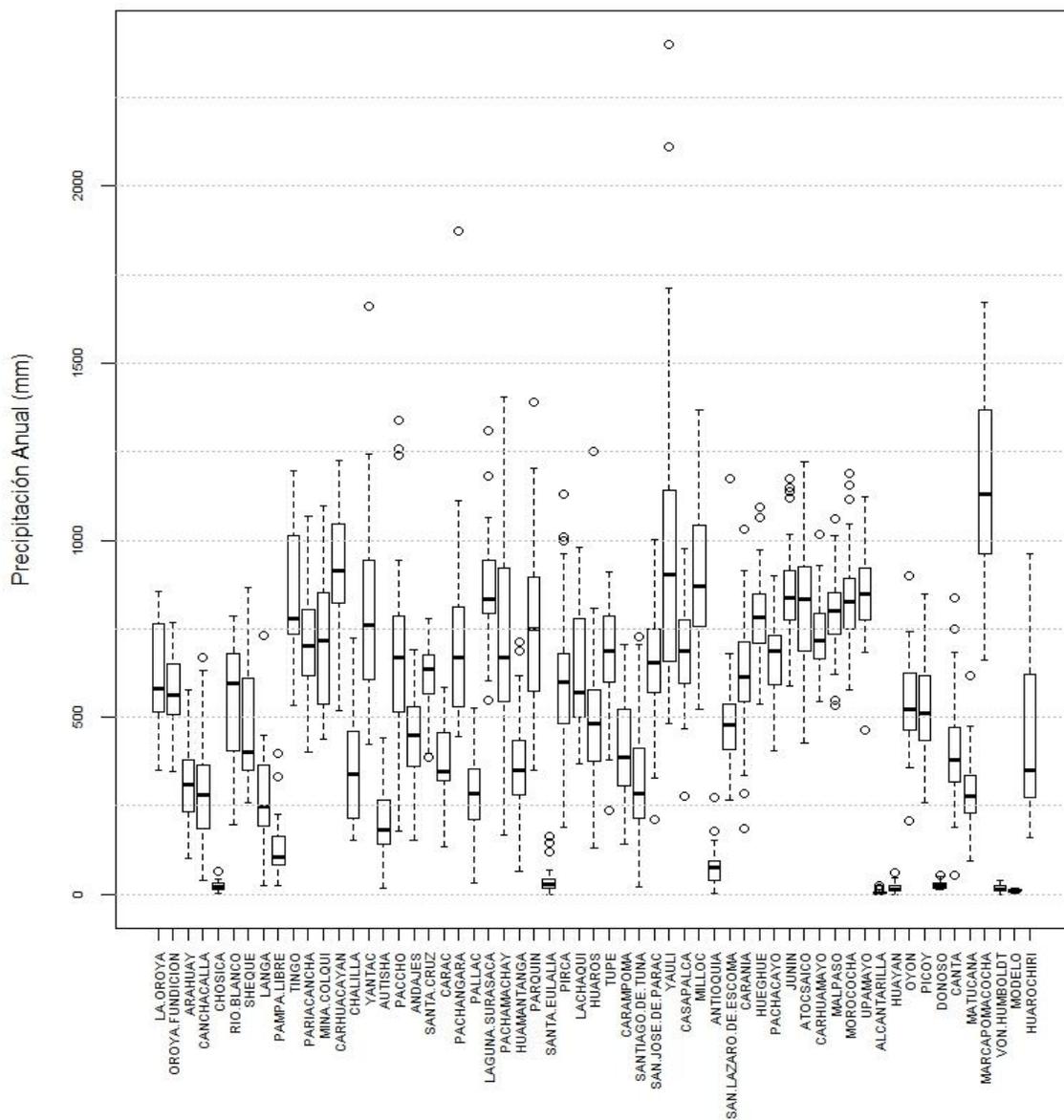


Figura 17. Diagrama de cajas por estación a escala anual

En la Tabla 18 se muestra el test Grubb para datos observados y transformados a logaritmos por estación a escala anual, para el nivel de significación (5%) .

Donde:

Ho: No hay valores atípicos en los datos,

Ha: El valor mínimo o máximo es un valor atípico y

Como el p-valor calculado es mayor que el nivel de significación  $\alpha=0.05$ , no se puede rechazar la hipótesis nula Ho. Por tanto, se detectó la presencia de 7 datos atípicos, 1 por estación en Autisha, Carac, Santa Eulalia, Tupe, Casapalca, Antioquia y Huayan que corresponden al 0.4% del total analizado.

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, Laguna Surasaca, Huamantanga, Parquin, Huaros, Carampoma, Yauli, Carania, Huengue, Atosaico, Alcantarilla, Huayan, Matucana y Marcapomacocha), cabe indicar que los cambios se presentaron en los años 1970, 1975, 1976, 1977, 1993, 1996, 1997, 1998 y 2009, que corresponden a años denominados El Niño y La Niña de diferentes intensidades según la clasificación (Lavado, 2009).

En la Tabla 19 se muestra los resultados de la evaluación de los supuestos del ARFLM: el primero, que las series de tiempo de las precipitaciones no presenten una tendencia a disminuir o a aumentar a través de los años, para el periodo de registro de los datos. Este supuesto se puede verificar, entre otros métodos, con el test de la significancia de la pendiente de regresión línea variable-año, para el nivel de significación (%) 5.

Dónde:

Ho: No existe una tendencia en la serie

Ha: Hay una tendencia en la serie.

Como el p-valor calculado es mayor que el nivel de significación  $\alpha=0.05$ , no se puede rechazar la hipótesis nula Ho. Se detectaron tendencias en 10 de 59 estaciones (La Oroya, Rio Blanco, Tingo, Chalilla, Panchangara, Parquin, Carampoma, Casapalca, Huenge y Huarochiri).

El segundo supuesto, es que los datos, a través del tiempo, sean independientes entre sí, es decir, no están autocorrelacionados. Este supuesto se puede verificar, entre otros, con el test Lag-1, gráficos de autocorrelogramas y otros. Del análisis de independencia serial se ha detectaron en 2 de 59 estaciones (Estaciones Von Humbolt y Huarochiri).

En la Figura 18 se muestra el autocorrelograma y autocorrelograma parcial donde se observa que las serie de Huarochiri y Von Humbolt presenta dependencia en el tiempo, por tanto han sido excluidas para los análisis posteriores.

Tabla 18. Prueba de atípicos Test Grubb

Estación	Datos Observados	Datos Transfor. A Ln	Estación	Datos Observados	Datos Transfor. A Ln
	p-valor	p-valor		p-valor	p-valor
La Oroya	0.447	0.906	Carampoma	0.223	0.183
Oroya Fundición	0.293	0.139	Santiago de Tuna	0.562	0.166
Arahuay	0.346	0.054	San José de Parac	0.404	0.057
Canchacalla	0.318	0.265	Yauli	< 0.0001	0.689
Chosica	0.907	0.951	<b>Casapalca</b>	0.104	0.009
Rio Blanco	0.582	0.594	Milloc	0.621	0.970
Sheque	0.301	0.976	<b>Antioquia</b>	0.061	0.011
Langa	0.043	0.070	San Lázaro de E.	0.002	0.111
Pampa Libre	0.175	0.938	Carania	0.617	0.456
Tingo	0.383	0.557	Huengue	0.769	0.468
Pariacancha	0.171	0.499	Pachacayo	0.656	0.971
Mina Colqui	0.591	0.865	Junin	0.844	0.848
Carhuacayan	0.188	0.060	Atocsaico	0.669	0.980
Chalilla	0.173	0.976	Carhuamayo	0.026	0.080
Yantac	0.003	0.055	Malpaso	0.412	0.627
<b>Autisha</b>	0.557	0.003	Morococha	0.036	0.139
Paccho	0.935	0.152	Upamayo	0.406	0.628
Andajes	0.883	0.643	Alcantarilla	< 0.0001	0.152
Santa Cruz	0.974	0.670	<b>Huayan</b>	0.312	0.042
<b>Carac</b>	0.413	0.028	Oyon	0.500	0.949
Pachangara	0.004	0.090	Picoy	0.253	0.476
Pallac	0.236	0.122	Donoso	0.250	0.716
Laguna Surasaca	0.015	0.127	Canta	0.422	0.349
Pachamachay	0.673	0.899	Matucana	0.591	0.158
Huamantanga	0.239	0.083	Marcapomacocha	0.361	0.777
Parquin	0.700	0.581	Von Humboldt	0.451	0.261
<b>Santa Eulalia</b>	0.306	0.023	Modelo	0.555	0.133
Pirca	0.119	0.770	Huarochiri	0.111	0.394
Lachaqui	0.501	0.270	<b>Tupe</b>	0.225	0.023
Huaros	0.631	0.401			

Tabla 19. Prueba de Tendencia

Estación	p-valor (bilateral)	p-valor (bilateral)	Ho	Estación	p-valor (bilateral)	p-valor (bilateral)	Ho
La Oroya	0.010	17.2	Rechazado	Tupe	0.944	-0.9	Aceptado
Oroya Fundición	0.307	-1.1	Aceptado	Carampoma	0.000	8.0	Rechazado
Arahuay	0.399	-2.2	Aceptado	Santiago de Tuna	0.169	-2.8	Aceptado
Canchacalla	0.063	8.8	Aceptado	San José de Parac	0.140	4.0	Aceptado
Chosica	0.976	0.0	Aceptado	Yauli	0.266	42.1	Aceptado
Rio Blanco	0.003	15.8	Rechazado	Casapalca	0.021	14.1	Aceptado
Sheque	0.721	-2.7	Aceptado	Milloc	0.118	9.0	Rechazado
Langa	0.892	-0.5	Aceptado	Antioquia	0.425	-0.4	Aceptado
Pampa Libre	0.175	-1.0	Aceptado	San Lazaro de Es.	0.538	5.8	Aceptado
Tingo	0.003	31.2	Rechazado	Carania	0.247	2.4	Aceptado
Pariacancha	0.800	-0.4	Aceptado	Hueghue	0.018	4.0	Rechazado
Mina Colqui	0.163	-14.0	Aceptado	Pachacayo	0.179	-2.3	Aceptado
Carhuacayan	0.294	3.0	Aceptado	Junin	0.127	-3.3	Aceptado
Chalilla	0.012	-25.2	Rechazado	Atocsaico	0.124	5.5	Aceptado
Yantac	0.386	3.4	Aceptado	Carhuamayo	0.460	0.9	Aceptado
Autisha	0.284	2.0	Aceptado	Malpaso	0.174	-2.3	Aceptado
Paccho	0.670	-1.5	Aceptado	Morococha	0.464	-1.4	Aceptado
Andajes	0.713	0.5	Aceptado	Upamayo	0.960	0.1	Aceptado
Santa Cruz	0.535	2.2	Aceptado	Alcantarilla	0.051	0.1	Aceptado
Carac	0.488	4.0	Aceptado	Huayan	0.154	0.3	Aceptado
Pachangara	0.009	-22.9	Rechazado	Oyon	0.436	1.8	Aceptado
Pallac	0.128	2.1	Aceptado	Picoy	0.739	-0.4	Aceptado
Laguna Surasaca	0.069	16.3	Aceptado	Donoso	0.123	-0.5	Aceptado
Pachamachay	0.463	-8.7	Aceptado	Canta	0.430	-3.2	Aceptado
Huamantanga	0.107	2.3	Aceptado	Matucana	0.108	1.9	Aceptado
Parquin	0.010	8.2	Rechazado	Marcapomacocha	0.055	-9.1	Aceptado
Santa Eulalia	0.744	-0.1	Aceptado	Von Humboldt	< 0.0001	-0.3	Aceptado
Pirca	0.816	0.6	Aceptado	Modelo	0.064	-0.2	Aceptado
Lachaqui	0.087	-6.2	Aceptado	Huaro-chiri	0.002	12.2	Rechazado
Huaros	0.125	3.1	Aceptado				

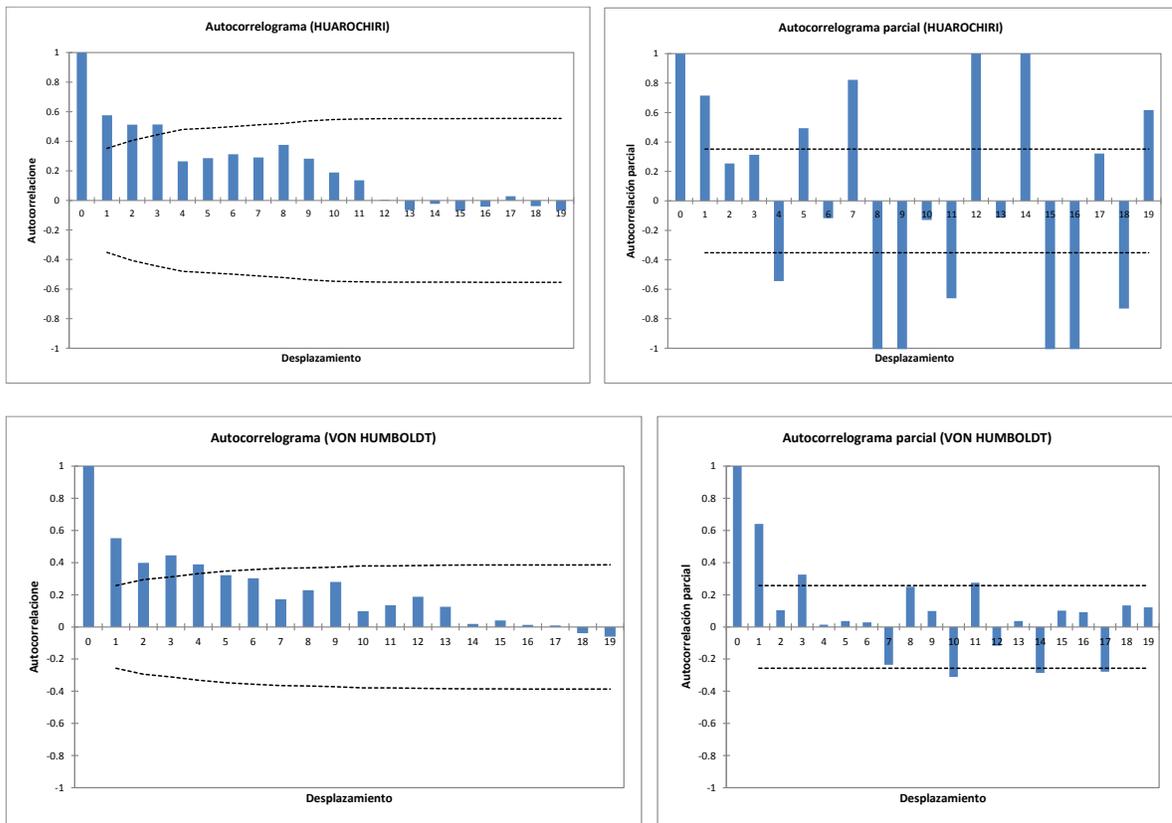


Figura 18. Autocorrelograma por estación

En el Anexo, se presenta la distribución temporal mensual del conjunto de las 60 estaciones, el análisis exploratorio, histogramas y la relación entre los cuantiles teóricos y observados. Resumen, en la distribución temporal de las seires a nivel mensual se ha excluido la precipitación registrados en febrero de 1964 equivalente a 925.9 mm en la estación Pachangara, debido a que este evento no se presenta en estaciones vecinas, por tanto se ha asumido que es un valor outlier, verificado también por el test de Grubb.

Asimismo de los diagramas de cajas de cada una de las 59 estaciones recopiladas para el estudio, se observa la existencia de una importante variabilidad de precipitación mensual, principalmente durante diciembre a abril con magnitudes mayores a los meses del resto del año, así como la presencia de datos extremos o outliers, se concluye que la presencia de datos que pueden considerarse outlier es común a todas las estaciones analizadas, lo que demuestra que no son producto de un error en la recolección o registro de los datos, sino que tienen una explicación física, como puede ser el efecto de un año El Niño, principalmente en las cuencas del río Rímac, Chillón y Lurín, finalmente este análisis permitió esclarecer patrones de variabilidad de la precipitación en cuanto a su magnitud y dispersión estacional, así como ajustar criterios de detección de valores atípicos.

De los histogramas de frecuencias de la precipitación mensual ellos nos informan el rango de precipitaciones más frecuentes; y se concluye que la distribución de ajuste probabilístico de esta variable no es Normal, teniéndose distribuciones con asimetrías y curtosis positivas; y los cuantiles teóricos versus cuantiles medidos por cada estación evaluada, en el cual se verifica que los datos de lluvia no se ajustan a una distribución Normal, indicada por el grado de desvío respecto al ángulo de 45°.

En esta etapa, se ha excluido 7 estaciones basados en las recomendaciones de Wallis et al., 2007 donde indica que queda a criterio del analista considerar la variabilidad climática del sitio y no evaluar netamente la variabilidad estadística.

### 5.2 Etapa 2. Identificación de regiones homogéneas

La identificación de las regiones homogéneas se inició estandarizando las variables seleccionadas para el análisis como: la precipitación media anual, latitud, longitud y altitud de ubicación de la estación meteorológica; basado las expresiones matemáticas siguientes:

$$X_{est} = \frac{xi-x}{\sigma} \quad (28)$$

$$X_{est} = \frac{xi-x_{min}}{x_{max}-x_{min}} \quad (29)$$

Complementariamente se le asignó un peso a las variables, para la precipitación se estableció el mayor peso a fin de que los grupos a formar presenten mayor influencia de esta variable. Los pesos por variable se indican en la Tabla 17.

Tabla 20. Pesos por variable

Pesos de variables adimensionadas			
Latitud	Longitud	P media	Altitud
1	1	2	1.5
1	1.5	2	1.5
1	1	2	--

Las técnicas utilizadas para realizar los agrupamientos fueron cluster, kmeans y también se consideró las agrupaciones propuestas por el estudio de homogenización usando vector regional y completación de la información de precipitación en las cuencas Chillón, Rímac y Lurín, (SENMAHI, 2013). La cantidad de grupos evaluados para cada técnica fueron agrupaciones de 4 a 9, de este espectro las agrupaciones obtenidas con el método de Kmeans y Cluster presentan una distribución más concéntrica para formaciones de cinco grupos.

La Figura 19 muestra la conformación de los grupos obtenidos mediante la técnica de Cluster por los métodos de la distancia euclidiana y de enlace de Ward; y Kmeans, y la definida incorporando criterios subjetivos de altitud, cercanía, módulo de lluvia y ubicación geográfica de la estación meteorológica, y mediante iteraciones de prueba error se definido cinco grupos.

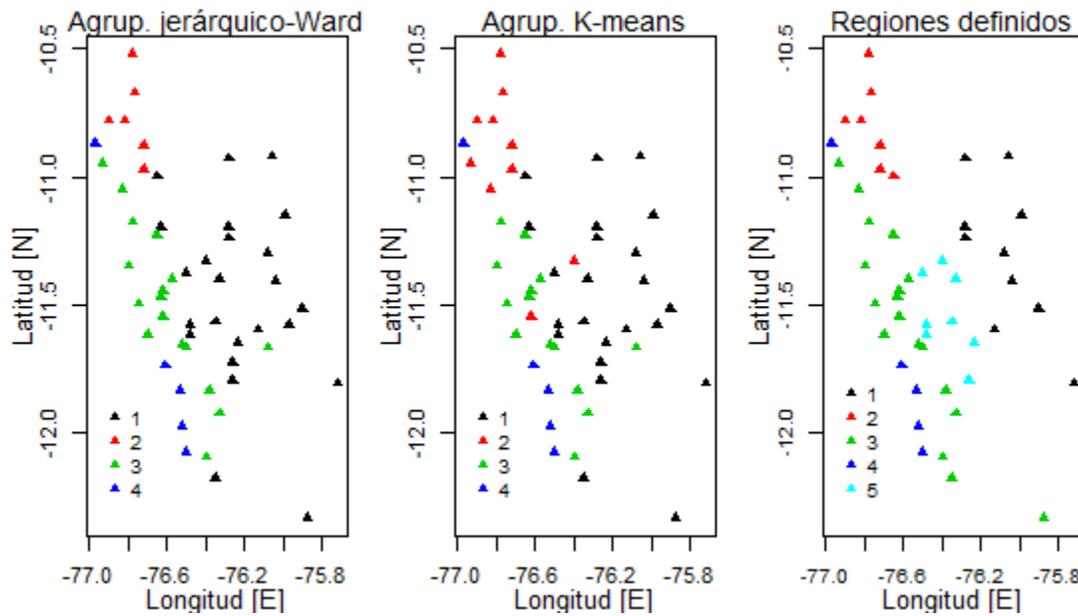


Figura 19. Grupos homogéneos de precipitación

La Tabla 21 muestra los ratios de L-Momentos y estadísticos de discordancia de cada Estación que conforman los cinco grupos definidos. Cabe mencionar que se excluyeron 4 estaciones, del total de 52 debido a su valor de discrepancia respecto a la región donde se las agrupaban, finalmente las estaciones que conforma cada región homogénea está conformada con valores de discrepancia que cumplen con límites propuestos por Hosking y Wallis (1997).

La Región 1 está conformada por 10 estaciones emplazadas entre altitudes de 3550 a 4505 msnm, con precipitaciones entre 571 y 920 mm.año<sup>-1</sup> ; destaca por su alta de baja variabilidad en promedio  $cv=0.17$ ; la Región 3 está conformada por 18 estaciones emplazadas entre altitudes de 2333 a 4200 msnm, con precipitaciones variables de 280 y 738 mm.año<sup>-1</sup>, y de mediana variabilidad en promedio  $cv=0.37$ ; la Región 4 está conformada por 5 estaciones emplazadas entre altitudes de 1800 a 2921 msnm, con precipitaciones de 75 y 320 mm.año<sup>-1</sup> y de mediana variabilidad en promedio  $cv=0.46$ ; y la Región 5 está conformada por 8 estaciones emplazadas entre altitudes de 3800 a 4600 msnm, con precipitaciones de 645 y 1155 mm.año<sup>-1</sup>, y baja variabilidad en promedio  $cv=0.24$ .

Cabe mencionar que la Región 2 no se emplaza en el área de interés, sin embargo está compuesto por 8 estaciones emplazadas entre altitudes de 2900 a 4450 msnm, con precipitaciones de 448 y 870 mm.año<sup>-1</sup>, y baja variabilidad en promedio  $cv=0.24$ .

Tabla 21. Estaciones más óptimas por región

Código	Nombre	Cuenca	PMA	L-CV	L-CS	L-CK	Di	Dc	Región
000629	Oroya Fundición	Mantaro	571	0.110	0.030	0.080	1.57		
155115	Carhuacayan	Mantaro	920	0.102	-0.054	0.130	1.34		
200214	Huenhue	Mantaro	787	0.088	0.080	0.141	0.75		
200216	Pachacayo	Mantaro	675	0.090	0.014	0.149	0.21		
200236	Junín	Mantaro	855	0.093	0.114	0.203	1.69		
300001	Atocsaico	Mantaro	816	0.126	0.009	0.122	2.08	2.491	1
300002	Carhuamayo	Mantaro	728	0.084	0.081	0.154	0.67		
300006	Malpaso	Mantaro	802	0.082	0.021	0.186	0.5		
300007	Morococha	Mantaro	830	0.088	0.074	0.181	0.28		
300013	Upamayo	Mantaro	861	0.078	0.016	0.197	0.91		
000541	Oyon	Huaura	537	0.133	0.071	0.180	0.22		
000542	Picoy	Huaura	529	0.131	0.058	0.139	0.96		
155201	Andajes	Huaura	448	0.150	0.006	0.150	0.17		
155204	Pachangara	Huaura	745	0.161	0.216	0.081	1.13	1.917	2
155206	Laguna Surasaca	Huaura	870	0.119	0.122	0.278	1.79		
155212	Parquin	Huaura	749	0.172	0.087	0.155	1.28		
155219	Tupe	Huaura	662	0.148	-0.173	0.212	1.45		
155119	Chalilla	Lurín	364	0.254	0.138	0.107	1.07		
156133	Obrajillo	Chillón	464	0.150	0.133	0.224	1.09		
000547	Canta	Chillón	421	0.217	0.096	0.343	2.03		
000548	Matucana	Rímac	291	0.182	0.144	0.243	0.87		
151204	Arahuay	Chillón	317	0.209	0.118	0.102	0.27		
151213	Sheque	Rímac	472	0.206	0.166	0.016	1.47		
151214	Langa	Lurín	280	0.238	0.011	0.064	1.72		
155200	Paccho	Huaura	669	0.196	-0.008	0.186	0.79		
155203	Carac	Chancay-H	373	0.188	0.013	0.195	0.44	3.000	3
155205	Pallac	Chancay-H	281	0.223	0.004	0.147	1		
155207	Pachamachay	Huaura	738	0.239	0.130	0.145	0.63		
155209	Huamantanga	Chillón	366	0.211	0.075	0.201	0.17		
155214	Pirca	Chancay-H	588	0.201	0.058	0.205	0.14		

155217	Lachaqui	Chillón	627	0.162	0.138	0.034	1.72		
155218	Huaros	Chillón	478	0.199	0.127	0.264	0.83		
155223	Carampoma	Rímac	414	0.179	0.111	0.088	0.53		
156102	San Lazaro de E.	Lurín	503	0.112	-0.017	0.258	2.25		
156109	Carania	Cañete	612	0.138	0.025	0.207	0.98		
151205	Canchacalla	Rímac	299	0.302	0.123	0.173	0.84		
155107	Pampa Libre	Huaura	130	0.299	0.305	0.245	1.13		
155122	Autisha	Rímac	205	0.259	0.102	0.156	0.95	1.333	4
155224	Santiago de Tuna	Lurín	320	0.282	0.211	0.183	0.85		
156100	Antioquia	Lurín	75	0.347	0.096	0.124	1.23		
155113	Mina Colqui	Rímac	720	0.132	0.132	0.181	1.27		
000549	Marcapomacocha	Mantaro	1155	0.129	0.105	0.059	0.52		
155111	Tingo	Rímac	873	0.132	0.112	0.019	1.23		
155112	Pariacancha	Chillón	707	0.109	0.034	0.146	0.89		
155121	Yantac	Mantaro	801	0.132	0.132	0.181	1.75	2.140	5
155225	San Jose de P.	Rímac	645	0.173	0.153	0.128	1.05		
155446	Casapalca	Rímac	684	0.140	-0.041	0.241	0.81		
155514	Milloc	Rímac	913	0.137	-0.031	0.216	0.48		

Conformada las regiones, se verifica que sean homogéneas con el test de heterogenidad, a través del  $H_1$ , este estadístico alcanzo valores menores a 1 del cual se puede inferir que cada región es aceptablemente homogénea. Ver Tabla 22.

Tabla 22. Estadístico de heterogeneidad por región homogénea

H	Regiones Homogéneas				
	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	R <sub>5</sub>
H 1	0.78	-0.53	0.24	-0.43	0.51
H 2	-1.51	-0.67	-1.99	0.06	-0.09
H 3	-2.17	-1.23	-1.32	-0.37	-0.13

La Figura 20 muestra las regiones homogéneas delimitadas en función al área de influencia de cada estación meteorológica (polígonos de thiesen) y puntos de ubicación de estaciones virtuales (15) que registra el satélite TRMM, principalmente para el ámbito de la superficie de la cuenca del Alto Mantaro. Cabe indicar que de las 5 regiones homogéneas formadas, la región 2 se encuentra ubicada hacia el norte del área de estudio. Por tanto el área de interés presenta cuatro regiones hidrológicamente homogéneas.

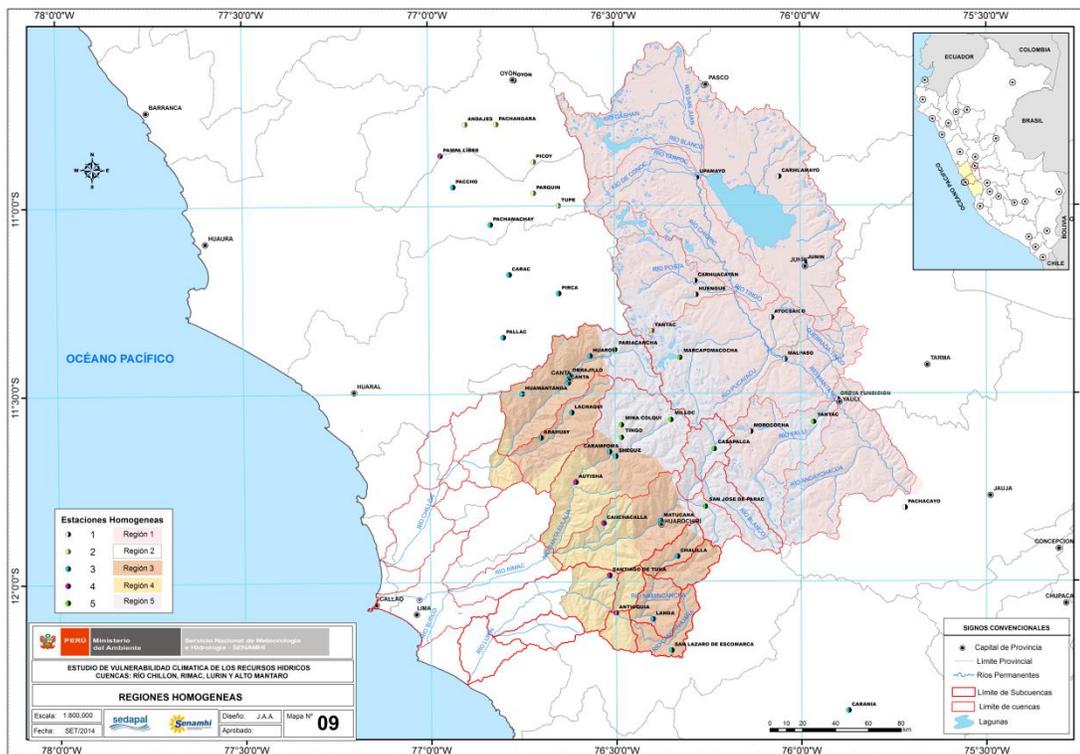


Figura 20. Regiones hidrológicas homogéneas en el área de estudio

### 5.3 Etapa 3. Determinación de la distribución de probabilidad de mejor ajuste

La selección de la distribución de probabilidad regional se basó en la comparación de los ajustes obtenidos por la curva L-momentos ratios y el estadístico de bondad  $/Z^{DIST}/ < 1.64$ .

En la Figura 21 se presenta el diagrama de L-momento-ratio para cada estación que conforman una región, también se aprecia que el valor de los L-momentos regionales (circulo color negro) para cada región y se puede inferir, que para las regiones 1, 2, 3 y 4 se aproximan a la distribución Logística Generalizada (GLO). En la región 5 al parecer, las distribuciones Pearson (PE3), de valores extremos (GEV), logística generalizada (GLO) cualquiera de ellas podrían representar un modelo adecuado a los datos.

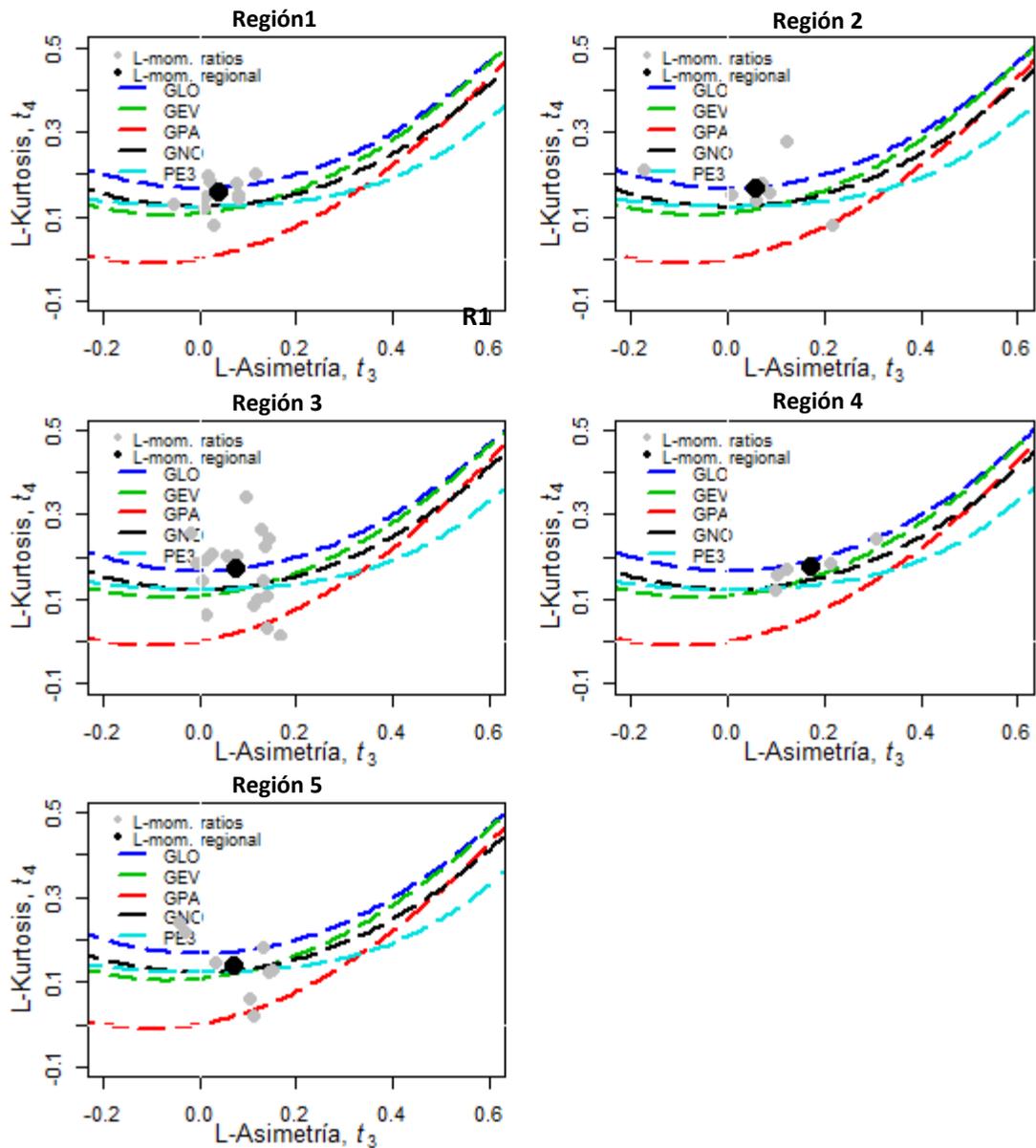


Figura 21. Diagrama de L-Momentos ratio de Skewness & L-Kurtosis por cada región homogénea

Aunque, tal como lo señalan Hosking y Wallis (1997) y Peel et al (2001), la decisión final no debiera depender sólo del análisis del diagrama de L-momentos-ratios, por tanto se ha estimado los valores de  $Z_{DIST}$ .

En la Tabla 23 se presentan los valores de salida entregados por script de ZDIST. Se aprecia que fueron aceptadas las distribuciones Logística generalizada para las regiones 1, 2, 3 y 4; y las distribuciones de GNO, PE3, GVE y GLO para la región 5, coincidiendo con lo sugerido por el diagrama L-momento-ratios en el paso previo. Por tanto con fines del presente Informe se mapeará considerando solo la distribución GLO, Ver Figura 22.

Tabla 23. Valores de Estadístico de bondad de ajuste por regiones homogéneas

Distribuciones	Estadístico de bondad de ajuste, Z				
	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	R <sub>5</sub>
Distribución Logística Generalizada (GLO)	<b>0.52</b>	<b>0.20</b>	<b>-0.09</b>	<b>0.35</b>	<b>1.38</b>
Distribución Generalizada de valores extremos (GEV)	-2.45	-1.85	-2.85	-0.88	<b>-0.74</b>
Distribución de LogNormal (GNO)	-1.87	-1.51	-2.49	-1.05	<b>-0.45</b>
Distribución Pearson (PE3)	-1.91	-1.57	-2.64	-1.48	<b>-0.55</b>
Distribución Generalizada Pareto (GPA)	-8.05	-5.80	-8.28	-3.61	-4.88

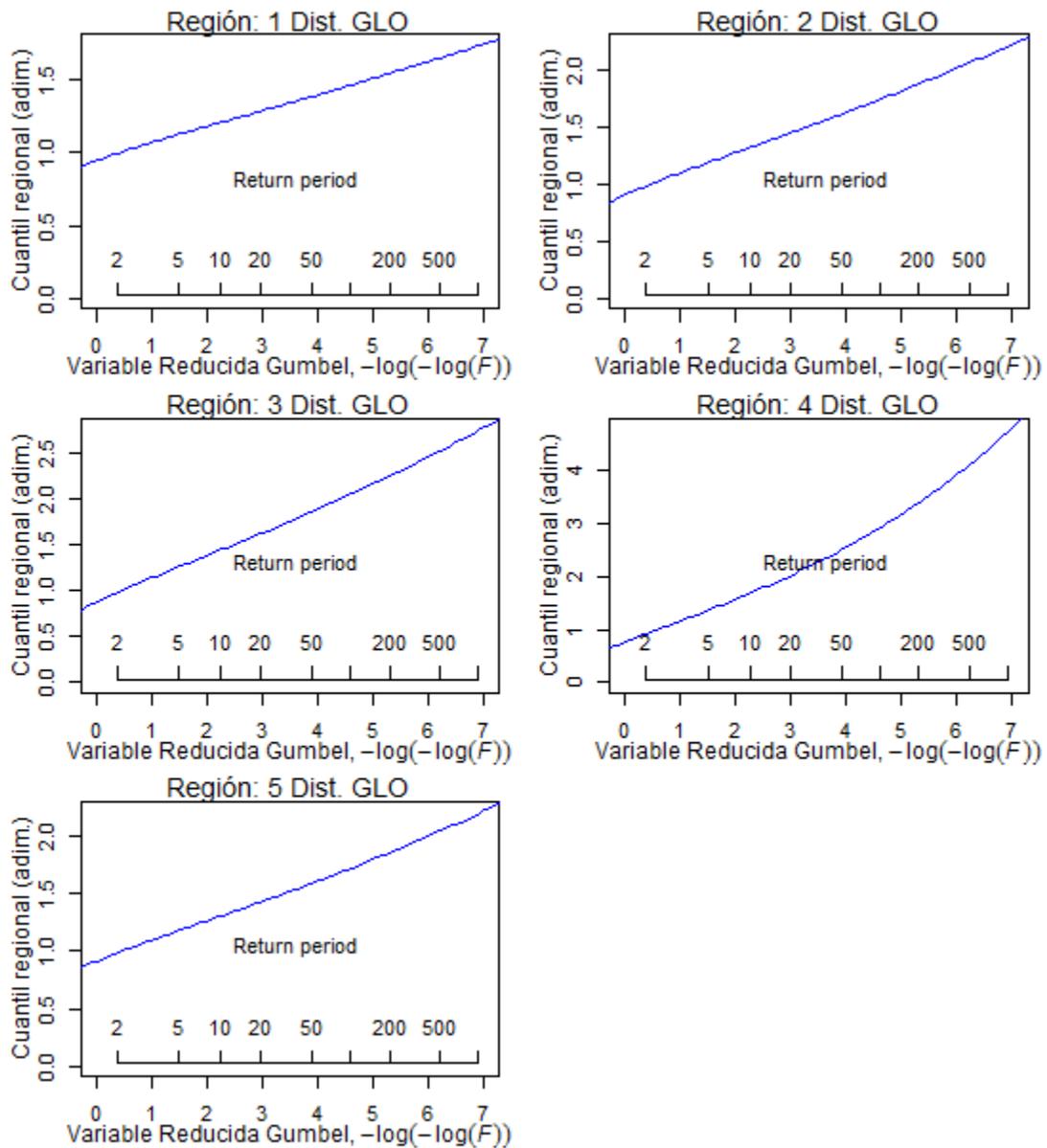


Figura 22. Curvas de crecimiento regional por región.

#### 5.4 Etapa 4. Determinación de cuantiles

Una vez determinada la distribución de densidad de probabilidad aceptada, estamos en condiciones de determinar los cuantiles o la función de cuantiles para un sitio específico. La función de cuantiles de la variable aleatoria  $X$ , asociada a un evento específico en análisis, es función de la curva de crecimiento regional y de un factor de escala. Para nuestro caso, el cuantil de interés es teórico y corresponde a 20, 40 y 60% de la precipitación normal o histórica, es decir 0.20, 0.40 y 0.6.

#### 5.5 Etapa 5. Mapeo del periodo de retorno de la sequía.

La Tabla 24 y Figura 23 muestra la dispersión de los ratios de L-CV, LSK, LKu de cada región versus la Ratio Precipitación Media Anual (RMPA), y sus respectivas ecuaciones de ajuste. Se aprecia, que existe una tendencia a que los tres parámetros disminuyan a medida que se incrementa la precipitación media anual.

Tabla 24. Ratios de los L Momentos regionales

Región	RPMA	L-CV	L-CS	L-CK
R <sub>1</sub>	784	0.09	0.04	0.15
R <sub>2</sub>	666	0.14	0.05	0.17
R <sub>3</sub>	459	0.19	0.08	0.17
R <sub>4</sub>	206	0.30	0.17	0.18
R <sub>5</sub>	812	0.14	0.07	0.15

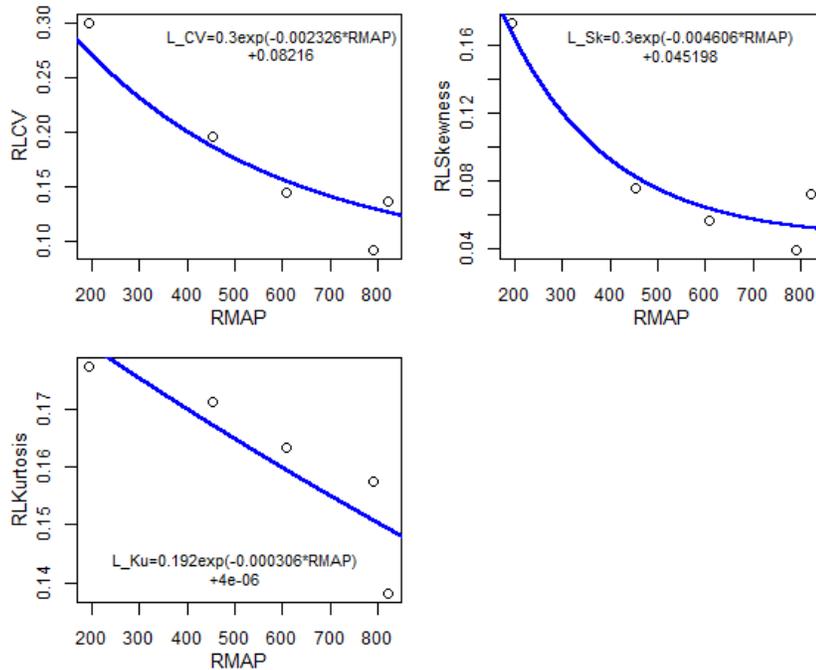


Figura 23. Curvas regionales de los L-Momentos de mejor ajuste

La Figura 24 muestra el mapa base de la precipitación anual para el área de estudio que permitió obtener la caracterización espacial de una sequía correspondiente 0.2, 0.4 y 0.6 de la Precipitación anual, es decir para una deficiencia pluviométrica de 80, 60 y 40% del mapa de precipitación anual histórica (periodo 1981-2010). Este mapa presenta un gradiente de oeste a este, con un mínimo de 39 mm al oeste y con 958 mm al este, los mayores módulos anuales se presentan sobre áreas emplazadas hacia los 4000 msnm, al noreste de la cuenca del río Rímac, parte de la cuenca alta del río Chillón y el centro de la cuenca alta del Mantaro con precipitaciones que varían de 700 a 958 mm/año.

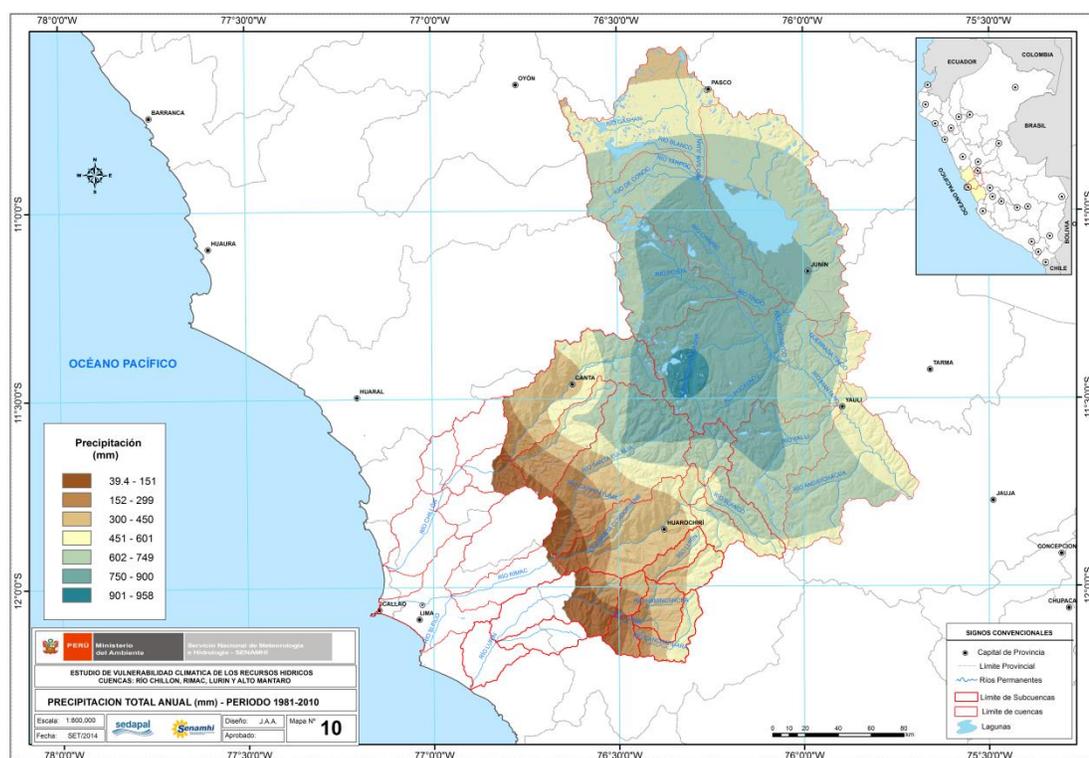


Figura 24. Precipitación anual del área de interés.

En las Figuras 25, 26 y 27 se muestran los mapas L-Cv, L-Sk y L-Kurtosis obtenidos sobre la base del mapa de precipitación anual y con el apoyo del scrip en R.

En el área de estudio los valores de LCv, varían de 0.11 a 0.35, LSk fluctúan de 0.04 a 0.29 y el L Kurtosis de 0.14 a 0.18, del cual se puede inferir que la variabilidad de los estadísticos mencionados es predominante de la cuenca media hacia la cuenca baja de los ríos Chillón, Rímac y Lurín alcanzando los mayores valores; sin embargo en gran parte de las superficie de la cuenca Alto Mantaro se observan valores más estables.

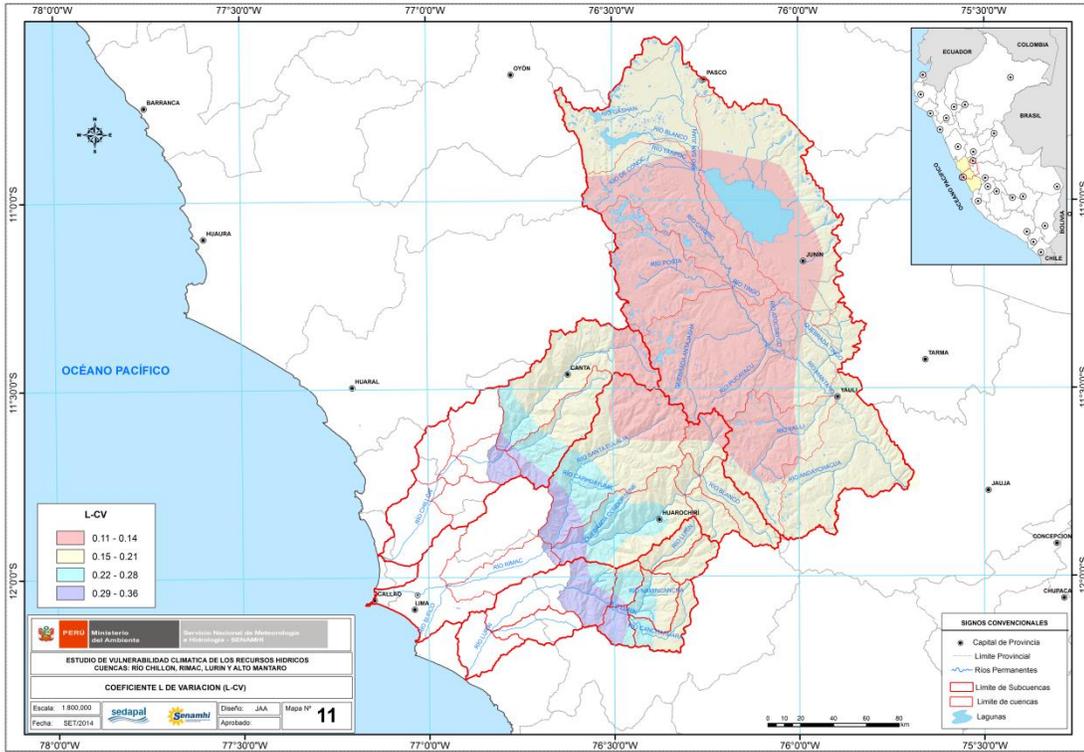


Figura 25. Parámetro LCV espacializado

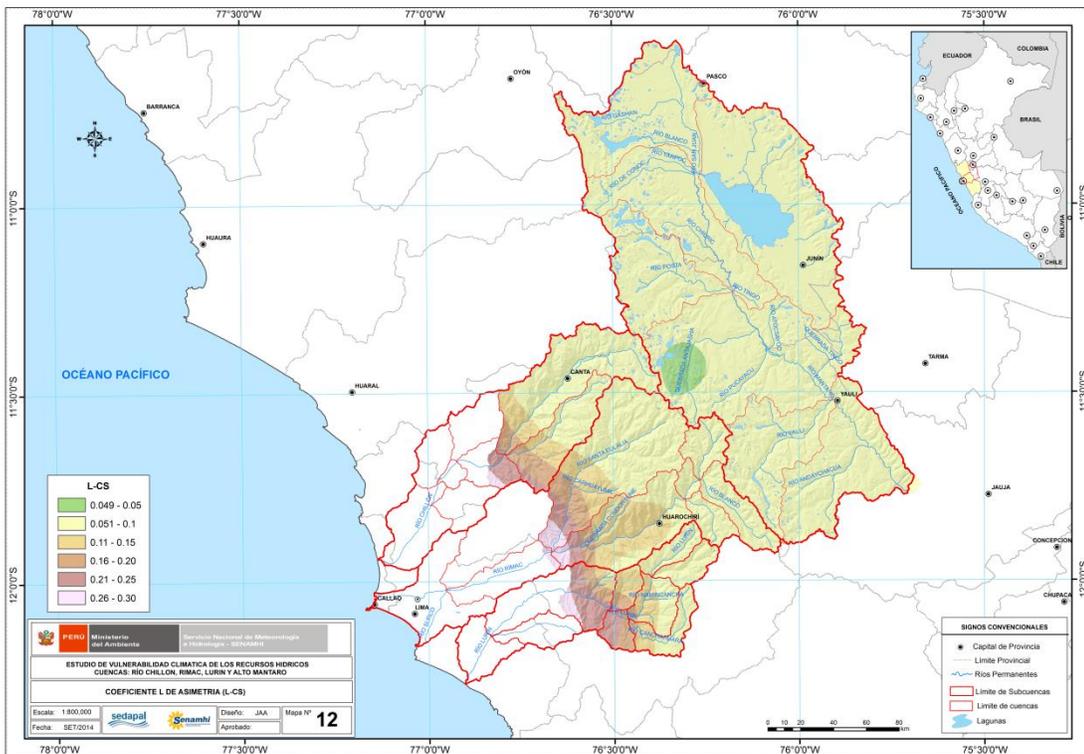


Figura 26. Parámetro LSk espacializado

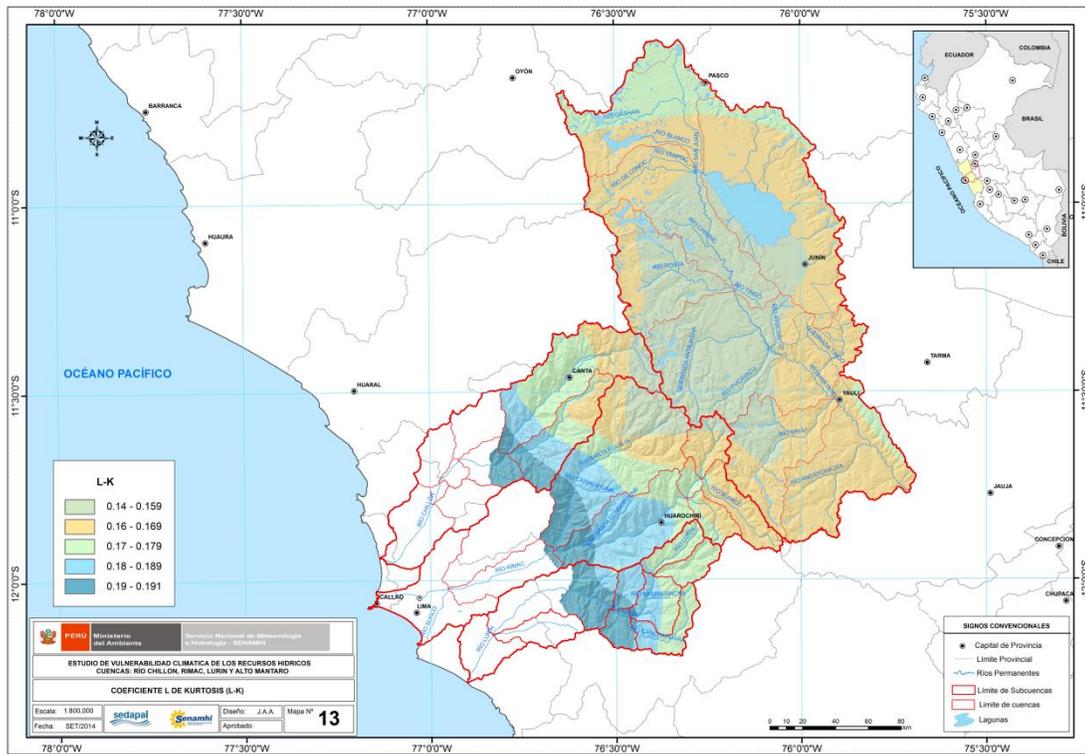


Figura 27. Parámetro L Kurtosis especializado

La Figura 28, 29 y 30 muestra el mapa de probabilidad o frecuencia con características correspondiente a 0.2, 0.4 y 0.6 de la Precipitación anual, es decir, situaciones con una deficiencia pluviométrica de 80, 60 y 40% del mapa de precipitación anual histórica (periodo 1981-2010) respectivamente.

El mapa de frecuencia para una situación de 0.2 de precipitación anual presenta una probabilidad de ocurrencia que varía de 0 a 0.04. Se observa que hacia la cuenca del Alto Mantaro la probabilidades de darse esta situación tiende a cero, caso contrario se observa hacia la cuenca media y baja de los ríos Chillón, Rímac y Lurín, registrándose una probabilidad de hasta 0.04 ó 4%.

El mapa de frecuencia para una situación de 0.4 de precipitación anual presenta una probabilidad de ocurrencia que varía de 0 a 0.14. Se observa que hacia la cuenca del Alto Mantaro la probabilidad de darse esta situación tiende a cero, caso contrario se observa hacia la cuenca media y baja de los ríos Chillón, Rímac y Lurín, registrándose una probabilidad de ocurrencia hasta 0.14 ó 14%.

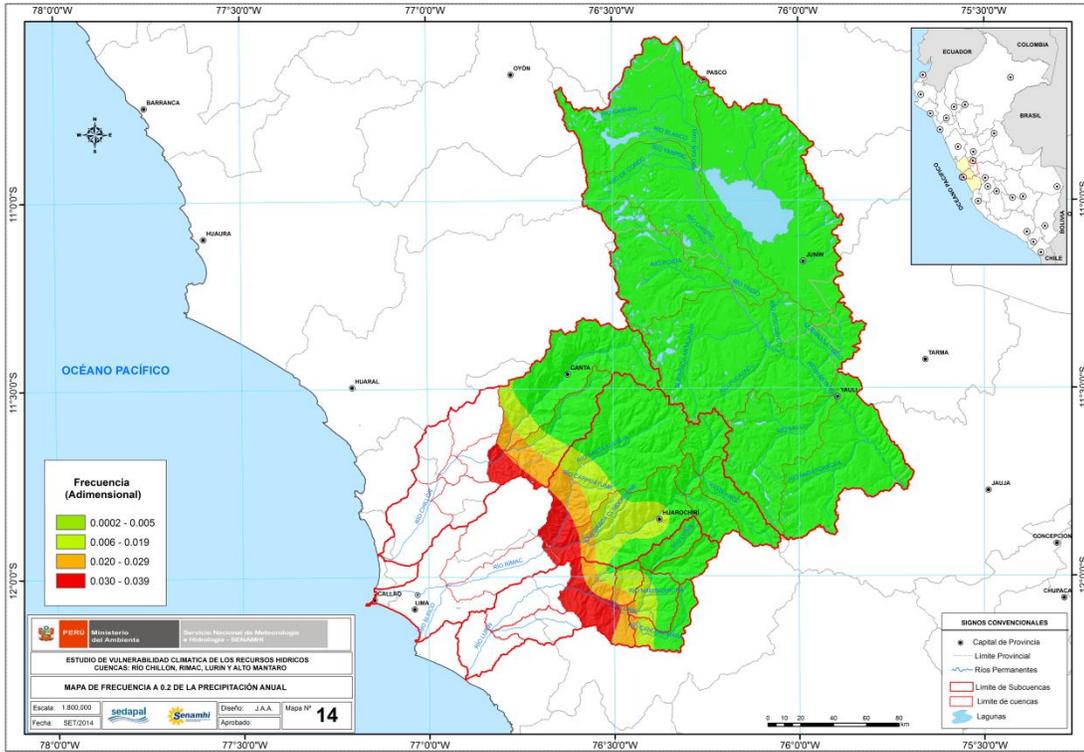


Figura 28. Mapa de frecuencia de una sequía equivalente al 20% Precipitación normal

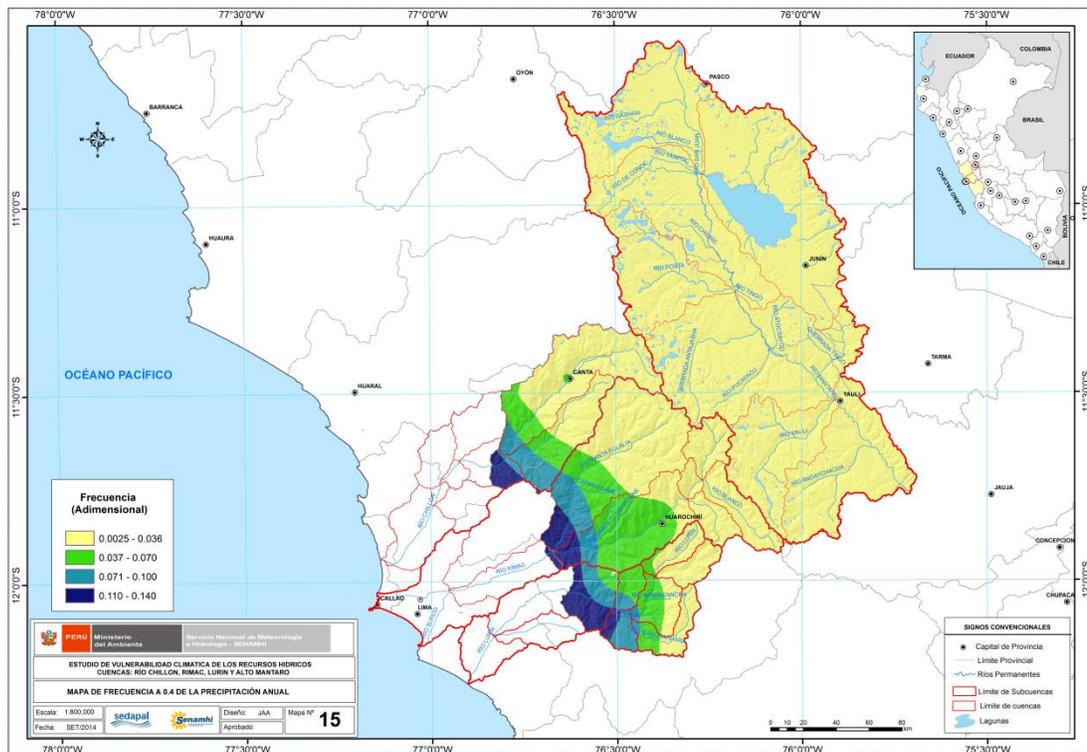


Figura 29. Mapa de frecuencia de una sequía equivalente al 40% Precipitación normal

El mapa de frecuencia para una situación de 0.6 de precipitación anual presenta una probabilidad de ocurrencia que varía de 0.02 a 0.30. Se observa que hacia la cuenca del Alto Mantaro la probabilidades de darse esta situación tiende a 0.02 a 2%, y hacia la cuenca media y baja de los ríos Chillón, Rímac y Lurín, esta probabilidad de ocurrencia aumenta hasta registrar 0.30 ó 30% .La ventaja del mapa de frecuencia, en formato de grid, nos indica que en cada pixel se tiene una probabilidad distinta de obtener una deficiencia de precipitación.

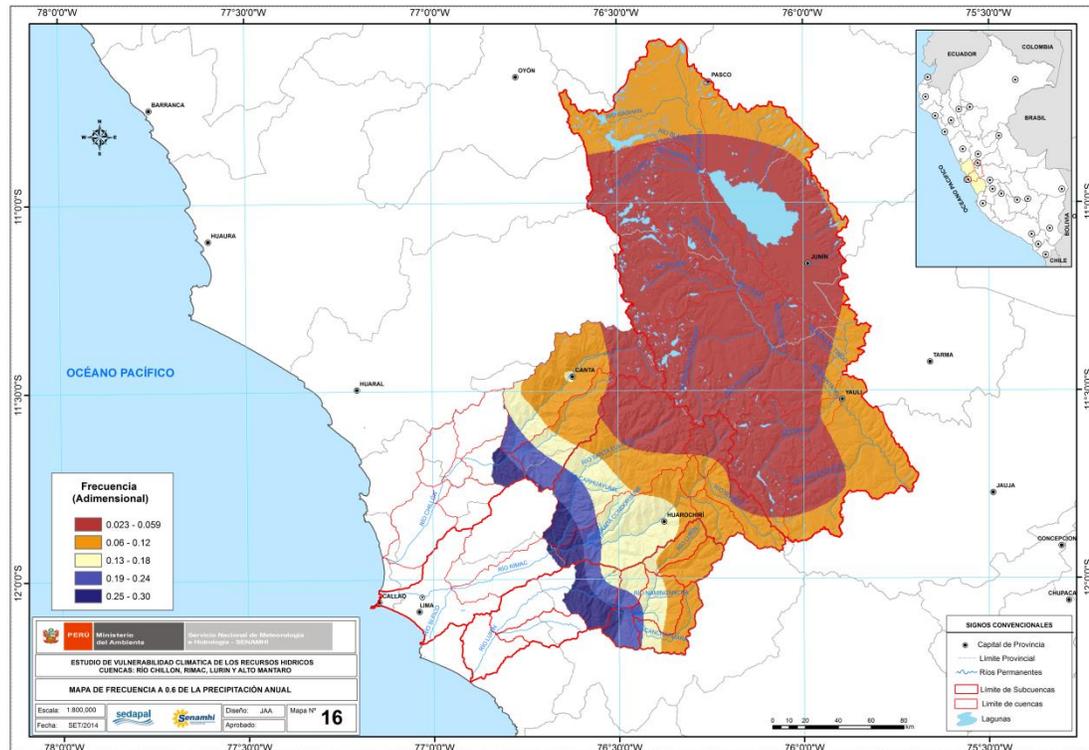


Figura 30. Mapa de frecuencia de una sequía equivalente al 60% Precipitación normal

La Figura 31, 32 y 33 muestra el mapa de periodo de retorno de una sequía meteorológica con características correspondientes a 0.2, 0.4 y 0.6 de la Precipitación anual, es decir, situaciones con una deficiencia pluviométrica de 80, 60 y 40% del mapa de precipitación anual histórica (periodo 1981-2010) respectivamente.

El mapa de periodo de retorno para una situación de 0.2 de precipitación anual, los tiempos de retorno varía de 25 a 4474 años. Se observa que hacia el nor este de la cuenca del río Rímac que limita con parte alta del río Chillón y de mayor extensión en la cuenca del Alto Mantaro el periodo de retorno son más lejanos que alcanza hasta los 4474 años. La zonas más críticas están emplazadas entre hacia la cuenca baja del río Chillón, Rímac y Lurín con un periodo de retorno cada 25 a 80 años (en superficies emplazadas desde los 1000 a 4000 msnm).

El mapa de periodo de retorno para una situación de 0.4 de precipitación anual, los tiempos de retorno varía de 7 a 393 años. Se observa que hacia el nor este de la cuenca del río Rímac que limita con la parte alta del río Chillón y de mayor extensión en la cuenca del Alto Mantaro el periodo de retorno son más lejanos que alcanza hasta los 393 años, sin embargo hacia la cuenca media y baja de los ríos Chillón, Rímac y Lurín, el periodo de retorno se reduce hasta 7 años. La zonas más críticas están emplazadas entre hacia la cuenca baja del río Chillón, Rímac y Lurín con un periodo de retorno cada 7 a 80 años (en superficies emplazadas desde los 1000 a 4000 msnm).

El mapa de periodo de retorno para una situación de 0.6 de precipitación anual, los tiempos de retorno varía de 3 a 43 años. Se observa que hacia el nor este de la cuenca del río Rímac que limita con la parte alta del río Chillón y de mayor extensión en la cuenca del Alto Mantaro el periodo de retorno son más lejanos que alcanza hasta los 43 años, sin embargo hacia la cuenca media y baja de los ríos Chillón, Rímac y Lurín, con un periodo de retorno cada 3 a 16 años (en superficies emplazadas desde los 1000 a 4000 msnm).

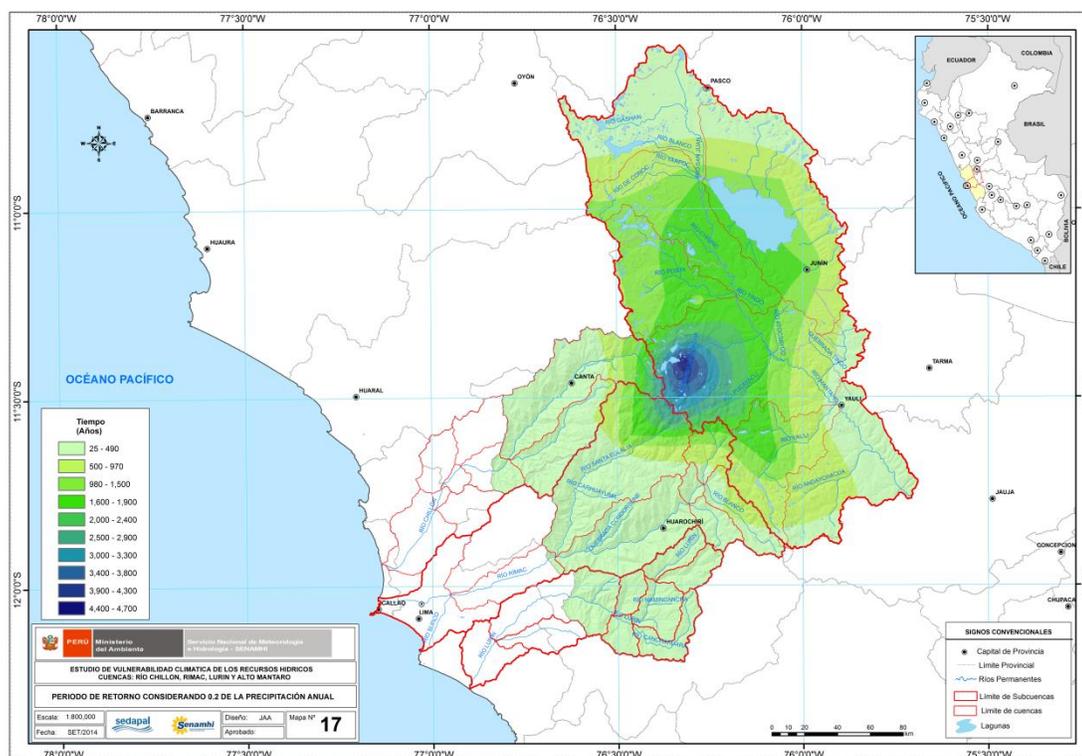


Figura 31. Periodo de retorno de una sequía equivalente al 20% Precipitación normal

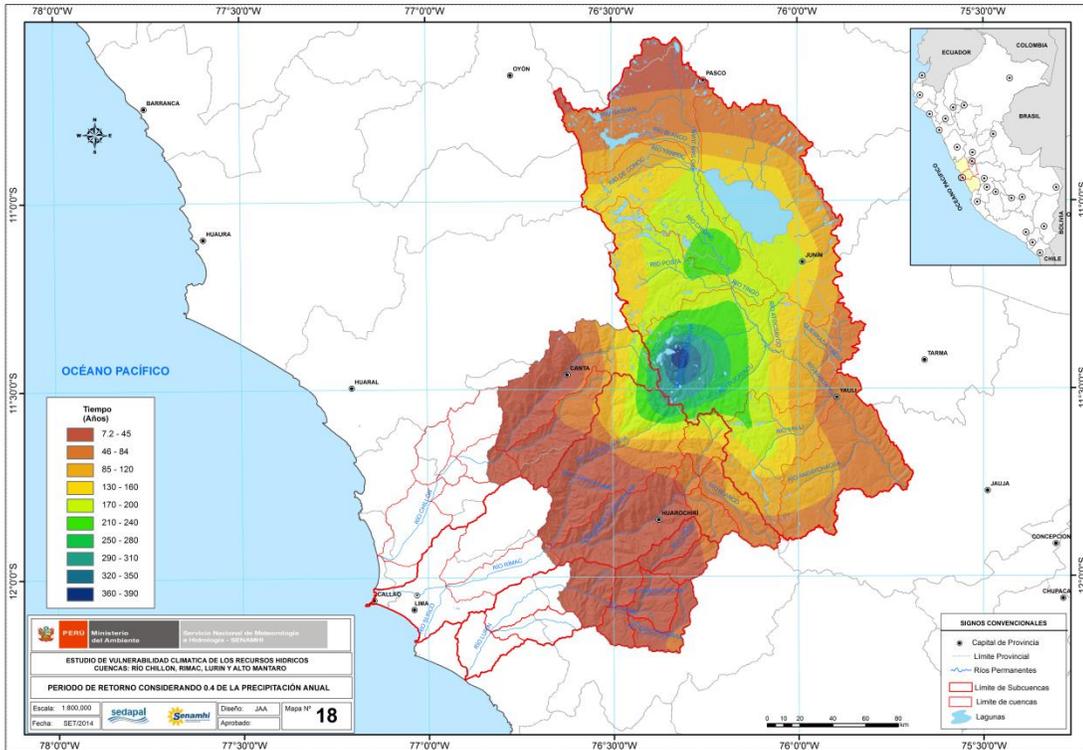


Figura 32. Periodo de retorno de una sequía equivalente al 40% Precipitación normal

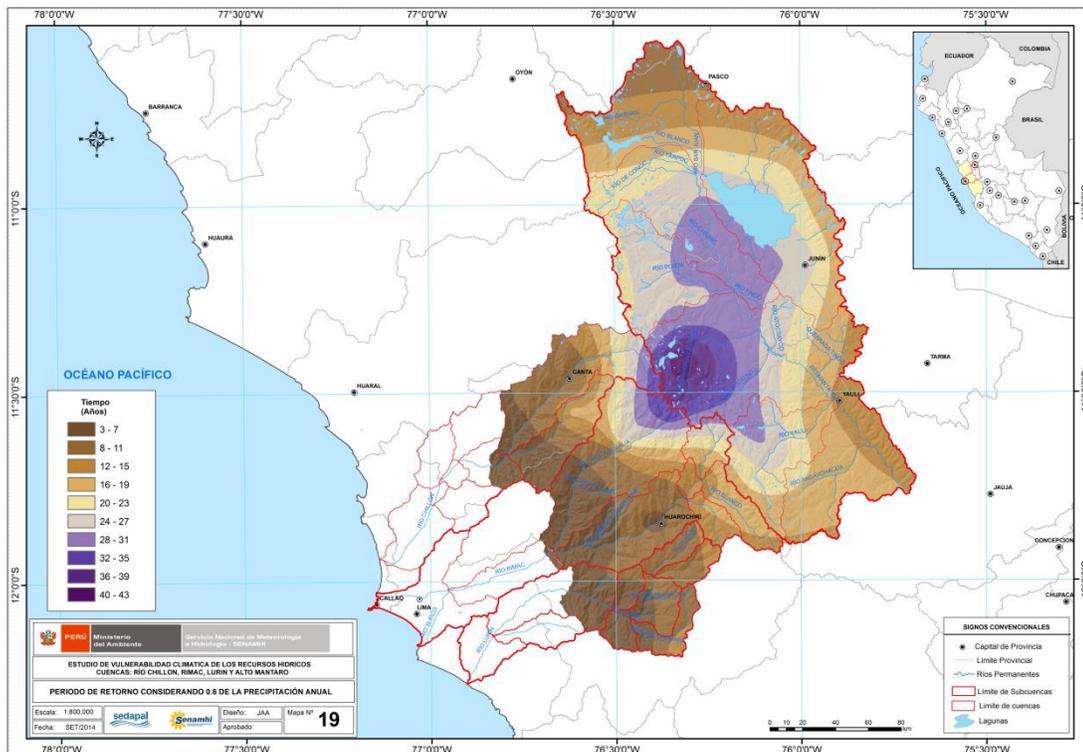


Figura 33. Periodo de retorno de una sequía equivalente al 60% Precipitación normal

## 6. CONCLUSIONES

- La metodología del Análisis regional de frecuencia presentada se sustenta en la aplicación de los L-Momentos desde una perspectiva de análisis probabilístico espacial, lo cual le confiere al método la capacidad de poder determinar en cualquier punto de la cuenca la probabilidad de ocurrencia de un evento particular de sequía meteorológica conocida la distribución de probabilidad regional.
- 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, Laguna Surasaca, Huamantanga, Parquin, Huaros, Carampoma, Yauli, Carania, Huengue, Atosaico, Alcantarilla, Huayan, Matucana y Marcapomacocha), cabe indicar que los cambios se presentaron en los años 1970, 1975, 1976, 1977, 1993, 1996, 1997, 1998 y 2009, que corresponden a años denominados El Niño y La Niña de diferentes intensidades según la clasificación (Lavado, 2009).
- Para verificar la estacionariedad mediante el test estadístico de Mann Kendall se detectaron tendencias en 10 de 59 estaciones (La Oroya, Río Blanco, Tingo, Chalilla, Pachangara, Parquin, Carampoma, Casapalca, Huenge y Huarochiri).
- Del análisis de independencia serial se ha detectaron en 2 de 59 estaciones (Estaciones Von Humbolt y Huarochiri).
- Se han definido cinco regiones homogéneas pluviométricas basada en 48 estaciones, de ellas cuatro ( $R_1$ ,  $R_3$ ,  $R_4$  y  $R_5$ ) se emplazan en las cuencas del río Chillón, Rímac, Lurín y Alto Mantaro.
- Se ha caracterizado una sequía meteorológica para situaciones de 0.2, 0.4 y 0.6 del valor normal de la precipitación anual, correspondientes a una deficiencia de 80, 60 y 40% con respecto a su valor normal.
- La distribución de probabilidad a la cual se ajustan las regiones homogéneas definidas es la Logística Generalizada, que es común para las 4 regiones identificadas en el área de interés. Si las regiones correspondieran al ajuste de diferentes distribuciones de probabilidad regional se tendría que mapear por cada región y luego integrar en un solo mapa estos resultados parciales.

- Existe una mayor probabilidad de ocurrencia de sequías con deficiencia de 80, 60 y 40% con respecto a su valor normal hacia la cuenca media y baja de los ríos Chillón, Rímac y Lurín; sin embargo por encima de los 4000 msnm esta probabilidad es mucho menor y tiende a cero.
- Los periodos de retorno asociados a la ocurrencia de una sequía equivalente a un 80 de déficit en la precipitación anual, varían de 25 a 4474 años. Se observa que hacia el nor este parte alta de la cuenca del rio Rímac con limite a la cuenca del Chillón y gran parte de la cuenca del Alto Mantaro, la probabilidad de ocurrencia es casi nula, ello responde principalmente a la frecuencia de eventos húmedos predominantes en las últimas décadas que captura el mapa de precipitación anual, sin embargo hacia la cuenca media y baja de los ríos Chillón, Rímac y Lurín, son las áreas más vulnerables debido a que el periodo de retorno se reduce de 25 a 300 años.
- Los periodos de retorno asociados a la ocurrencia de una sequía equivalente a un 60% de déficit en la precipitación anual varía de 7 a 393 años, sus incidencias espaciales son similares a la presentado para una deficiencia de 80% de la precipitación anual, la diferencia radica en que el periodo de retorno en las área más vulnerables se reducen aún más variando de 7 a 80 años, respectivamente.
- Los periodos de retorno de una sequía con deficiencia de 40% respecto a su valor normal, tienden a presentar un comportamiento similar a sus correspondientes mapas de frecuencia, estimándose periodos de retorno que varían de 3 a 43 años. Las zonas más críticas están emplazadas hacia la cuenca media a baja del rio Chillón, Rímac y Lurín con un periodo de retorno cada 3 a 16 años principalmente en superficies emplazadas desde los 1000 a 4000 msnm.
- El patrón de recurrencia refleja una relación inversa con las características de distribución espacial de la precipitación anual, es decir a menor altitud mayor recurrencia, y mayor altitud menor recurrencia, debido a la gran influencia del factor orográfico.
- La calidad del mapa frecuencia y el periodo de retorno, son directamente relacionados con la calidad del mapa de precipitación media anual del cual derivan. Por tanto, mientras mejores sean los procedimientos para la obtención de este último, mejor la calidad del primero.

## 7. RECOMENDACIONES

- Complementar y contrastar el análisis de la sequía con el índice de precipitación estandarizada (IPE ó SPI siglas en inglés) pero regionalmente no por estación.
- Validar los resultados, excluyendo una estación del análisis general y someterla de manera independiente al análisis de frecuencia, teniendo cuidado que la distribución de probabilidad se debe aplicar para una condición de sequía, más no como si se tratase de un evento extremo.
- Con fines de contrastar los mapas de periodos de retorno generados, se podría determinar por cada estación los tiempos de retorno asociados para cada sequía específica e interpolar dichos valores a fin de contrastar con el mapa generado en este estudio.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- Acuña, J. et. al. 2011. Análisis regional de frecuencia de precipitación anual para la determinación de mapas de sequías. Revista Peruana Geotatmosférica RPGA (3), pp. 104-115.
- Álvarez M., J. Puertas, B. Soto, F. Díaz-Fierros. 1999. "Análisis Regional de las Precipitaciones Máximas en Galicia mediante el Método del Índice de Avenida" . vol. 6 .Nº4, pp. 381
- 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. Nº. 240
- Fernandez C. and 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. Sequia: Definiciones, Tipologías y Métodos de cuantificación. *Investigaciones Geográficas* N°26 (2001) pp. 59-80. Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional - Universidad de Barcelona.
- Michelle Hallack-Alegria and David 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.
- Nuñez J.H. 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., Barker, B. Taylor, G. & Wallis, J. (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.
- 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.
- 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.

## ANEXO

## PENDIENTE DEL RIO RESPECTO AL PUNTO DE CONTROL HIDROMETRICO

Pendiente respecto a la Estación Puente Magdalena

Pendiente	Cota mas Baja	Cota mas Alta	Diferencia de cotas	Longitud (m) (L)	Pendiente (S)	$1 / \sqrt{S}$
S1	900	950	50	460	0.11	3.03
S2	950	1000	50	1250	0.04	5.00
S3	1000	1050	50	2290	0.02	6.77
S4	1050	1100	50	1640	0.03	5.73
S5	1100	1150	50	2070	0.02	6.43
S6	1150	1200	50	2460	0.02	7.01
S7	1200	1250	50	1220	0.04	4.94
S8	1250	1300	50	1520	0.03	5.51
S9	1300	1350	50	1240	0.04	4.98
S10	1350	1400	50	1440	0.03	5.37
S11	1400	1450	50	1100	0.05	4.69
S12	1450	1500	50	1210	0.04	4.92
S13	1500	1550	50	1380	0.04	5.25
S14	1550	1600	50	890	0.06	4.22
S15	1600	1650	50	1280	0.04	5.06
S16	1650	1700	50	1590	0.03	5.64
S17	1700	1750	50	940	0.05	4.34
S18	1750	1800	50	1230	0.04	4.96
S19	1800	1850	50	740	0.07	3.85
S20	1850	1900	50	1040	0.05	4.56
S21	1900	1950	50	1330	0.04	5.16
S22	1950	2000	50	140	0.36	1.67
S23	2000	2050	50	930	0.05	4.31
S24	2050	2100	50	950	0.05	4.36
S25	2100	2150	50	760	0.07	3.90
S26	2150	2200	50	1120	0.04	4.73
S27	2200	2250	50	1450	0.03	5.39
S28	2250	2300	50	550	0.09	3.32
S29	2300	2350	50	1080	0.05	4.65
S30	2350	2400	50	940	0.05	4.34
S31	2400	2450	50	590	0.08	3.44
S32	2450	2500	50	890	0.06	4.22
S33	2500	2550	50	1270	0.04	5.04
S34	2550	2600	50	480	0.10	3.10
S35	2600	2650	50	460	0.11	3.03
S36	2650	2700	50	730	0.07	3.82
S37	2700	2750	50	1010	0.05	4.49
S38	2750	2800	50	360	0.14	2.68
S39	2800	2850	50	1470	0.03	5.42
S40	2850	2900	50	850	0.06	4.12
S41	2900	2950	50	600	0.08	3.46
S42	2950	3000	50	440	0.11	2.97
S43	3000	3050	50	700	0.07	3.74
S44	3050	3100	50	270	0.19	2.32
S45	3100	3150	50	190	0.26	1.95

Continua

Pendiente	Cota mas Baja	Cota mas Alta	Diferencia de cotas	Longitud (m) (L)	Pendiente (S)	$1 / \sqrt{S}$
S46	3150	3200	50	250	0.20	2.24
S47	3200	3250	50	700	0.07	3.74
S48	3250	3300	50	290	0.17	2.41
S49	3300	3350	50	1060	0.05	4.60
S50	3350	3400	50	890	0.06	4.22
S51	3400	3450	50	1310	0.04	5.12
S52	3450	3500	50	870	0.06	4.17
S53	3500	3550	50	1020	0.05	4.52
S54	3550	3600	50	970	0.05	4.40
S55	3600	3650	50	1260	0.04	5.02
S56	3650	3700	50	610	0.08	3.49
S57	3700	3750	50	790	0.06	3.97
S58	3750	3800	50	920	0.05	4.29
S59	3800	3850	50	1280	0.04	5.06
S60	3850	3900	50	1140	0.04	4.77
S61	3900	3950	50	1310	0.04	5.12
S62	3950	4000	50	890	0.06	4.22
S63	4000	4050	50	3810	0.01	8.73
S64	4050	4100	50	1200	0.04	4.90
S65	4100	4150	50	710	0.07	3.77
S66	4150	4200	50	80	0.63	1.26
S67	4200	4250	50	220	0.23	2.10
S68	4250	4300	50	2710	0.02	7.36
S69	4300	4350	50	780	0.06	3.95
S70	4350	4400	50	1760	0.03	5.93
S71	4400	4450	50	980	0.05	4.43
S72	4450	4500	50	380	0.13	2.76
S73	4500	4550	50	330	0.15	2.57
S74	4550	4600	50	270	0.19	2.32
S75	4600	4650	50	1500	0.03	5.48
S76	4650	4700	50	560	0.09	3.35
S77	4700	4750	50	100	0.50	1.41
<b>Total</b>				<b>77500</b>		<b>329.58</b>
Pendiente				m/m		<b>0.05</b>
Pendiente				%		<b>5.4</b>

Pendiente respecto a la Estación Chosica

Pendiente	Cota mas Baja	Cota mas Alta	Diferencia de cotas	Longitud (m) (L)	Pendiente (S)	$1 / \sqrt{S}$
S1	850	900	50	1650	0.03	5.74
S2	900	950	50	1890	0.03	6.15
S3	950	1000	50	1700	0.03	5.83
S4	1000	1050	50	1550	0.03	5.57
S5	1050	1100	50	1790	0.03	5.98
S6	1100	1150	50	1270	0.04	5.04
S7	1150	1200	50	1130	0.04	4.75
S8	1200	1250	50	2040	0.02	6.39
S9	1250	1300	50	1810	0.03	6.02
S10	1300	1350	50	1380	0.04	5.25
S11	1350	1400	50	1550	0.03	5.57
S12	1400	1450	50	650	0.08	3.61
S13	1450	1500	50	1480	0.03	5.44
S14	1500	1550	50	2260	0.02	6.72
S15	1550	1600	50	1110	0.05	4.71
S16	1600	1650	50	1010	0.05	4.49
S17	1650	1700	50	870	0.06	4.17
S18	1700	1750	50	610	0.08	3.49
S19	1750	1800	50	1370	0.04	5.23
S20	1800	1850	50	920	0.05	4.29
S21	1850	1900	50	420	0.12	2.90
S22	1900	1950	50	580	0.09	3.41
S23	1950	2000	50	980	0.05	4.43
S24	2000	2050	50	1590	0.03	5.64
S25	2050	2100	50	790	0.06	3.97
S26	2100	2150	50	1340	0.04	5.18
S27	2150	2200	50	500	0.10	3.16
S28	2200	2250	50	2030	0.02	6.37
S29	2250	2300	50	110	0.45	1.48
S30	2300	2350	50	540	0.09	3.29
S31	2350	2400	50	1570	0.03	5.60
S32	2400	2450	50	2830	0.02	7.52
S33	2450	2500	50	1390	0.04	5.27
S34	2500	2550	50	1730	0.03	5.88
S35	2550	2600	50	230	0.22	2.14
S36	2600	2650	50	250	0.20	2.24
S37	2650	2700	50	1050	0.05	4.58
S38	2700	2750	50	1080	0.05	4.65
S39	2750	2800	50	260	0.19	2.28
S40	2800	2850	50	1520	0.03	5.51
S41	2850	2900	50	700	0.07	3.74
S42	2900	2950	50	1850	0.03	6.08
S43	2950	3000	50	630	0.08	3.55
S44	3000	3050	50	1060	0.05	4.60
S45	3050	3100	50	320	0.16	2.53

Continua

Pendiente	Cota mas Baja	Cota mas Alta	Diferencia de cotas	Longitud (m) (L)	Pendiente (S)	$1 / \sqrt{S}$
S46	3100	3150	50	330	0.15	2.57
S47	3150	3200	50	2060	0.02	6.42
S48	3200	3250	50	240	0.21	2.19
S49	3250	3300	50	190	0.26	1.95
S50	3300	3350	50	190	0.26	1.95
S51	3350	3400	50	580	0.09	3.41
S52	3400	3450	50	1640	0.03	5.73
S53	3450	3500	50	640	0.08	3.58
S54	3500	3550	50	360	0.14	2.68
S55	3550	3600	50	2780	0.02	7.46
S56	3600	3650	50	600	0.08	3.46
S57	3650	3700	50	730	0.07	3.82
S58	3700	3750	50	1010	0.05	4.49
S59	3750	3800	50	1010	0.05	4.49
S60	3800	3850	50	600	0.08	3.46
S61	3850	3900	50	1080	0.05	4.65
S62	3900	3950	50	840	0.06	4.10
S63	3950	4000	50	580	0.09	3.41
S64	4000	4050	50	830	0.06	4.07
S65	4050	4100	50	900	0.06	4.24
S66	4100	4150	50	970	0.05	4.40
S67	4150	4200	50	1080	0.05	4.65
S68	4200	4250	50	2470	0.02	7.03
S69	4250	4300	50	6650	0.01	11.53
S70	4300	4350	50	3010	0.02	7.76
S71	4350	4400	50	1910	0.03	6.18
S72	4400	4450	50	280	0.18	2.37
S73	4450	4500	50	1490	0.03	5.46
S74	4500	4550	50	340	0.15	2.61
S75	4550	4600	50	110	0.45	1.48
S76	4600	4650	50	300	0.17	2.45
S77	4650	4700	50	1500	0.03	5.48
S78	4700	4750	50	240	0.21	2.19
S79	4750	4800	50	1040	0.05	4.56
S80	4800	4850	50	490	0.10	3.13
S81	4850	4900	50	270	0.19	2.32
<b>Total</b>				<b>92730</b>		<b>299.05</b>
Pendiente					m/m	<b>0.05</b>
Pendiente					%	<b>5</b>

Pendiente respecto a la Estación Antapucro

Pendiente	Cota mas Baja	Cota mas Alta	Diferencia de cotas	Longitud (m) (L)	Pendiente (S)	$1 / \sqrt{S}$
S1	950	1000	50	830	0.06	4.07
S2	1000	1050	50	1270	0.04	5.04
S3	1050	1100	50	2040	0.02	6.39
S4	1100	1150	50	1740	0.03	5.90
S5	1150	1200	50	1490	0.03	5.46
S6	1200	1250	50	1420	0.04	5.33
S7	1250	1300	50	1740	0.03	5.90
S8	1300	1350	50	1570	0.03	5.60
S9	1350	1400	50	1180	0.04	4.86
S10	1400	1450	50	890	0.06	4.22
S11	1450	1500	50	1630	0.03	5.71
S12	1500	1550	50	1550	0.03	5.57
S13	1550	1600	50	1540	0.03	5.55
S14	1600	1650	50	1550	0.03	5.57
S15	1650	1700	50	1200	0.04	4.90
S16	1700	1750	50	870	0.06	4.17
S17	1750	1800	50	1000	0.05	4.47
S18	1800	1850	50	900	0.06	4.24
S19	1850	1900	50	890	0.06	4.22
S20	1900	1950	50	680	0.07	3.69
S21	1950	2000	50	690	0.07	3.71
S22	2000	2050	50	470	0.11	3.07
S23	2050	2100	50	750	0.07	3.87
S24	2100	2150	50	320	0.16	2.53
S25	2150	2200	50	580	0.09	3.41
S26	2200	2250	50	510	0.10	3.19
S27	2250	2300	50	480	0.10	3.10
S28	2300	2350	50	430	0.12	2.93
S29	2350	2400	50	590	0.08	3.44
S30	2400	2450	50	710	0.07	3.77
S31	2450	2500	50	400	0.13	2.83
S32	2500	2550	50	430	0.12	2.93
S33	2550	2600	50	750	0.07	3.87
S34	2600	2650	50	860	0.06	4.15
S35	2650	2700	50	890	0.06	4.22
S36	2700	2750	50	940	0.05	4.34
S37	2750	2800	50	590	0.08	3.44
S38	2800	2850	50	1220	0.04	4.94
S39	2850	2900	50	950	0.05	4.36
S40	2900	2950	50	960	0.05	4.38
S41	2950	3000	50	730	0.07	3.82
S42	3000	3050	50	470	0.11	3.07
S43	3050	3100	50	450	0.11	3.00
S44	3100	3150	50	790	0.06	3.97
S45	3150	3200	50	620	0.08	3.52

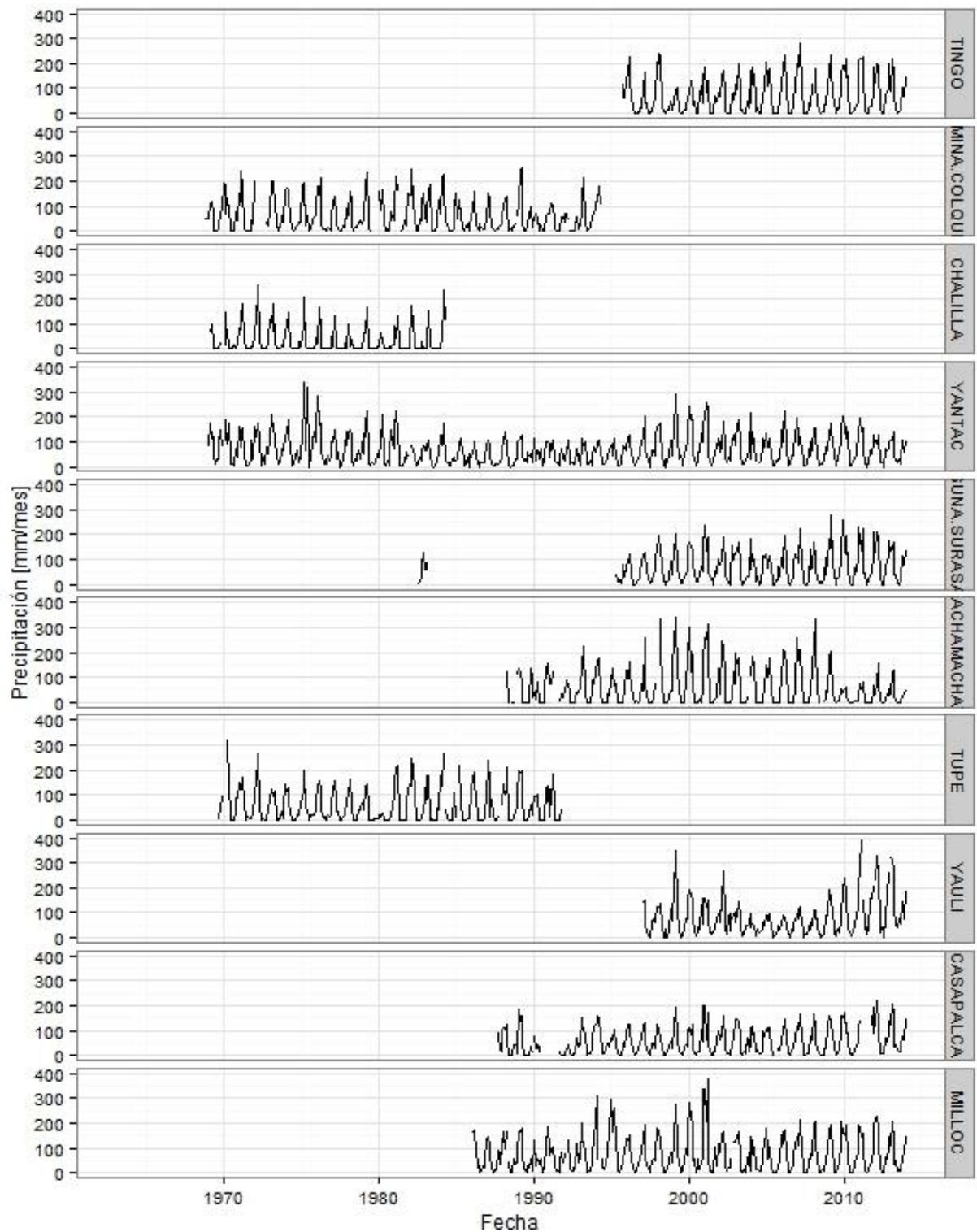
Continua

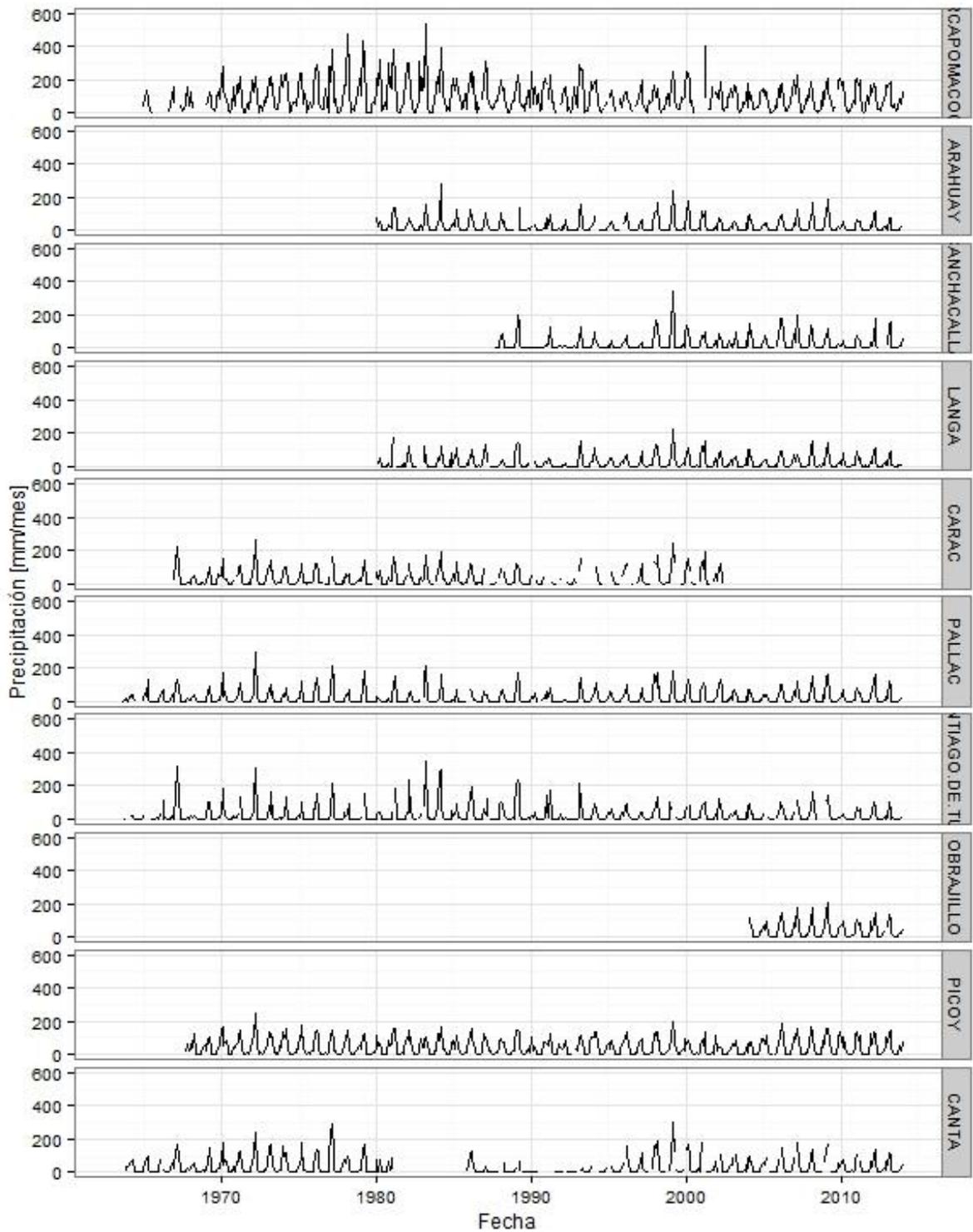
Pendiente	Cota mas Baja	Cota mas Alta	Diferencia de cotas	Longitud (m) (L)	Pendiente (S)	$1 / \sqrt{S}$
S46	3200	3250	50	790	0.06	3.97
S47	3250	3300	50	640	0.08	3.58
S48	3300	3350	50	480	0.10	3.10
S49	3350	3400	50	570	0.09	3.38
S50	3400	3450	50	540	0.09	3.29
S51	3450	3500	50	890	0.06	4.22
S52	3500	3550	50	670	0.07	3.66
S53	3550	3600	50	750	0.07	3.87
S54	3600	3650	50	710	0.07	3.77
S55	3650	3700	50	720	0.07	3.79
S56	3700	3750	50	550	0.09	3.32
S57	3750	3800	50	530	0.09	3.26
S58	3800	3850	50	730	0.07	3.82
S59	3850	3900	50	790	0.06	3.97
S60	3900	3950	50	530	0.09	3.26
S61	3950	4000	50	550	0.09	3.32
S62	4000	4050	50	720	0.07	3.79
S63	4050	4100	50	650	0.08	3.61
S64	4100	4150	50	600	0.08	3.46
S65	4150	4200	50	480	0.10	3.10
S66	4200	4250	50	660	0.08	3.63
S67	4250	4300	50	760	0.07	3.90
S68	4300	4350	50	780	0.06	3.95
S69	4350	4400	50	1520	0.03	5.51
S70	4400	4450	50	3180	0.02	7.97
S71	4450	4500	50	470	0.11	3.07
S72	4500	4550	50	70	0.71	1.18
S73	4550	4600	50	110	0.45	1.48
S74	4600	4650	50	170	0.29	1.84
S75	4650	4700	50	70	0.71	1.18
S76	4700	4750	50	70	0.71	1.18
S77	4750	4800	50	180	0.28	1.90
<b>Total</b>						<b>299.05</b>
Pendiente				63490	m/m	<b>0.06</b>
Pendiente					%	<b>6.3</b>

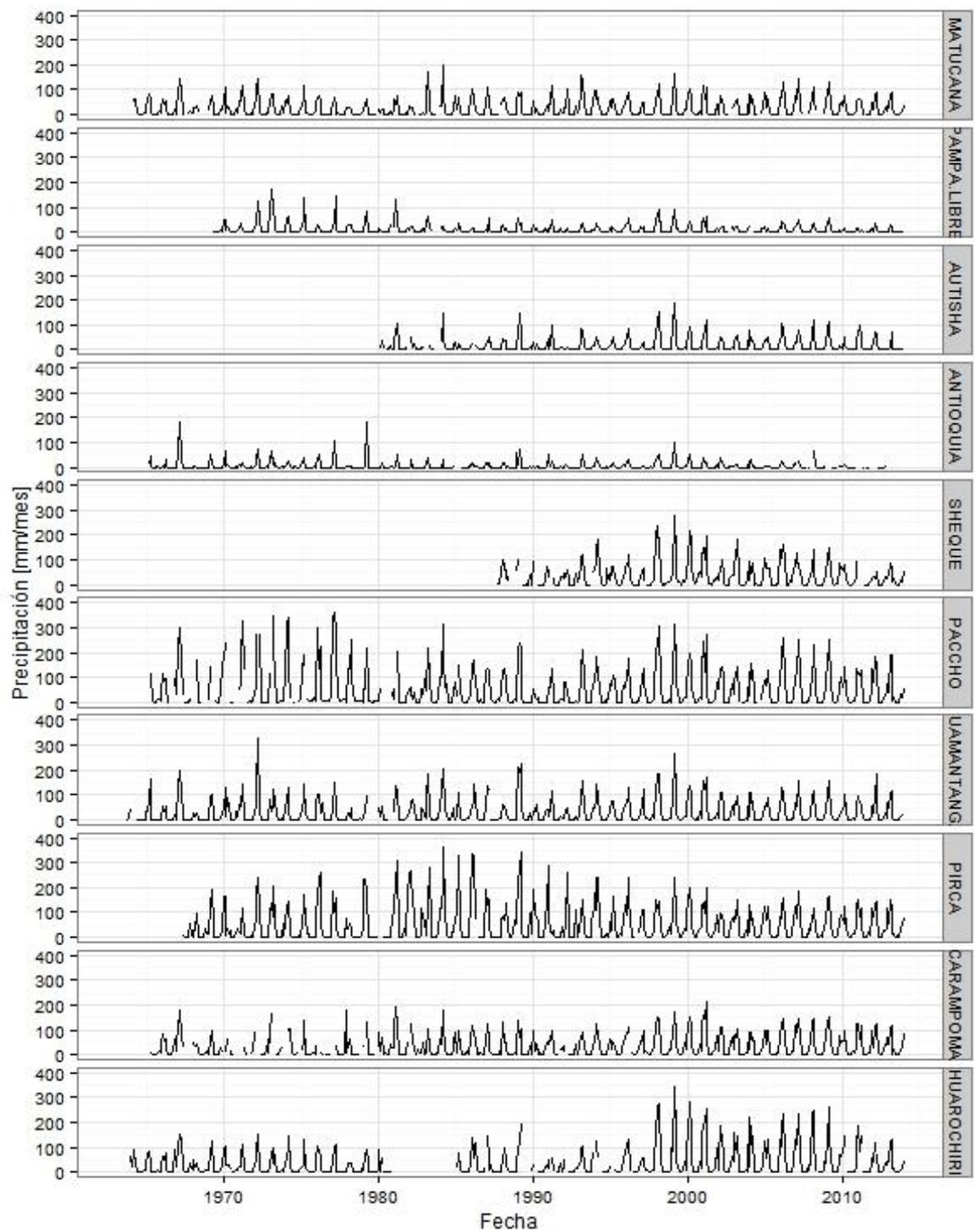
Pendiente respecto a la Estación Malpaso

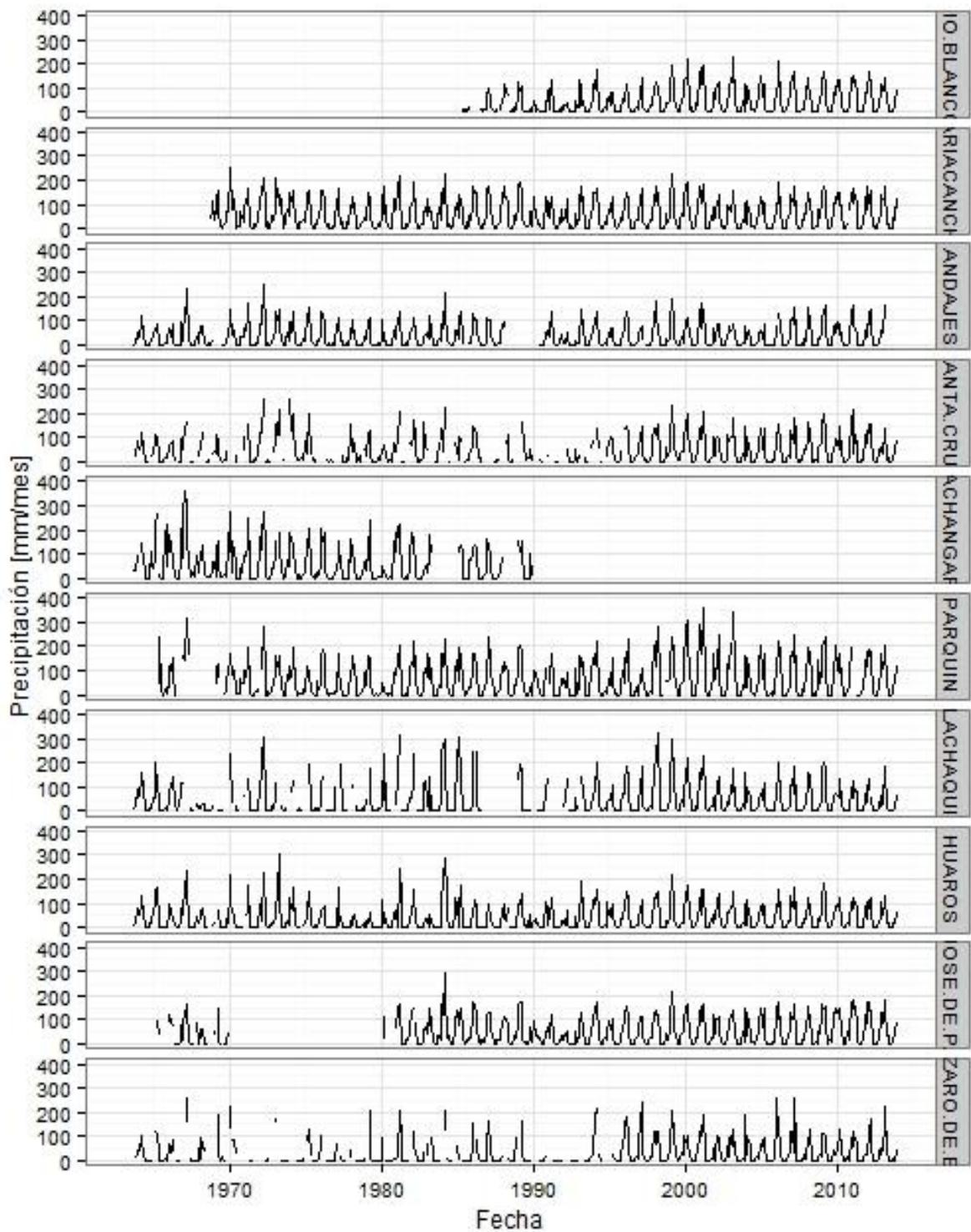
Pendiente	Cota mas Baja	Cota mas Alta	Diferencia de cotas	Longitud (m) (L)	Pendiente (S)	$1 / \sqrt{S}$	
S1	3750	3800	50	670	0.075	3.66	
S2	3800	3850	50	1470	0.034	5.42	
S3	3850	3900	50	15860	0.003	17.81	
S4	3900	3950	50	9940	0.005	14.10	
S5	3950	4000	50	19120	0.003	19.56	
S6	4000	4050	50	8520	0.006	13.05	
S7	4050	4100	50	28130	0.002	23.72	
<b>Total</b>				<b>83710</b>		<b>97.32</b>	
					Pendiente	m/m	<b>0.005</b>
					Pendiente	%	<b>0.51</b>

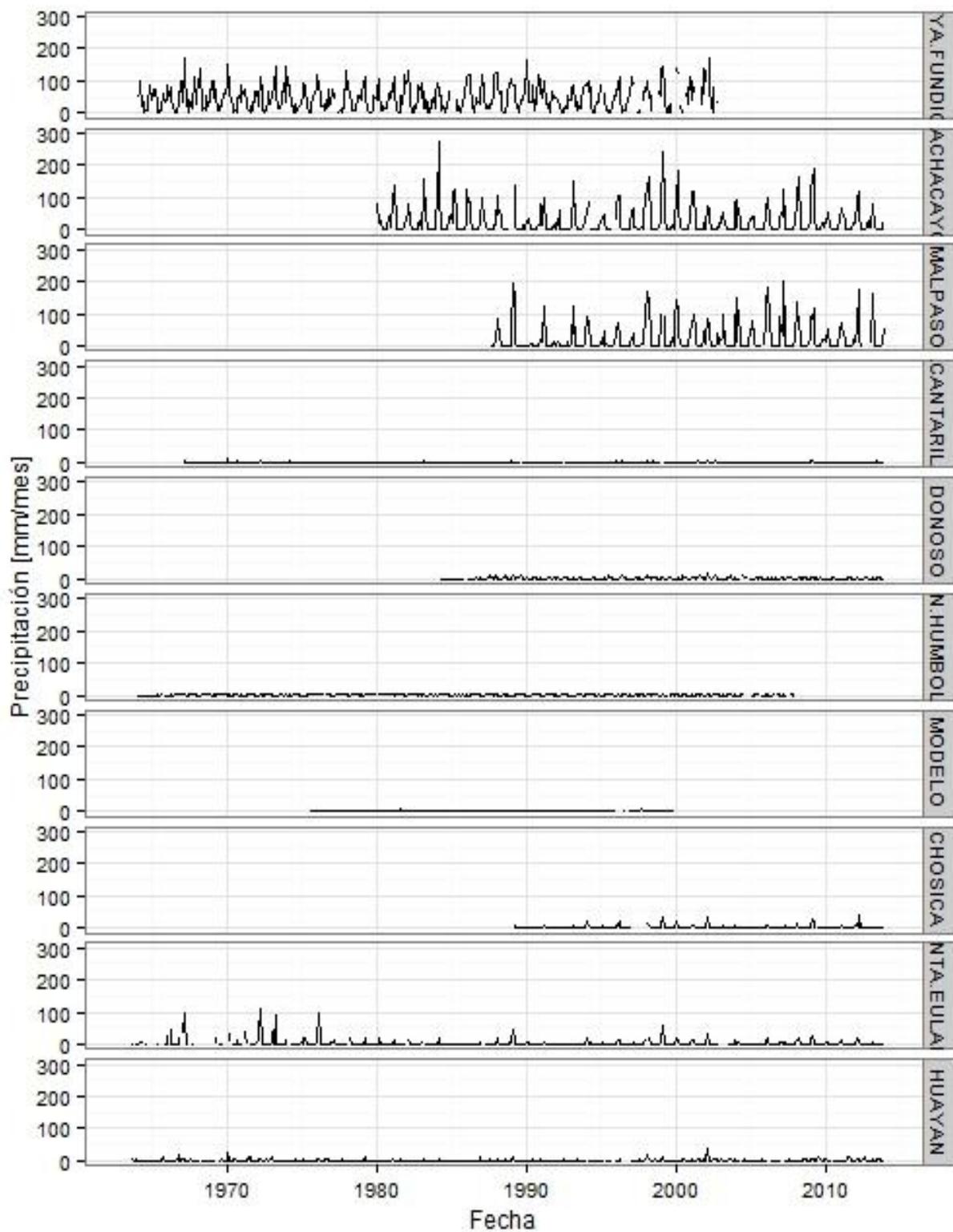
**SERIES TEMPORALES POR ESTACION ESCALA MENSUAL**



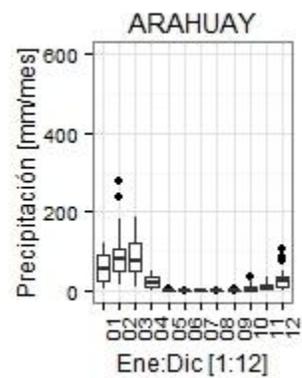
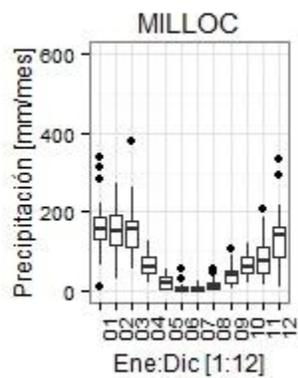
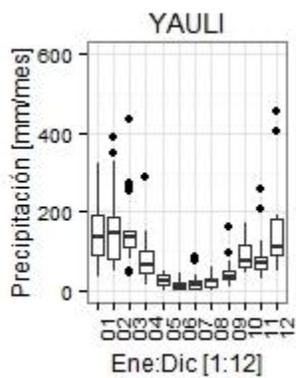
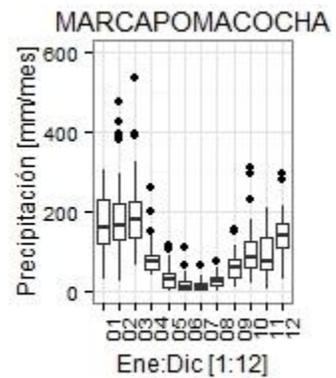
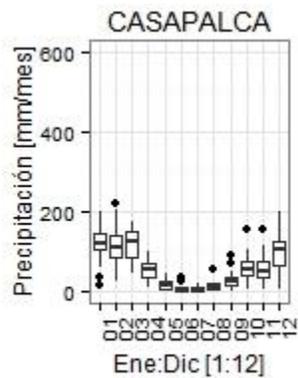
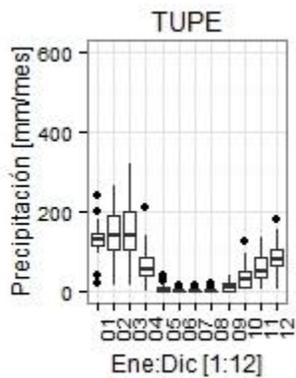
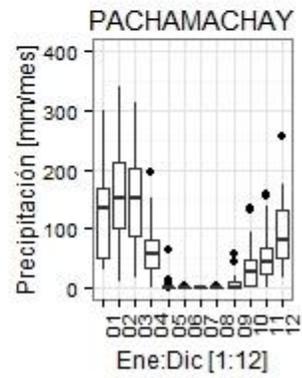
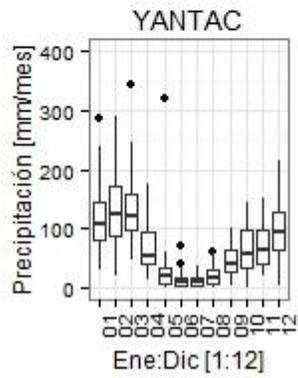
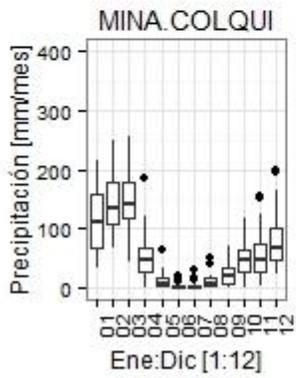
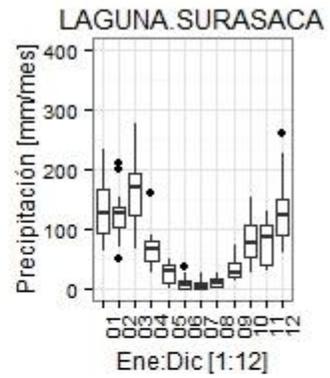
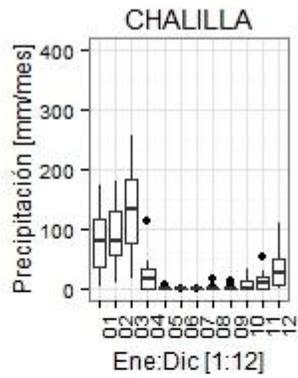
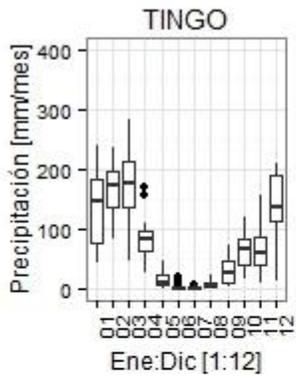


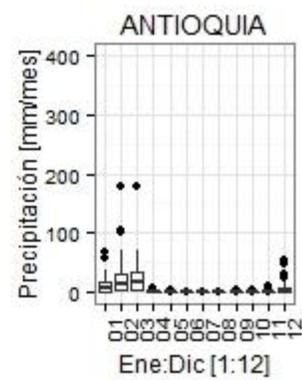
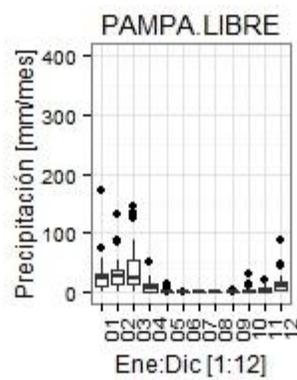
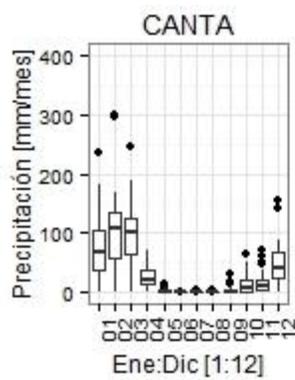
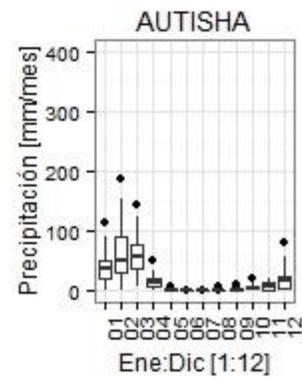
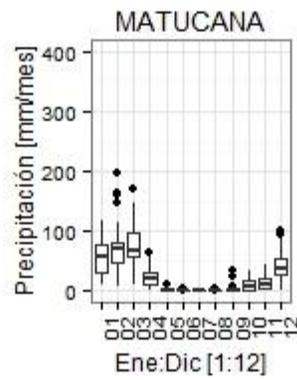
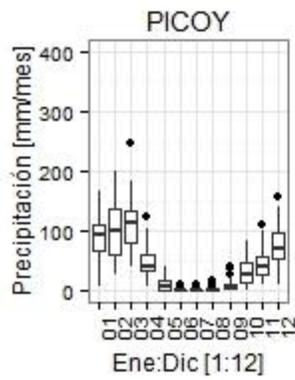
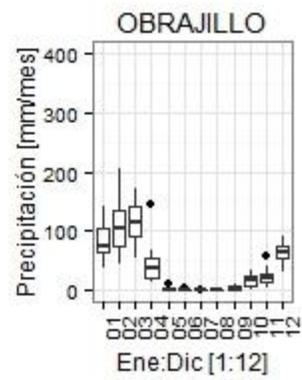
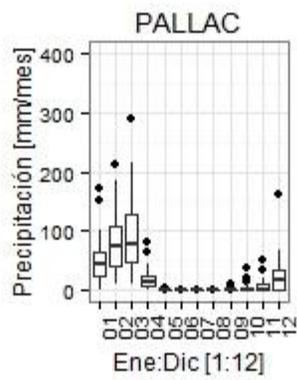
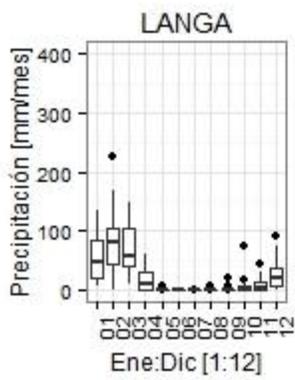
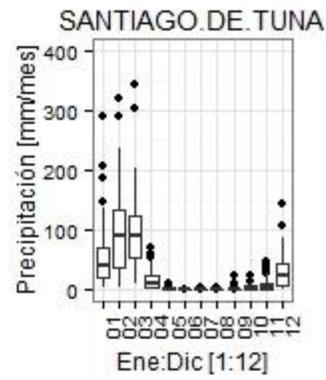
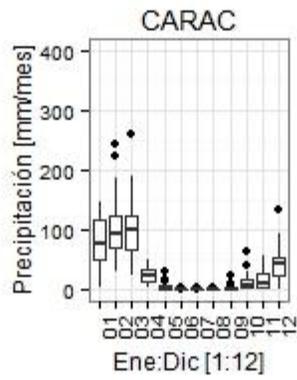
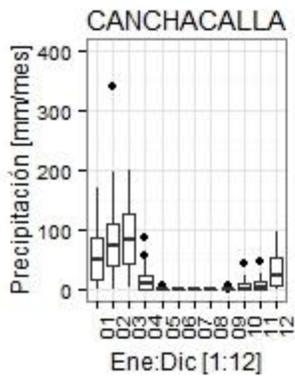


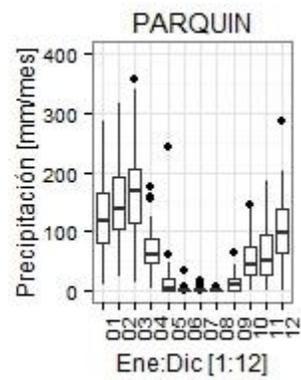
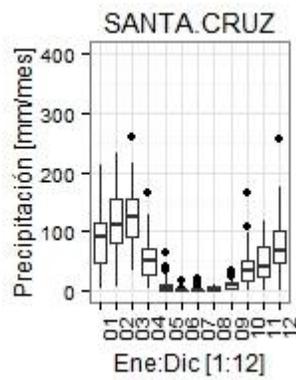
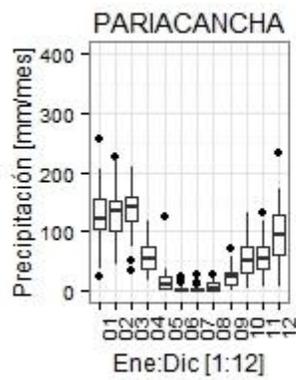
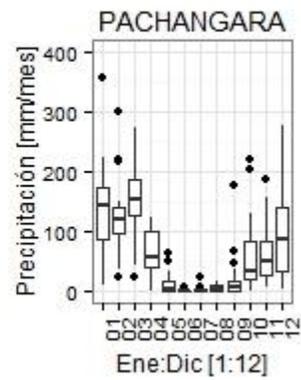
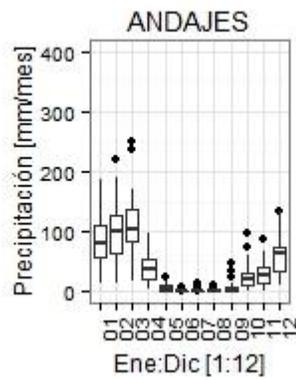
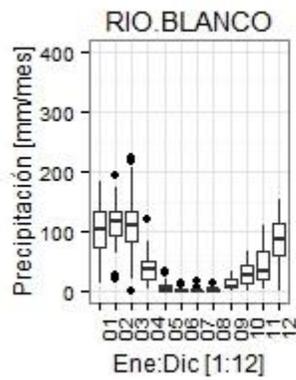
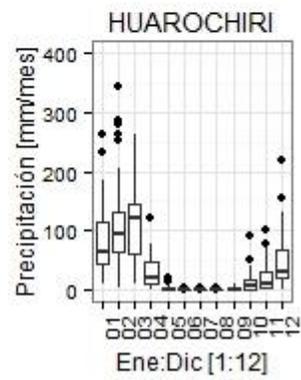
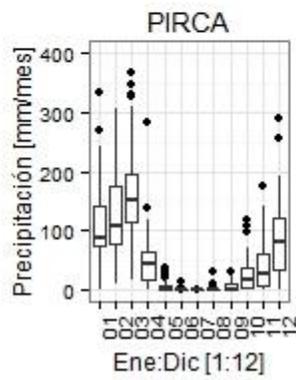
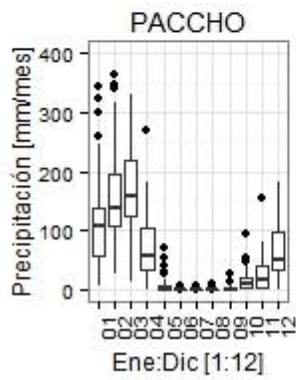
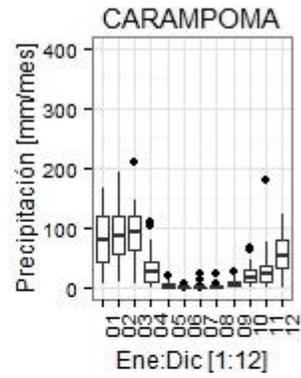
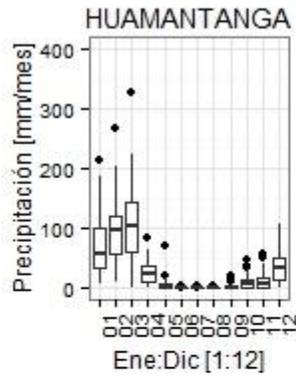
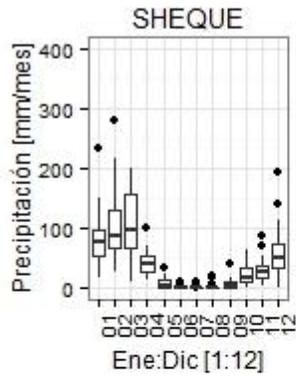


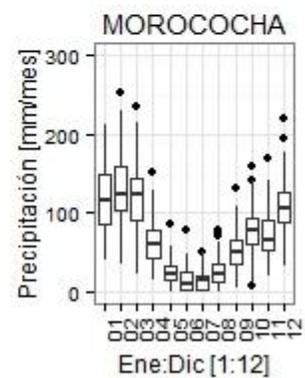
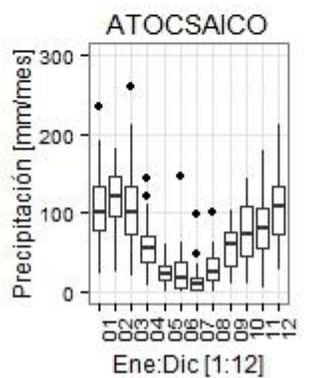
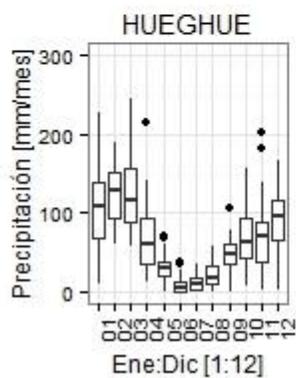
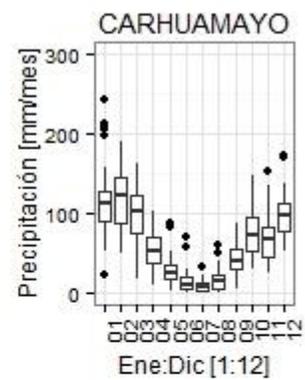
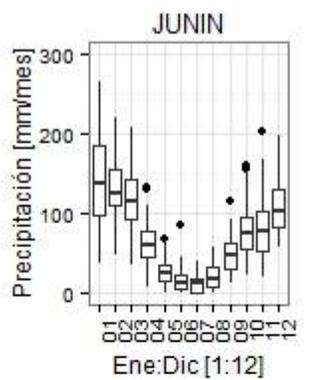
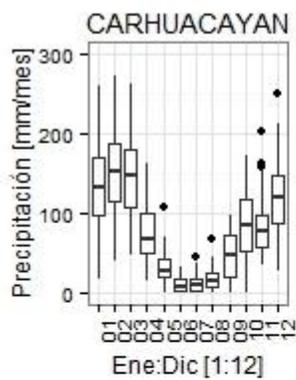
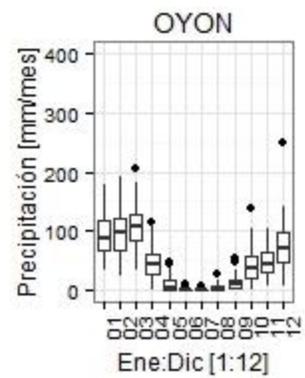
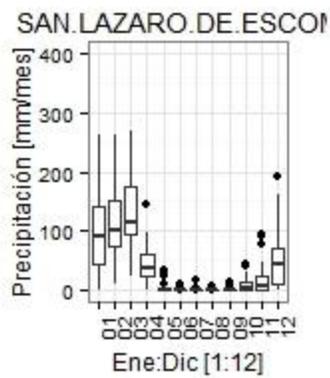
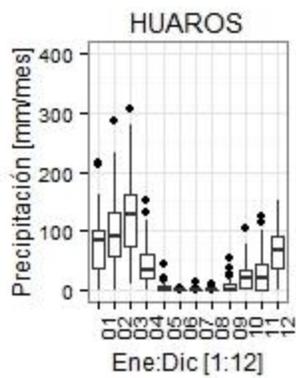
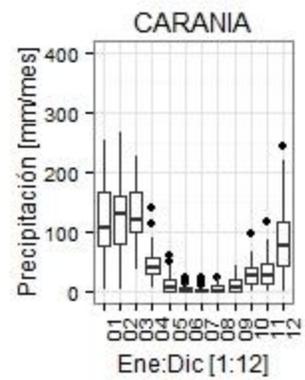
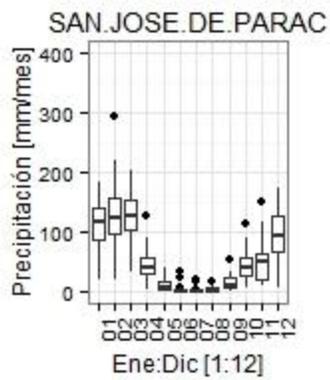
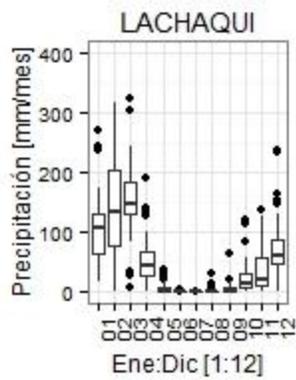


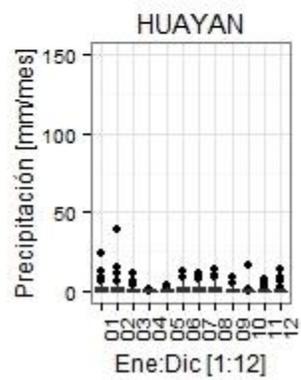
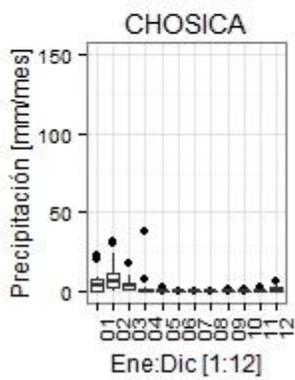
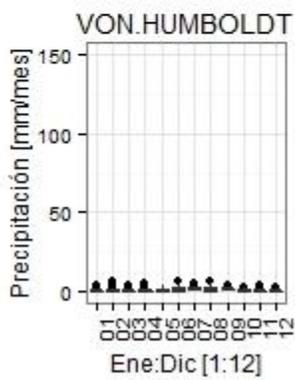
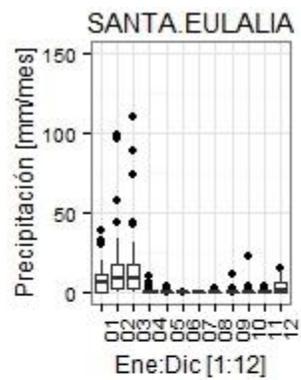
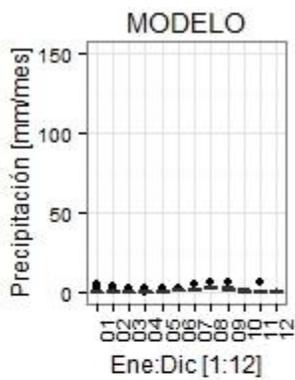
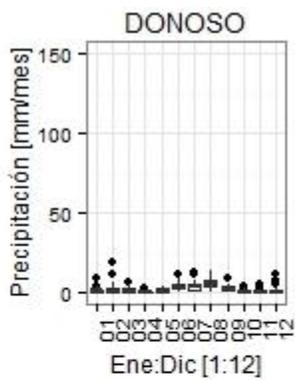
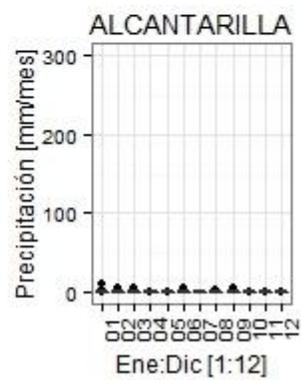
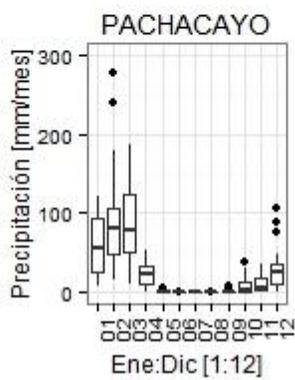
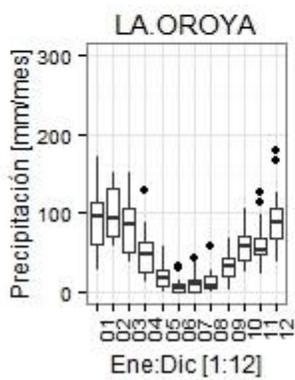
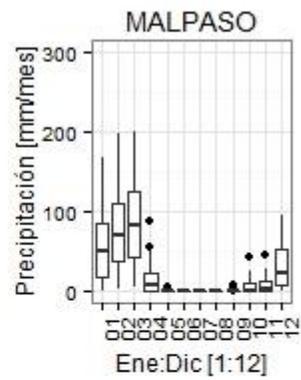
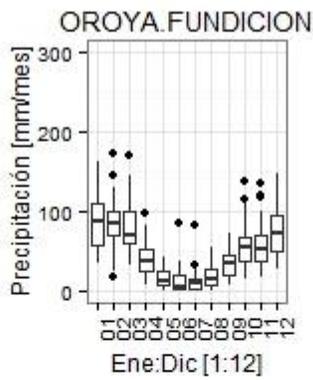
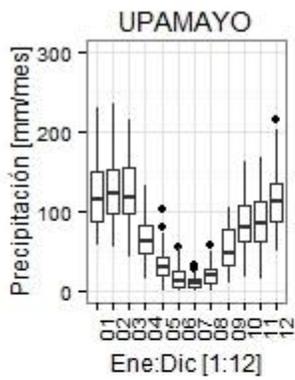
## DIAGRAMA DE CAJAS POR ESTACION



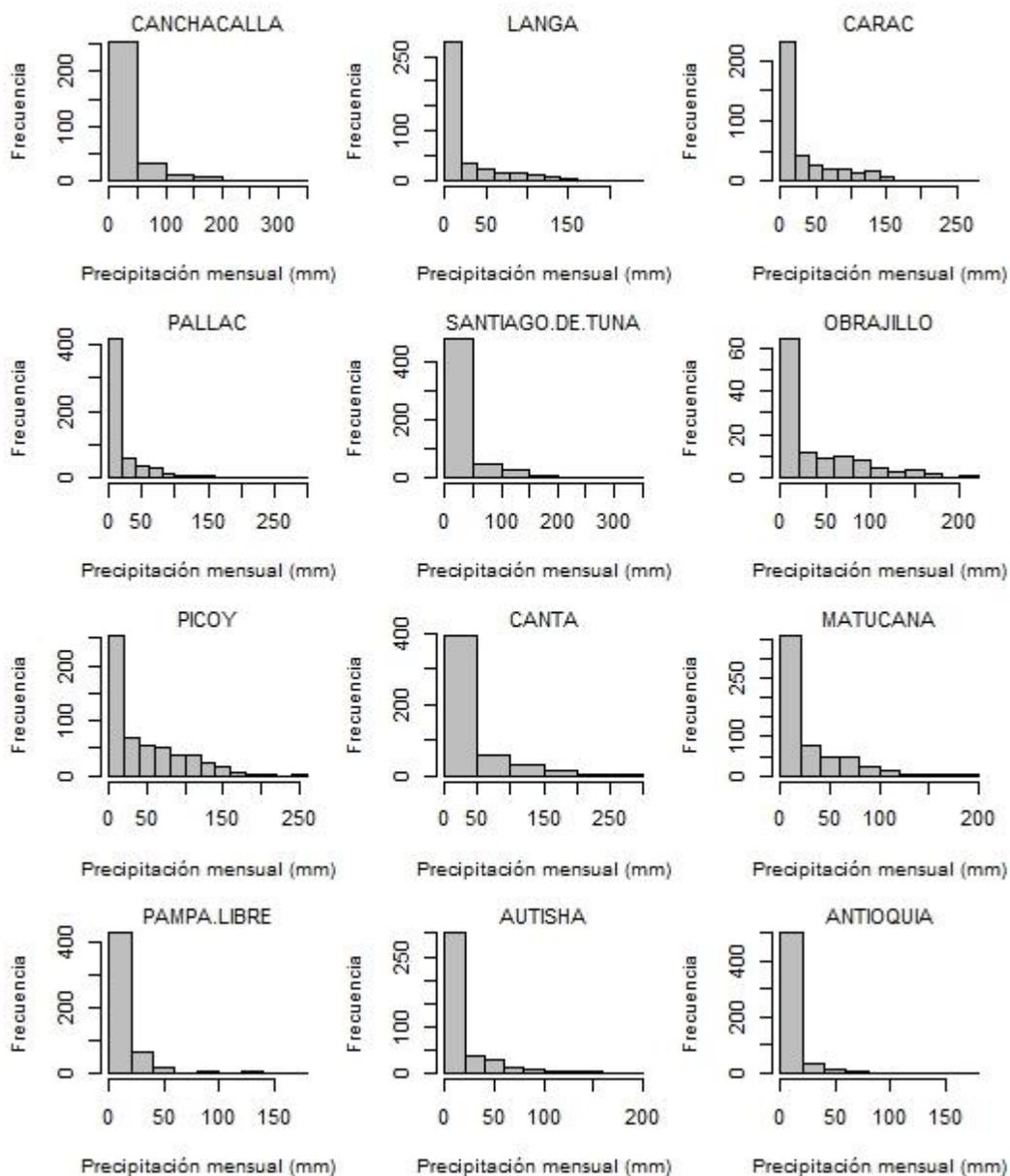


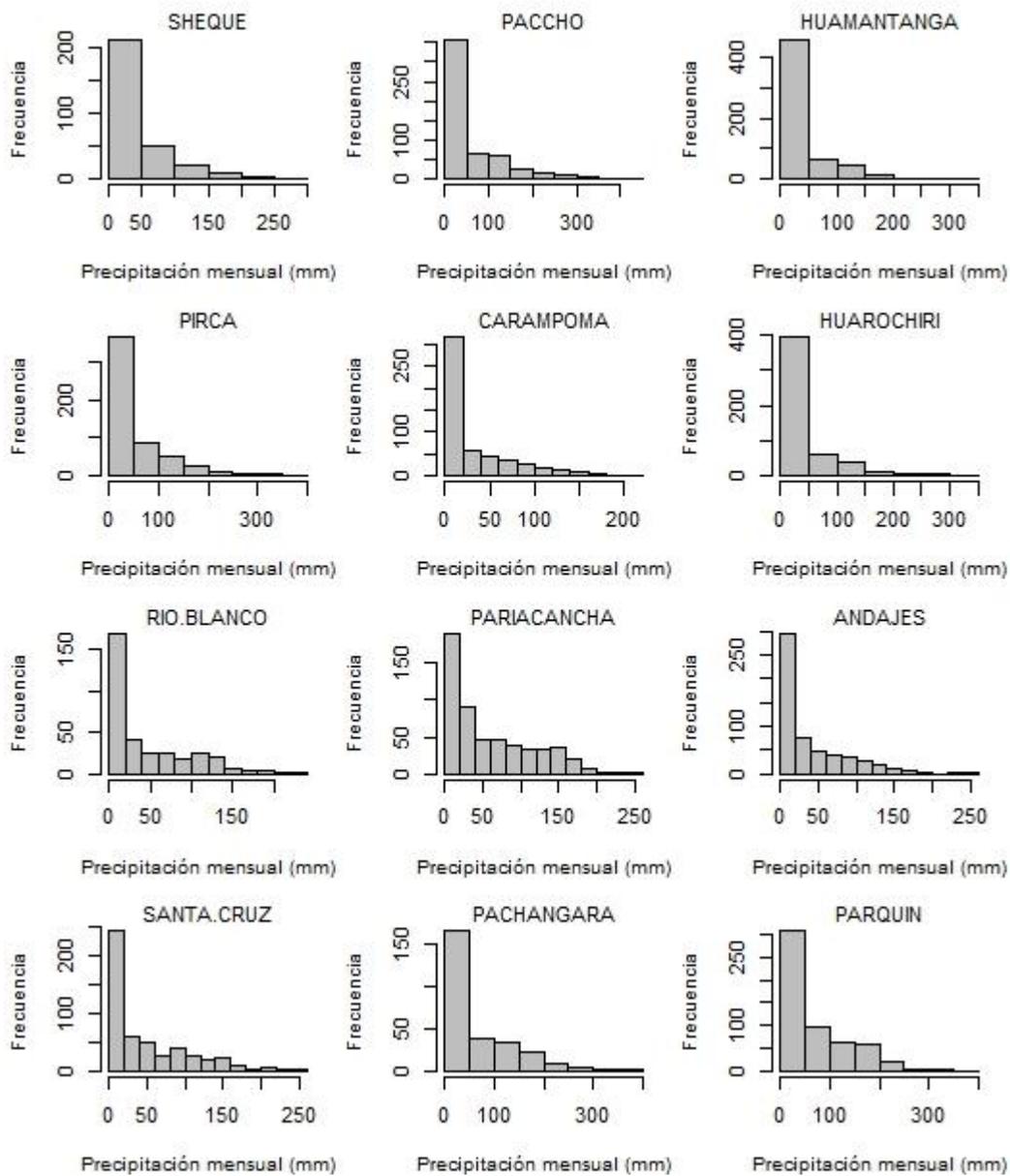


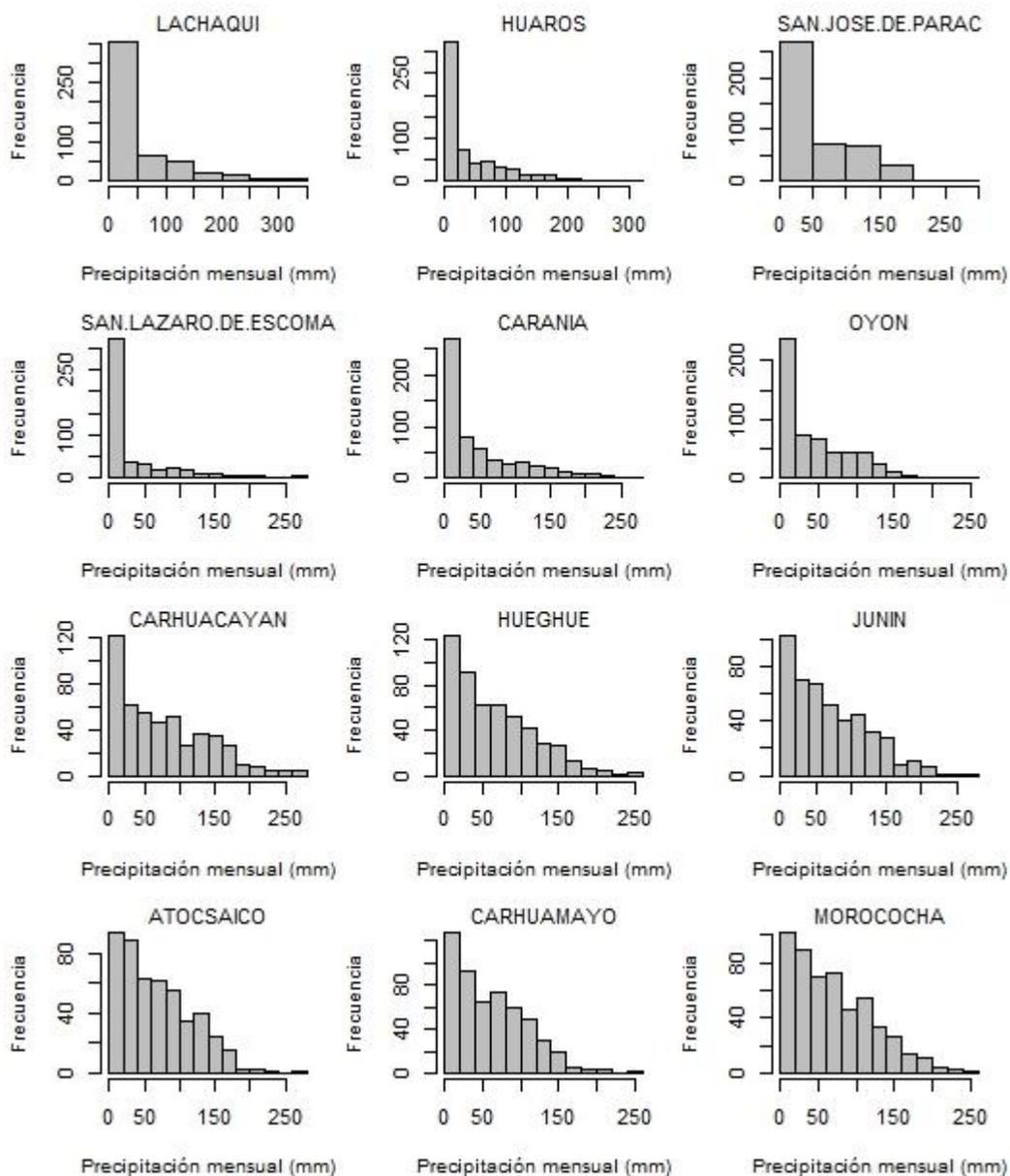


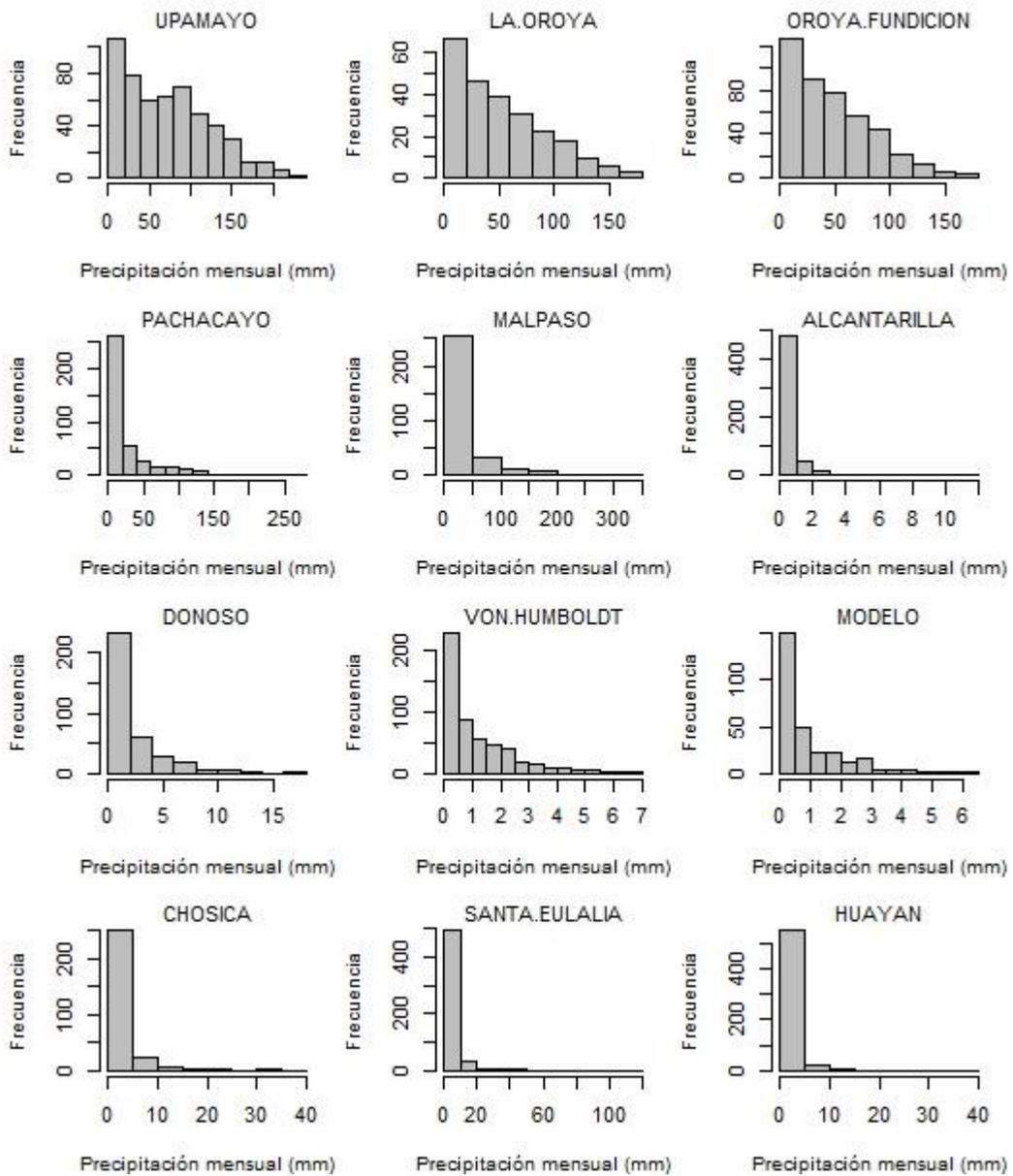


## HISTOGRAMAS DE PRECIPITACION POR ESTACION

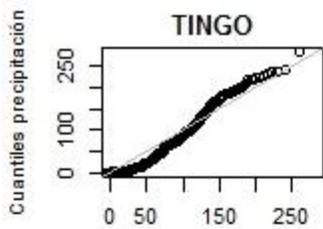




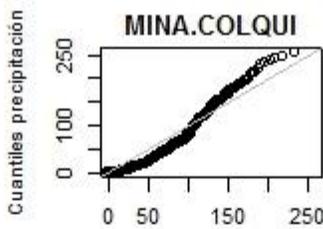




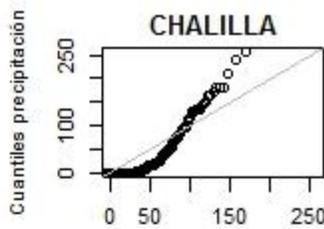
**RELACION ENTRE CUANTILES TEORICOS Y CUANTILES OBSERRADOS  
POR ESTACION**



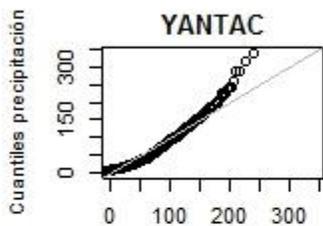
Cuantiles teóricos desde distribución



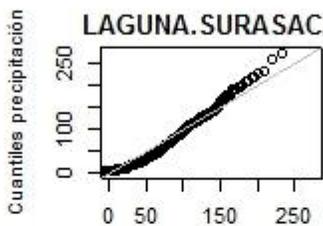
Cuantiles teóricos desde distribución



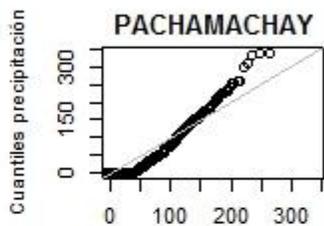
Cuantiles teóricos desde distribución



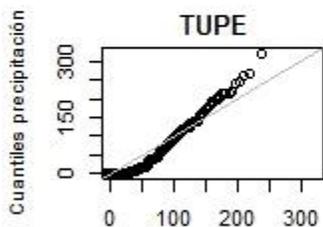
Cuantiles teóricos desde distribución



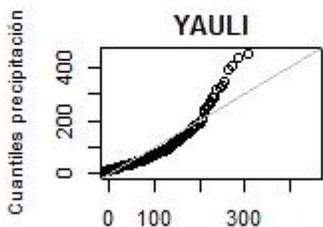
Cuantiles teóricos desde distribución



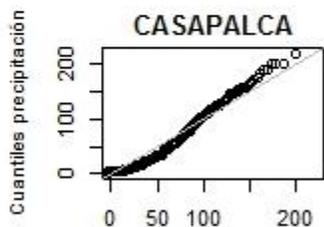
Cuantiles teóricos desde distribución



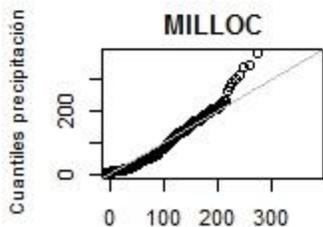
Cuantiles teóricos desde distribución



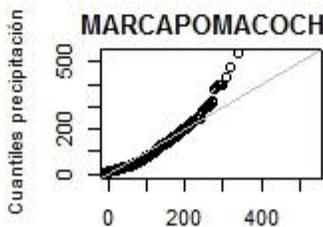
Cuantiles teóricos desde distribución



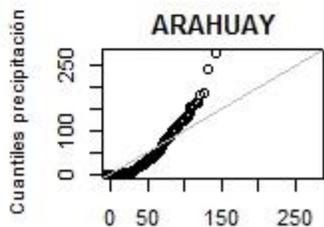
Cuantiles teóricos desde distribución



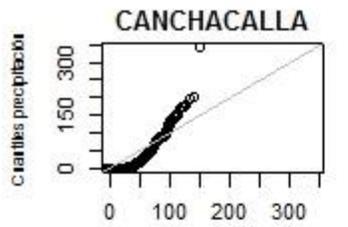
Cuantiles teóricos desde distribución



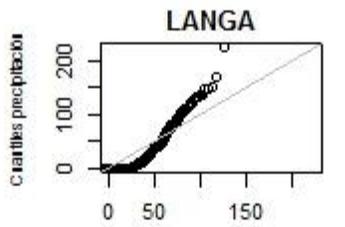
Cuantiles teóricos desde distribución



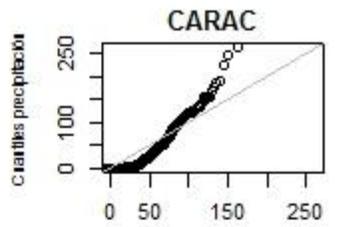
Cuantiles teóricos desde distribución



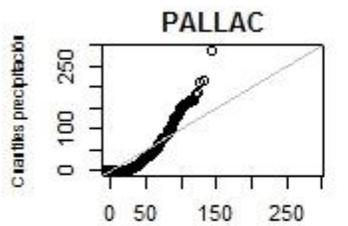
Cuantiles teóricos desde distribución norm



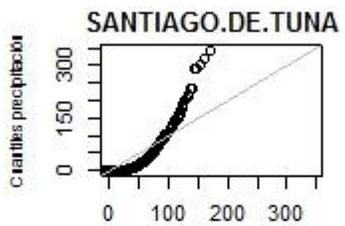
Cuantiles teóricos desde distribución norm



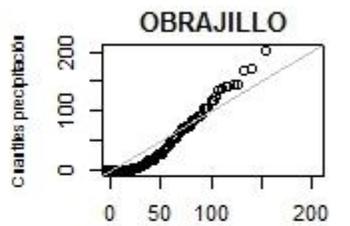
Cuantiles teóricos desde distribución norm



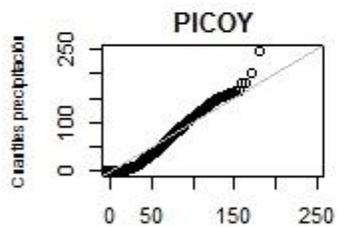
Cuantiles teóricos desde distribución norm



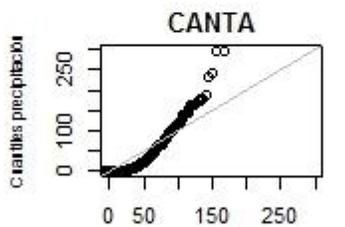
Cuantiles teóricos desde distribución norm



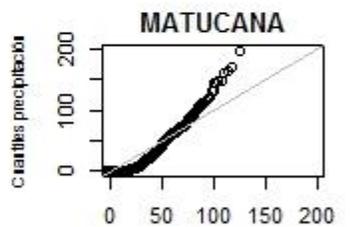
Cuantiles teóricos desde distribución norm



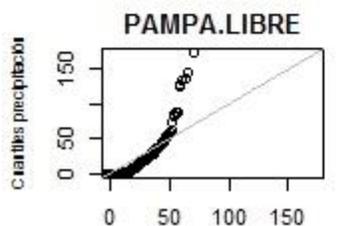
Cuantiles teóricos desde distribución norm



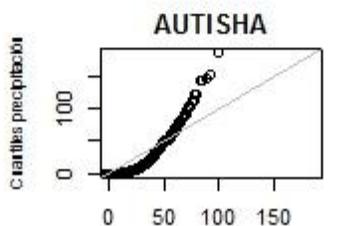
Cuantiles teóricos desde distribución norm



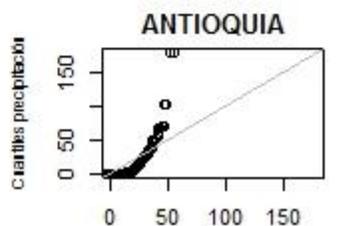
Cuantiles teóricos desde distribución norm



Cuantiles teóricos desde distribución norm



Cuantiles teóricos desde distribución norm



Cuantiles teóricos desde distribución norm

