

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS**



**“CARACTERIZACIÓN DE LAS SEQUÍAS HISTÓRICAS Y
PROYECTADAS BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO
EN LA CUENCA DEL RÍO MANTARO”**

Presentada por:

PEDRO EDWIN GÁLVEZ AYALA

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAGISTER SCIENTIAE EN
RECURSOS HÍDRICOS**

Lima - Perú

2017

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS**

**“CARACTERIZACIÓN DE LAS SEQUÍAS HISTÓRICAS Y
PROYECTADAS BAJO ESCENARIOS DE CLIMÁTICO
EN LA CUENCA DEL RÍO MANTARO”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE
MAGISTER SCIENTIAE**

Presentada por:

PEDRO EDWIN GÁLVEZ AYALA

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Dr. Abel Mejía Marcacuzco
PRESIDENTE

Dr. Waldo S. Lavado Casimiro
PATROCINADOR

Mg. Sc. Ricardo Apaella Nalvarte
CO-PATROCINADOR

Ph.D. Eduardo A. Chávarri Velarde
MIEMBRO

Dr. Néstor Montalvo Arquíñigo
MIEMBRO

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que con su ayuda, han colaborado en la realización de la presente tesis.

Agradezco de forma especial al Dr. Waldo Lavado Casimiro por compartir sus conocimientos invaluable, en la orientación, el seguimiento y la supervisión continua de este trabajo de investigación, más aún por su sapiencia, motivación y sustento recibido a lo largo de este tiempo.

Agradecer al Mg. SC. Ricardo Apacla Nalvarte, por concederme los tiempos valiosos para la orientación, conducción y discusión en los temas de avance al tema de Tesis.

Finalmente quiero agradecer al Mg. SC. Carlos Fernández Palomino, quien estuvo presente en toda la etapa de evolución y desarrollo de mi tesis hasta su culminación, brindando aportes importantes para que esto sea posible.

DEDICATORIA

A Dios, por permitir haber llegado con salud e intelecto hasta esta etapa tan trascendental en mi vida.

A mi esposa Elizabeth y pequeña hija Sunmi – mi familia, por su coraje, fuerza, empuje, perseverancia y confianza hacia mi persona, quiénes han sido fieles testigos de las vallas superadas desde el inicio hasta la culminación de este tema de investigación. Un sincero e infinito agradecimiento a mi familia, por estar a cada momento conmigo.

A mis padres porque siempre han depositado la confianza en mi formación académica y esperado verme con ansias hoy escalar un peldaño profesional en mi vida.

A mi abuelita Mercedes Q.E.P.D., desde arriba sé que me estás viendo y estás orgullosa de mí.

ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Objetivos	3
1.1.1	Objetivo General.....	3
1.1.2	Objetivos Específicos	3
II.	REVISION BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	Sequías	4
2.1.1	Definición de sequías.....	4
2.1.2	Tipos de Sequías	5
a.	Sequía meteorológica o climatológica	6
b.	Sequía edáfica o agrícola	6
c.	Sequía hidrológica	6
d.	Sequía socio económica.....	7
2.1.3	Índices de Sequías.....	7
a.	Índice de Severidad de Sequías de Palmer (PDSI)	8
b.	Índice de Precipitación Estandarizado (IPE)	9
c.	Índice de Reconocimiento de Sequía (RDI).....	10
2.1.4	Caracterización de las sequías	11
a.	Duración.....	11
b.	Intensidad.....	11
c.	Severidad.....	11
d.	Frecuencia	12
2.2	Clima y sistema climático	12
2.2.1	El fenómeno físico del efecto invernadero	13
2.3	Cambio Climático	13
2.3.1	Cambios observados en el sistema climático.....	14
2.3.2	Impulsores del cambio climático	15

2.3.3	Escenarios de cambio climático.....	16
2.3.4	Proyecciones futuras de cambio climático global.....	17
2.4	Cambio climático y sequías	19
2.4.1	Cambios observados en sequías a nivel global.....	19
2.4.2	Cambios proyectados en sequías a nivel global.....	22
2.4.3	Cambios observados en sequías en el Perú.....	24
2.4.4	Cambios proyectados en sequías en el Perú	27
III.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	29
3.1	Descripción del área de estudio	29
3.1.1	Climatología.....	29
3.2	Materiales.....	32
3.2.1	Sistema de información geográfica (SIG)	32
3.2.2	Datos de precipitación observada	32
3.2.3	Datos de precipitación proyectada.....	32
3.2.4	Programas de cómputo.....	35
3.3	Metodología	35
3.3.1	Análisis exploratorio de datos.....	36
3.3.2	Completación de datos faltantes	37
3.3.3	Formación de regiones homogéneas	39
3.3.4	Caracterización de las sequías observadas.....	41
3.3.5	Caracterización de las sequías proyectadas	44
3.3.6	Análisis de tendencia	44
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46
4.1	Análisis exploratorio de datos (AED).....	46
4.2	Completación de datos faltantes.....	47
4.3	Formación de regiones homogéneas	48
4.4	Caracterización de las sequías observadas.....	54

4.4.1	Sequías a corto plazo (IPE-3)	54
4.4.2	Sequías a largo plazo (IPE-12)	57
4.5	Análisis de tendencias de las sequías observadas	60
4.5.1	Tendencias de sequías observadas a corto plazo (IPE-3)	60
4.5.2	Tendencias de sequías observadas a largo plazo (IPE-12)	61
4.6	Caracterización de las sequías proyectadas.....	62
4.6.1	Sequías proyectadas a corto plazo (IPE-3)	63
4.6.2	Sequías proyectadas a largo plazo (IPE-12)	67
V.	CONCLUSIONES.....	72
VI.	RECOMENDACIONES.....	75
VII.	BIBLIOGRAFÍA.....	76
VIII.	ANEXOS	85
8.1	Series de tiempo de precipitación mensual completada para cada estación	85
8.2	Serie de tiempo de precipitación mensual para cada región	88
8.3	Inventario de eventos de sequías para cada región homogénea.....	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Proyección del cambio en la temperatura media global del aire en la superficie y de la elevación media mundial del nivel del mar para mediados y finales del siglo XXI, en relación con el período de referencia 1986-2005. Fuente: IPCC (2013).....	18
Tabla 2.2: Estudios sobre tendencias en las precipitaciones en el Perú.	25
Tabla 3.1: Estaciones pluviométricas con información de precipitación mensual más extensa para el periodo 1970 – 2010. DF es el porcentaje de datos faltantes.....	33
Tabla 3.2: Modelos de Circulación General (GCM) representativos para el Perú.....	34
Tabla 3.3: Clasificación de la intensidad de las sequías en base al IPE. Fuente: World Meteorological Organization (2012)	42
Tabla 4.1: Características de las sequías (IPE-3) para cada región homogénea en la CRM (periodo 1970-2010).....	56
Tabla 4.2: Eventos de sequías (IPE-3) más severas para cada región homogénea en la CRM (periodo 1970-2010).....	56
Tabla 4.3: Probabilidad de ocurrencia de eventos de sequía (IPE-3) de intensidad moderada, severa y extrema para cada región en la CRM (período 1970 – 2010).....	57
Tabla 4.4: Características de las sequías (IPE-12) para cada región homogénea en la CRM (periodo 1970-2010).....	59
Tabla 4.5: Eventos de sequías (IPE-12) más severas para cada región homogénea en la CRM periodo (1970-2010).....	59
Tabla 4.6: Probabilidad de ocurrencia de eventos de sequía (IPE-12) de intensidad moderada, severa y extrema para cada región en la CRM (período 1970 – 2010).....	60
Tabla 4.7: Características de las sequías proyectadas (IPE-3) para cada región homogénea en la CRM (periodo 2030-2070)	65
Tabla 4.8: Probabilidad de ocurrencia de eventos de sequía proyectada (IPE-3) de intensidad moderada, severa y extrema para cada región en la CRM (período 2030 – 2070).....	67

Tabla 4.9: Características de las sequías proyectadas (IPE-12) para cada región homogénea en la CRM (periodo 2030-2070).....	69
Tabla 4.10: Probabilidad de ocurrencia de eventos de sequía proyectada (IPE-12) de intensidad moderada, severa y extrema para cada región en la CRM (período 2030 – 2070).....	71
Tabla 8.1: Inventario de eventos de sequías a corto plazo (IPE-3) para cada región homogénea en el periodo 2070-2010.....	89
Tabla 8.2: Inventario de eventos de sequías a largo plazo (IPE-12) para cada región homogénea en el periodo 2070-2010.....	91

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 2.1:** Vista esquemática de los componentes del sistema climático, sus procesos e interacciones. Fuente: IPCC (2007)..... 13
- Figura 2.2:** Forzamiento radiativo (FR) de cambio climático durante la era industrial (1750 - 2011) debido a los cambios de concentración en el mismo período. Con intervalos de incertidumbre asociados (las barras coloreadas representan el forzamiento radiativo efectivo, las barras rayadas el forzamiento radiativo, y los rombos verdes y las incertidumbres asociadas representan el forzamiento radiativo estimado en el Cuarto Informe de Evaluación (4IE)). Fuente: IPCC (2013)..... 16
- Figura 2.3:** Futuros niveles de forzamiento radiativo para las trayectorias RCP y concentraciones totales de CO₂-equivalente (en ppm) en 2100. Fuente: IPCC (2013)..... 17
- Figura 2.4:** Tendencias del PDSI_{pm} (PDSI con ETP calculada por el método de Penman–Monteith) para el periodo 1950-2008, promedio de cuatro fuentes de datos de precipitación. Fuente: Sheffield et al. (2012). 19
- Figura 2.5:** Arriba: Tendencias del sc_PDSI_{pm} (PDSI auto-calibrado y con ETP calculada por el método de Penman–Monteith) a nivel global; Abajo: Series de tiempo de porcentaje de áreas secas con y sin forzamiento. Fuente: Dai (2012). 20
- Figura 2.6:** Series de tiempo de precipitación promedio (30° S-30° N) con un periodo base de 1981–2000. Utilizando la más reciente versión de la base de datos del CRU TS3.21. Fuente: Trenberth et al. (2014). 21
- Figura 2.7:** Serie de tiempo del promedio global de scPDSI_{pm} anual, calculado utilizando cuatro bases de datos diferentes. Fuente: Trenberth et al. (2014). .. 21
- Figura 2.8:** Cambios futuros en la humedad del suelo (a). Promedio del sc_PDSI_{pm} para 2090-2099 en base a 14 modelos del CMIP5 bajo el escenario RCP4.5 (b). Fuente: Dai (2012). 23
- Figura 2.9:** La proporción de la superficie terrestre en sequía (extrema, severa o moderada) en cada mes. En cada caso se muestran los resultados de las tres simulaciones realizadas con el escenario de emisiones A2. Fuente: Figura 9 de Burke et al. (2006). 24

Figura 3.1: Mapa de ubicación de la cuenca hidrográfica del río Mantaro.....	30
Figura 3.2: Distribución temporal de la precipitación media mensual en CRM (período 1960 – 2002). Fuente: IGP 2005.	30
Figura 3.3: Distribución espacial de la precipitación media anual en CRM (período 1960 – 2002). Fuente: IGP 2005.....	31
Figura 3.4: Distribución espacial de las estaciones pluviométricas con registros de precipitación más extensa en la cuenca de río Mantaro. Los números indican el orden de las estaciones de norte a sur de acuerdo a la Tabla 3.1.....	34
Figura 3.5: Diagrama de flujo de la metodología.....	36
Figura 3.6: Características de las sequías.....	42
Figura 4.1: Gráfico de boxplot de precipitación mensual (periodo 1970-2010) por cada estación pluviométrica.....	46
Figura 4.2: Correlación de precipitación mensual entre pares de estaciones significantes a un nivel de 0.05.....	47
Figura 4.3: Serie de tiempo de precipitación mensual de la estación pluviométrica Tambo de Sol. Datos observados (completados) en barra negra (roja).	48
Figura 4.4: Dendrograma en base al método de Ward. GP es Grupo Preliminar.	49
Figura 4.5: Distribución espacial del agrupamiento preliminar de estaciones en base al método de Ward.....	50
Figura 4.6: Delimitación de regiones homogéneas en base al método del vector regional.	51
Figura 4.7: Resultados de MVR para la región homogénea 1, 2 y 3. DED: desviación estándar de las diferencias entre los índices anuales de las estaciones y el vector regional (VR). CC: coeficiente de correlación entre el VR y las lluvias anuales de las estaciones.....	52
Figura 4.8: Resultados de MVR para la región homogénea 4. DED: desviación estándar de las diferencias entre los índices anuales de las estaciones y el vector regional (VR). CC: coeficiente de correlación entre el VR y las lluvias anuales de las estaciones.....	53
Figura 4.9: Distribución temporal de la precipitación media mensual para cada región homogénea en la CRM (período 1970 – 2010).	53
Figura 4.10: Evolución temporal de IPE-3 para cada región homogénea en CRM (período 1970 – 2010).....	55

Figura 4.11: Diagrama de boxplot de duración, intensidad y severidad de los eventos de sequías (IPE-3) para cada región homogénea en la CRM (período 1970 – 2010).....	57
Figura 4.12: Evolución temporal de IPE-12 para cada región homogénea en CRM (período 1970 – 2010).	58
Figura 4.13: Diagrama de boxplot de duración, intensidad y severidad de los eventos de sequías (IPE-12) para cada región homogénea en la CRM (período 1970 – 2010).....	60
Figura 4.14: Análisis de tendencia de sequías a corto plazo (IPE-3) para las estaciones más lluviosas del año hidrológico (primavera - SON, verano - DEF y otoño - MAM) en cada región homogénea en la CRM (período 2030 – 2070).....	61
Figura 4.15: Análisis de tendencia de sequías a largo plazo (IPE-12) para el año hidrológico (Setiembre-Agosto) en cada región homogénea en la CRM (período 2030 – 2070).	62
Figura 4.16: Distribución espacial de las estaciones pluviométricas con datos proyectados de precipitación para el periodo 2030-2070.	63
Figura 4.17: Arriba (Abajo) se muestra para cada región homogénea en la CRM la función de densidad de probabilidad de IPE-3 histórico y IPE-3 proyectado por cada modelo para el escenario de emisión RCP4.5 (RCP8.5). Histórico (proyectado) corresponde al IPE del periodo base (futuro) de 1970-2010 (2030-2070).	66
Figura 4.18: Diagrama de boxplot de duración, intensidad y severidad de los eventos de sequías proyectadas (IPE-3) para cada región homogénea en la CRM (período 2030 – 2070).....	66
Figura 4.19: Arriba (Abajo) se muestra para cada región homogénea en la CRM la función de densidad de probabilidad de IPE-12 histórico y IPE-12 proyectado por cada modelo para el escenario de emisión RCP4.5 (RCP8.5). Histórico (proyectado) corresponde al IPE del periodo base (futuro) de 1970-2010 (2030-2070).	70
Figura 4.20: Diagrama de boxplot de duración, intensidad y severidad de los eventos de sequías proyectadas (IPE-12) para cada región homogénea en la CRM (período 2030 – 2070).....	70
Figura 8.1: Serie de tiempo de precipitación mensual (periodo 1970-2010) por estación pluviométrica y por región homogénea (región 1 – R1, región2 – R2, región 3 – R3 y región 4 – R4). Datos observados (completados) en línea negra (roja).	85

Figura 8.2: Serie de tiempo de precipitación promedio mensual (periodo 1970-2010) por cada región homogénea. 88

“CARACTERIZACIÓN DE LAS SEQUÍAS HISTÓRICAS Y PROYECTADAS BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL RÍO MANTARO”

RESUMEN

Se espera que las sequías varíen a futuro debido al cambio climático, por lo que en el presente trabajo se caracterizaron los patrones espacio-temporales de las sequías históricas y proyectadas en la Cuenca del Río Mantaro (CRM), ubicada en los Andes Centrales del Perú, ocupando parte de los departamentos de Pasco, Junín, Huancavelica y Ayacucho. Para este fin, se utilizó información observada de precipitación mensual de 37 estaciones con un registro histórico de 1970-2010, así como los datos de precipitación proyectada en base a 6 escenarios de cambio climático (3 GCM x 2 RCP) para estaciones dentro de la CRM para el período 2030-2070. La metodología consideró el uso de métodos estadísticos e índices ampliamente utilizados como el Método del Vector Regional para la formación de regiones homogéneas, el uso del Índice de Precipitación Estandarizada (IPE) para la caracterización de las sequías en términos de la duración, severidad, intensidad y probabilidad de ocurrencia y finalmente el test de Mann Kendall para evaluar las tendencias de las sequías. Los resultados encontrados muestran que la variabilidad interanual de las sequías en la CRM es representada por cuatro regiones homogéneas bien delimitadas. A corto plazo (IPE-3), se identificó un mayor número de eventos de sequía en la región 2 (norte de la CRM). Además, mayor duración, intensidad, severidad y probabilidad de ocurrencia de eventos de sequía extrema en la región 4 (sur de la CRM). A largo plazo (IPE-12), el mayor número de eventos se presentó en la región 1 (noroeste de la CRM), una mayor duración en la región 2, mientras que, de manera similar al comportamiento a corto plazo, las demás características fueron mayores en la región 4. Por otro lado, los escenarios de emisión concuerdan en un incremento en el número de eventos de sequías a corto plazo en las 4 regiones identificadas, con mayor incidencia en la región 3 (suroeste de la CRM), la cual también experimentaría incremento en la intensidad y severidad de las sequías a futuro para el escenario de emisión RCP4.5, a diferencia de las demás regiones que por el contrario experimentarían menor intensidad y severidad de las sequías a futuro. A largo plazo, la mayoría de las regiones evidenciarían un mayor número de eventos de sequía y con mayor duración en la región 2 (RCP4.5) y región 4 (ambos escenarios) y mayor intensidad y severidad, en comparación a las sequías históricas; además de una menor probabilidad de ocurrencia de sequías extremas en todas las regiones. Finalmente, no se encontraron tendencias significativas en la ocurrencia de eventos de sequías a corto plazo, mientras que a largo plazo sólo la región 2 muestra tendencia al incremento en el número de eventos secos.

PALABRAS CLAVES: *Sequías, Cuenca del Río Mantaro, Escenarios de Cambio Climático.*

“CHARACTERIZATION OF HISTORICAL AND PROJECTED DROUGHTS UNDER SCENARIOS OF CLIMATE CHANGE IN THE MANTARO RIVER BASIN”

ABSTRACT

Drought is expected to change in the future due to climate change, so in this study spatiotemporal pattern of historic and projected droughts were characterized for the Mantaro River Basin (MRB), located in the Central Andes of Peruvian, occupying part of the departments of Pasco, Junin, Huancavelica and Ayacucho. For this objective, information of observed monthly precipitation (1970-2010 period) of 37 stations was used as well as the projected monthly precipitation data (2030-2070 period) based on 6 climate change scenarios (3 GCM x 2 RCP) for stations located inside the MRB. The methodology considered the use of widely used statistical methods such as the regional vector method for the formation of homogeneous regions, the use of the Standardized Precipitation Index (IPE) for droughts characterization in terms of duration, severity, intensity and occurrence probability, and finally the Mann Kendall test to evaluate drought trends. The results show that the interannual variability of droughts in the MRB is represented by four well delimited homogeneous regions. In the short term (IPE-3), a greater number of drought events were identified in region 2 (north of the MRB), in addition to a longer duration, intensity, severity and occurrence probability of extreme drought events in region 4 (south of the MRB). In the long term (IPE-12), the greatest number of events occurred in region 1 (north-west of the MRB), a longer duration in region 2, while, similar to short-term behavior, the other characteristics were higher in region 4. On the other hand, the emission scenarios agree on an increase in the number of short-term drought events in the 4 regions identified, with a higher incidence in region 3 (southwest of the MRB), which would also experience an increase in intensity and severity of future droughts for the emission scenario RCP4.5, unlike other regions that would otherwise experience less intensity and severity of future droughts. In the long term, most regions would show a greater number of drought events with longer duration in region 2 (RCP4.5) and region 4 (both scenarios) and greater intensity and severity, compared to historical droughts; in addition to a lower occurrence probability of extreme droughts in all regions. Finally, no significant trends were found in the occurrence of short-term drought events, whereas in the long term only region 2 shows a tendency to increase the number of dry events.

KEYWORDS: *Drought, Mantaro River Basin, Climate Change Scenarios.*

I. INTRODUCCIÓN

Desde tiempos inmemoriales, la sequía ha sido una amenaza para la supervivencia de la humanidad. Con frecuencia ha sido la causa de migraciones masivas, hambrunas, guerras e incluso ha llegado a alterar el curso de la historia misma. Hoy en día, la sequía sigue afectando a la población mundial de diferentes maneras, y se considera como el fenómeno natural que afecta a más personas que cualquier otro desastre natural en el planeta.

Así, la sequía es uno de los desastres naturales que más costos causan y son espacialmente más extendidos (Bryant, 2005), afectando gran variedad de sectores económicos (principalmente la agricultura) (Farhangfar et al., 2015; Hunt et al., 2014). A nivel mundial, el promedio anual de sequías reportadas se ha incrementado más de tres veces desde los años 1970 (Carvajal-Velez, 2008). Asimismo, se prevé que el cambio climático influirá en las principales componentes del ciclo hidrológico, con mayor evapotranspiración y menor precipitación, lo que según algunos autores derivaría en un incremento en la frecuencia y duración de eventos de sequía (Leng et al., 2015); por lo que numerosos estudios han resaltado la necesidad de planes de prevención y mitigación de sequías (Harding et al., 1995).

Estudios recientes han resaltado los efectos ambientales de las sequías en Sudamérica, donde aún en regiones húmedas como la Amazonía, las sequías severas están desencadenando incendios forestales (Brando et al., 2014), reducción de la producción de biomasa (Malhi et al., 2009) y mortalidad de especies forestales (Phillips et al., 2009). Las sequías son particularmente importantes en regiones donde las actividades económicas son altamente dependientes de los recursos hídricos (Vicente-Serrano et al., 2015), como es el caso del Perú.

La principal causa de una sequía es el déficit de precipitación sobre un área, a lo cual se le denomina sequía meteorológica. Este déficit de agua se propaga a través del ciclo

hidrológico y da lugar a otras clases de sequía (Tallaksen and Lanen, 2004); por lo que, el Índice de Precipitación Estandarizado (IPE), basado solo en las precipitaciones, resulta un buen indicador para evaluar las sequías por su buena relación con los impactos hidrológicos, agrícolas y ecológicos (Vicente-Serrano et al., 2012).

Los eventos de sequía tienen múltiples características, las cuales pueden ser definidas en base al IPE: duración, intensidad y severidad (Masud et al., 2015; Mckee et al., 1993; Santos et al., 2011; Shiau, 2006; Xu et al., 2014). Los cambios en cada una de estas características pueden generar impactos en el manejo de los recursos hídricos y la agricultura. En general, las sequías intensas aun con pequeñas o medianas duraciones pueden tener fuertes impactos en la agricultura, mientras sequías de mediana intensidad con largas duraciones pueden tener serios efectos en la provisión de agua (Ge et al., 2016); por ello la importancia de estudiar la distribución espacio temporal de las sequías y conocer sus características.

Los eventos de sequías varían significativamente tanto espacial como temporalmente debido a la variabilidad espacio-temporal del clima. Adicionalmente, la variabilidad interna del clima de la tierra causa variaciones temporales en las sequías, lo cual ha sido vinculado con el cambio climático (Burke et al., 2006; Cook et al., 2015), así, las proyecciones globales presentan indicios de una intensificación de las sequías, incremento en la duración y aumento de las áreas bajo sequías a nivel mundial (Dai, 2012; Trenberth et al., 2014). En ese contexto, conocer la variación espacio-temporal de las sequías en la cuenca del río Mantaro y sus características presentes y futuras serán de utilidad en la evaluación de la vulnerabilidad frente a las sequías a fin de elegir adecuadas estrategias de mitigación de los impactos de las sequías en esta zona del Perú.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Conocer las características espacio-temporales de las sequías históricas y de las sequías proyectadas bajo los escenarios del cambio climático en la cuenca del río Mantaro.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Realizar el análisis exploratorio de datos.
- Caracterizar y regionalizar las series de tiempo de precipitación a escala interanual en la cuenca del río Mantaro.
- Realizar la caracterización espacio-temporal y sus tendencias de las sequías históricas en las regiones homogéneas de la cuenca del río Mantaro.
- Caracterizar las sequías proyectadas bajo escenarios del cambio climático en las regiones homogéneas de la cuenca del río Mantaro.

II. REVISION BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sequías

2.1.1 Definición de sequías

No existe una definición universalmente aceptable de la sequía debido a la compleja naturaleza del fenómeno, encontrando más de 150 definiciones para las sequías, según la disciplina científica desde la que se analiza al fenómeno. Así, algunas de las definiciones incluyen:

De acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (OMM), la sequía 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 (OMM, 2006).

La convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CNULD), define la sequía como un fenómeno natural del clima, causado por el déficit de la precipitación en condiciones considerablemente inferior a los niveles normales registrados, causando un agudo desequilibrio hídrico que perjudica los sistemas de producción del recurso tierra (CNULD, 1994).

El centro de mitigación de sequías de los Estados Unidos considera en términos generales que la sequía se origina de un déficit en las precipitaciones sobre un periodo de tiempo extendido, usualmente una estación o más, resultando en la escasez de agua para alguna actividad, grupo o sector ambiental.

Para el presente trabajo adoptaremos la definición de Tallaksen y Lanen (2004), quienes definen a la sequía como la ocurrencia de disponibilidad de agua por debajo del promedio natural de manera sostenida y a escala regional.

También es importante diferenciar entre definiciones conceptuales y operacionales de sequía (Wilhite and Glantz, 1985). Las definiciones conceptuales se formulan en términos generales para una comprensión global y establecimiento de políticas sobre sequías. Definiciones operacionales de sequía (por ejemplo, Agrícola o hidrológico) definen objetivamente los criterios sobre el inicio y fin de la sequía y severidad para una aplicación específica.

La sequía es un fenómeno natural que se extiende de manera irregular a través del tiempo y el espacio, tiene la particularidad de ser de lento desarrollo temporal y amplia cobertura espacial, su ocurrencia no provoca el colapso ni la falla destructiva de la infraestructura. Sin embargo, puede condicionar las operaciones de los sistemas de recursos hídricos imponiendo muchas veces condiciones más exigentes que las de diseño con graves consecuencias económicas y sociales (Fernández, 1997).

Los impactos de las sequías generalmente se acumulan de forma gradual durante periodos de tiempo extensos, pudiendo durar incluso años después de que el evento haya terminado dificultando la determinación del inicio y el fin del evento. Los impactos de las sequías son de carácter no destructivos y se producen sobre áreas extensas, en comparación con los impactos causados por otros desastres naturales, por lo que es complicado cuantificar sus efectos.

2.1.2 Tipos de Sequías

Las sequías tienen su origen dentro del ciclo hidrológico con una deficiencia de la cantidad de precipitación, el cual provoca de forma directa una disminución de la presencia de agua en todos los estados del ciclo hidrológico (Bras, 1990). A esta deficiencia de la precipitación puede sumarse factores como una alta temperatura, presencia de fuertes vientos, una baja humedad relativa con una alta radiación solar, características del suelo y cobertura vegetal. Todo ello tiene en común el aumento de la evaporación y la transpiración que acentúa la disminución de la presencia de agua en la superficie terrestre y en el proceso del ciclo hidrológico. Así, Wilhite and Glantz (1985) agruparon diversas definiciones de sequías, en cuatro grupos según la disciplina científica desde la cual se analiza el fenómeno: sequía meteorológica, agrícola, hidrológica y socioeconómica. La secuencia se inicia con la sequía meteorológica y una condición seca persistente puede

inducir a sequías agrícolas, hidrológicas y de recursos hídricos (Andreadis et al., 2005; Vidal and Wade, 2009).

a. Sequía meteorológica o climatológica

Relacionada con la disminución de las precipitaciones, siendo evaluada mediante la comparación entre la precipitación del periodo de análisis y un indicador estadístico de la serie temporal que generalmente es la media. Existen diversas definiciones de la sequía meteorológica que han sido desarrolladas para regiones específicas, debido a que las variaciones en los regímenes de precipitación tienen una fuerte influencia de las características climáticas de cada región.

b. Sequía edáfica o agrícola

Se expresa en función a la deficiencia de humedad en el suelo disponible para las plantas, en muchos casos es valorada de acuerdo a los daños provocados sobre la producción agrícola. Debido a que la cantidad de agua es diferente para cada cultivo, y varía a lo largo de las fases de crecimiento de los cultivos, es complejo definir umbrales de sequía incluso para una misma región. Este tipo de sequía no solo depende de las condiciones meteorológicas, sino también de las características biológicas del cultivo y las propiedades del suelo. Por lo que no es equivalente a la sequía meteorológica. Si los niveles de humedad del suelo son suficientes para sustentar el crecimiento de un determinado cultivo durante el periodo que se presente la sequía meteorológica, la sequía agrícola no se producirá.

c. Sequía hidrológica

Se asocia a la deficiencia en el caudal o volumen de aguas superficiales y subterráneas, así como el volumen de almacenamiento. Las sequías hidrológicas tienen un desfase entre la ocurrencia de las sequía meteorológica o agrícola, puesto que se requiere de un desfase temporal para que se propaguen las anomalías pluviométricas a los diversos componentes del ciclo hidrológico.

A diferencia de la sequía agrícola que tiene lugar al poco tiempo de presentarse la sequía meteorológica, la sequía hidrológica puede tardar de meses a años dependiendo de

la región desde el inicio de la sequía meteorológica; y si las lluvias retornan en poco tiempo, la sequía hidrológica no llegará a manifestarse.

La capacidad de gestión de los recursos hídricos influye sobre la sequía hidrológica, debido a que el déficit no solo depende de la disponibilidad del recurso hídrico superficial o subterráneo, sino también de la forma de uso del agua.

d. Sequía socio económica

Se produce cuando la disponibilidad de agua disminuye hasta el punto de generar daños económicos o sociales sobre poblaciones de zonas afectadas por la escasez de precipitaciones.

2.1.3 Índices de Sequías

Un índice de sequía proporciona un cuadro completo para el análisis de la sequía y la toma de decisiones que es más fácil de usar en comparación con los datos brutos de los indicadores (Hayes, 2006). Se han desarrollado más de 150 índices de sequía (Niemeyer, 2008) y recientemente se han propuesto índices adicionales (Vasiliades et al., 2011; Vicente-Serrano et al., 2010).

Operacionalmente, el uso de un índice para la caracterización de la sequía sirve para los propósitos siguientes:

- Detección de sequías y monitoreo en tiempo real (Niemeyer, 2008)
- Declaración del comienzo y final de un período de sequía (Tsakiris et al., 2007)
- Permitir a los gestores de sequía declarar los niveles de sequía y proponer medidas de respuesta a la sequía.
- Evaluación de la sequía (Niemeyer, 2008)
- Representar el concepto de sequía en una región (Tsakiris et al., 2007)
- Correlación con impactos cuantitativos de sequía sobre escalas variables de geografía y tiempo; y
- Facilitar la comunicación de las condiciones de sequía entre las diversas entidades interesadas.

A nivel global, los dos índices más frecuentemente utilizados son: el Índice de Severidad de Sequías de Palmer (PDSI por sus siglas en inglés; Palmer, 1965) y el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI por sus siglas en inglés; Mckee et al., 1993), que para la presente investigación se empleará como IPE (en español). Sin embargo, un índice más reciente denominado como Índice de Reconocimiento de Sequía o Reconnaissance Drought Index en inglés (RDI por sus siglas en inglés; Tsakiris and Vangelis, 2005) es actualmente aplicado en numerosos estudios. Por ello, a continuación detallaremos las características de estos 3 principales índices, incluyendo las ventajas y desventajas de su aplicación.

a. Índice de Severidad de Sequías de Palmer (PDSI)

Palmer (1965) introdujo por primera vez el Índice de Severidad de Sequías de Palmer (PDSI) en los Estados Unidos. El objetivo del PDSI era proporcionar mediciones de las condiciones de humedad que fueron estandarizadas para que las comparaciones utilizando los valores del índice tuvieran un significado comparable en todos los lugares y tiempos (Palmer, 1965).

El PDSI responde a condiciones climáticas anormalmente secas o anormalmente húmedas. El PDSI se calcula sobre la base de los datos de precipitación y temperatura, así como del contenido de agua disponible del suelo. A partir de los parámetros de entrada anteriores, se pueden determinar todos los términos básicos de la ecuación del balance hídrico, incluyendo evapotranspiración, recarga del suelo, escorrentía y pérdida de humedad de la capa superficial (Hayes, 2006).

A pesar de su uso generalizado, el PDSI tiene muchas limitaciones (Hayes, 2006). Sus limitaciones incluyen los supuestos arbitrarios relacionados con los modelos de balance hídrico utilizados en el cálculo del PDSI. Por ejemplo, no existe un método universalmente aceptado para calcular la evapotranspiración potencial. Aunque la técnica de Thornthwaite (1948) tiene amplia aceptación, pero todavía se considera una aproximación. Además, el método del PDSI es más adecuado para la caracterización de sequías agrícolas, ya que el modelo se centra en la humedad del suelo. Los valores del PDSI no son comparables entre diversas regiones climatológicas (Wells et al., 2004).

b. Índice de Precipitación Estandarizado (IPE)

El IPE, recomendado por Guttman (1999), es uno de los índices de sequías meteorológicas más conocidos y ampliamente utilizados. El IPE fue creado por Mckee et al. (1993) en la Universidad del Estado de Colorado para cuantificar el déficit de precipitación para múltiples escalas de tiempo (1, 3, 6, 12, 24 y 48 meses en valores acumulados móviles).

El IPE se ajusta a una distribución normal, por lo que puede ser usado para monitorear tanto los periodos húmedos como los periodos secos (Tsakiris et al., 2007). El IPE ha sido extensamente utilizado porque puede ser calculado para una variedad de escalas temporales de manera relativamente sencilla. Esta versatilidad le permite al IPE ser usado indistintamente para monitorear las provisiones de agua a corto plazo, como es el caso de la humedad del suelo, la cual es importante para la producción agrícola y los recursos hídricos a largo plazo, tales como el agua subterránea, el caudal y los niveles de lagos y reservorios (Mckee et al., 1993).

Adicionalmente, el IPE requiere sólo de datos de precipitación, los cuales son usualmente disponibles en la mayoría de países. Este índice puede ser también aplicado consistentemente en diferentes jurisdicciones puesto que la metodología ha incorporado la estandarización del propio índice. Además, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) recomienda el uso del IPE para determinar las sequías meteorológicas y para complementar los índices de sequías meteorológicas locales (Hayes et al., 2011).

Por las razones mencionadas anteriormente, a pesar de ser un índice reciente, el IPE ha sido usado en diferentes partes del mundo, en Turquía (Komuscu, 1999; Sönmez et al., 2005), Canadá (Anctil et al., 2002), España (Lana et al., 2001), Corea (Min et al., 2003), Hungría (Domonkos, 2003), China (Wu et al., 2001), Europa (Lloyd-Hughes and Saunders, 2002; Paulo and Pereira, 2007; Vicente-Serrano et al., 2014), Sur de África (Rouault and Richard, 2003), Taiwán (Shiau, 2006), Irán (Raziei et al., 2009), Grecia (Nalbantis and Tsakiris, 2009), incluyendo países de Sudamérica como Argentina (Seiler et al., 2002), Ecuador (Vicente-Serrano et al., 2016), Bolivia (Vicente-Serrano et al., 2015), Colombia (Zuluaga-López, 2009); ya sea para el monitoreo en tiempo real o el análisis retrospectivo de las sequías.

En el presente estudio utilizamos el IPE para el análisis de las sequías en la Cuenca del Mantaro, principalmente por las siguientes razones: este índice tiene un requerimiento mínimo de datos (sólo precipitación) y requiere un mínimo de esfuerzo computacional, además de ser un índice comparable con otras cuencas del Perú.

c. Índice de Reconocimiento de Sequía (RDI)

Tsakiris and Vangelis (2005) observaron que debido a que las sequías meteorológicas se manifiestan como un déficit hídrico, el enfoque puede estar en el balance hídrico (entrada - precipitación y salida - evapotranspiración potencial). Con base en esto, se propuso un nuevo índice de caracterización de la sequía, conocido como Índice de Reconocimiento de Sequía (RDI). El RDI se basa en la relación entre la precipitación y la evapotranspiración potencial.

Algunas de las ventajas del índice RDI son: este índice se puede calcular para cualquier periodo de tiempo (1, 2, 3 meses, etc.), este índice puede ser asociado eficazmente con la sequía y es sensible a los eventos de sequías (Tsakiris et al., 2007). Una de las limitaciones de este índice es que es calculado empezando al inicio de cada año para todas las escalas de tiempo. Para escalas de tiempo más pequeñas, el RDI no puede identificar todos los eventos de sequía que podrían ocurrir durante todo el año (por ejemplo. Escalas de 3 y 6 meses).

Se pueden obtener resultados muy significativos si el período de análisis coincide con la época de crecimiento de los principales cultivos en la zona de estudio u otros períodos relacionados con etapas sensibles de crecimiento de los cultivos. Entonces, el RDI puede asociarse con éxito a la pérdida esperada en la producción de cultivos de secano, que a su vez está vinculada al peligro previsto en el sector agrícola debido a la ocurrencia de la sequía (Tsakiris et al., 2007).

En la práctica, el RDI se comporta de manera similar al IPE, por lo que la interpretación de los resultados y los umbrales para determinar la magnitud de las sequías son similares para ambos casos.

2.1.4 Caracterización de las sequías

La sequía es generalmente analizada utilizando series de tiempo de diferentes variables y escalas de tiempo que puede variar desde meses a años (Mishra and Singh, 2011) en base a un enfoque de umbral. Para el análisis de las características de las sequías en base al IPE se identificaron los eventos de sequía como los periodos de tiempo consecutivos con valores del IPE que se sitúan por debajo de un cierto nivel de umbral. El nivel de umbral considerado por la OMM para definir sequías es de -1 (OMM, 2012), equivalente al 25% de la probabilidad acumulada basado en el ajuste a una distribución normal estándar del IPE.

El nivel del umbral permite además caracterizar un evento de sequía en base a sus propiedades de duración, intensidad, severidad y frecuencia (probabilidad de ocurrencia) que se definen a continuación:

a. Duración

La duración de un evento de sequía, se define como el periodo consecutivo e ininterrumpido de meses que dura un evento de sequía, registrado en un periodo de tiempo relativamente largo. Dependiendo de la región, la duración de la sequía puede variar entre una semana y algunos años. Debido a la naturaleza dinámica de la sequía, una región puede experimentar temporadas húmedas y secas simultáneamente al considerar varias escalas temporales.

b. Intensidad

Es un parámetro muy usual que se utiliza en la caracterización de sequías, algunos autores la calculan como la magnitud entre la duración de la sequía y corresponde entonces a la intensidad promedio, en otros casos se define como el máximo valor del déficit ocurrido durante el evento de sequía, conocido como intensidad máxima.

c. Severidad

Este término hace referencia al déficit acumulado de agua (precipitación) por debajo de cierto umbral durante un periodo de sequía; el cual se cuantifica mediante la acumulación de la sucesión negativa de los déficits de precipitación en un evento de sequía.

d. Frecuencia

Es la probabilidad de ocurrencia de sequía o de una determinada intensidad de sequía (Moderada, Severa o Extrema) en un periodo de tiempo.

2.2 Clima y sistema climático

En el sentido más amplio, el clima es el estado medio de los componentes del sistema climático: la atmósfera, la hidrósfera, la criósfera, la litósfera y la biósfera y las interacciones entre éstos (Figura 2.1). El clima depende de tres factores fundamentales: (1) Entrada de radiación solar; (2) Composición atmosférica (gases y aerosoles); y (3) Características de la superficie (albedo, rugosidad, evapotranspiración potencial, sedimentos, etc.). Cuando estos factores varían, ya sea a través de procesos naturales o humanos, producen un calentamiento o enfriamiento del planeta, porque alteran la proporción de energía solar que se absorbe o se devuelve al espacio. Bajo este enfoque sistémico, podemos decir que el clima de la Tierra se desarrolla bajo la influencia de su propia dinámica interna y debido a forzamientos externos, tales como erupciones volcánicas, las variaciones solares, y forzamientos humanos, como el cambio de la composición de la atmósfera y el cambio del uso de la tierra.

El componente más importante del sistema climático es sin duda la atmósfera (capa gaseosa que rodea al planeta), pues esta determina el presupuesto energético que define el clima global, por lo que resulta importante conocer su composición y estructura (GCCIP, 1997). La atmósfera está compuesta aproximadamente por un 79% de nitrógeno, 20% de oxígeno y 1% de otros gases.

Dentro del 1% de los “otros gases”, la atmósfera contiene diferentes proporciones de los mismos, y entre ellos se encuentran los Gases de Efecto Invernadero (GEI). Los principales GEI son: vapor de agua (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O), metano (CH_4) y el ozono (O_3).

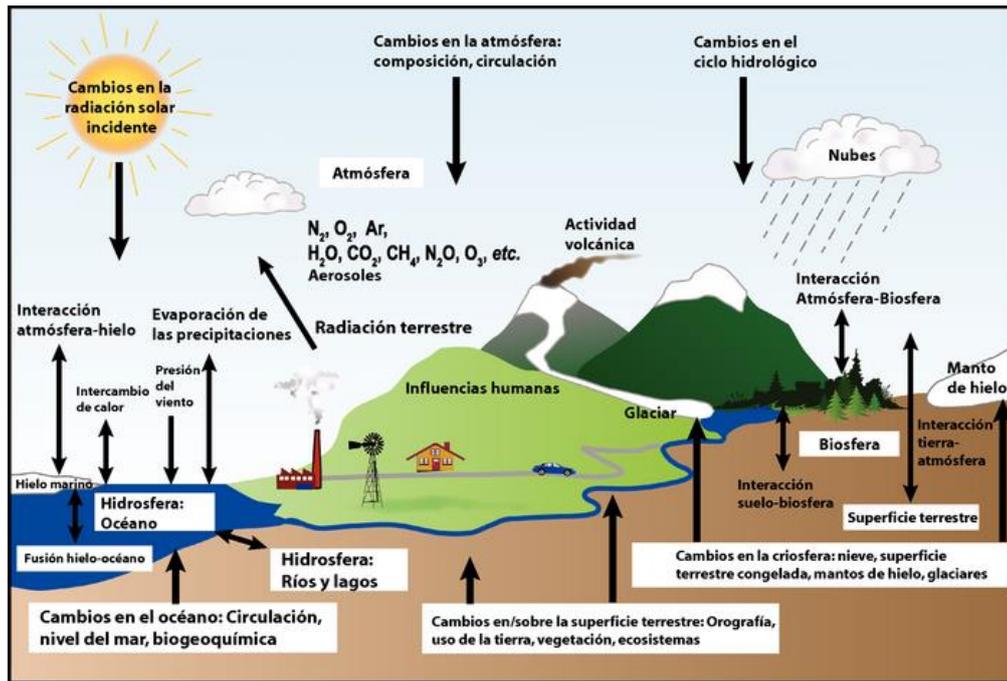


Figura 2.1: Vista esquemática de los componentes del sistema climático, sus procesos e interacciones. Fuente: IPCC (2007).

2.2.1 El fenómeno físico del efecto invernadero

Los GEI absorben y emiten radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación infrarroja emitido por la superficie de la Tierra, la atmósfera y las nubes (IPCC, 2007). Es decir, las radiaciones infrarrojas son absorbidas y re-emitidas en todas las direcciones por las moléculas de los GEI. El efecto provocado es el calentamiento de la atmósfera de la Tierra y las capas inferiores de la atmósfera, fenómeno natural conocido como “efecto invernadero”, el cual condiciona rangos térmicos confortables que hacen posible la vida en nuestro planeta. Siendo el efecto invernadero un fenómeno natural y vital. Sin el efecto invernadero, la Tierra sería una roca fría en el espacio, y sería muy difícil pensar en la vida en el planeta tal como la conocemos.

2.3 Cambio Climático

El cambio climático se refiere a cualquier cambio significativo en las medidas del clima (tales como temperatura, precipitación o viento, etc.) que duran por un período prolongado de 3 décadas o más. De acuerdo al Panel Intergubernamental en Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) el cambio climático se define como la variación del estado del clima en su valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que

persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos (IPCC, 2013).

El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o a forzamientos externos tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas o cambios antropogénicos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso del suelo (IPCC, 2013).

2.3.1 Cambios observados en el sistema climático

De acuerdo al Quinto Informe de Evaluación (AR5 por sus siglas en inglés) del IPCC (IPCC, 2013), las evidencias observadas muestran que el cambio climático se manifiesta en aumentos de la temperatura atmosférica y oceánica, disminución de los volúmenes de nieve y hielo, incremento del nivel del mar, cambios en los patrones de precipitaciones y modificaciones de los eventos climáticos extremos. Así, se tiene:

- Aumento lineal de la temperatura media global (promedio de la temperatura de la superficie terrestre y oceánica) de 0.85 °C [0.65 °C a 1.06 °C] durante el período 1850-2012. Siendo las tres últimas décadas (1983-2012) los más cálidos en los últimos años.
- Disminución de la masa de los mantos de hielo de Groenlandia y la Antártida, un retroceso en los glaciares y una reducción muy importante del hielo del Ártico.
- Aumento del nivel medio del mar de 0.19 metros [0.17 a 0.21] entre 1901 y 2010. Siendo acelerado la tasa de aumento del nivel del mar en los dos últimos siglos. Así, el nivel global medio del mar ha aumentado 1,7 mm/año en el periodo 1901-2010 y 3,2 mm/año entre 1993 y 2010.
- Probable aumento del número de las precipitaciones severas a partir de 1950 en más regiones que las que ha disminuido.
- Persiste un nivel de confianza bajo sobre la tendencia global de las sequías y la actividad ciclónica aunque con diferencias entre regiones. Por ejemplo, es muy probable que la frecuencia e intensidad de los ciclones tropicales más severos en el Atlántico norte se haya incrementado desde 1970.

2.3.2 Impulsores del cambio climático

El cambio climático es el resultado de desequilibrios en el balance energético de la Tierra, que son causados por procesos y agentes naturales y antropogénicos. Estos desequilibrios son cuantificados por el Forzamiento Radiativo (FR) y el Forzamiento Radiativo Efectivo (FRE). El primero es una medida de la variación neta del balance energético del sistema Tierra en respuesta a determinadas perturbaciones externas. El segundo son los posibles ajustes rápidos a las perturbaciones. Ambas se expresan en watt por metro cuadrado (W/m^2). Cuando FR o FRE es positivo (negativo) conduce a un calentamiento (enfriamiento). Para los forzamientos de los gases de efecto invernadero, los valores de FR y FRE son muy similares y mientras tanto para los aerosoles antropogénicos son muy diferentes.

De acuerdo a AR5 (Figura 2.2); el FR antropogénico total para el año 2011 con respecto al año 1750 es $2.29 W/m^2$; el cual ha conducido a una ganancia neta de energía por parte del sistema climático. Además, el FR antropogénico total para el año 2011 fue 43% superior al previsto en el Cuarto Informe de Evaluación para el año 2005. Este incremento es debido a una combinación del crecimiento continuado en la mayoría de las concentraciones de gases de efecto invernadero. Sobre la base de los cambios en las concentraciones, los factores que más contribuyen de manera positiva al FR son todos los gases de efecto invernadero homogéneamente mezclados como el CO_2 , CH_4 , N_2O y Halocarbonos (con una concentración de $2.83 W/m^2$ para el 2011). Donde, el factor que contribuye en mayor medida al FR es el incremento en la concentración atmosférica de CO_2 ($1.82 W/m^2$) ocurrido a partir de 1750. Por otro lado, los factores que contribuyen de manera negativa al FR son las emisiones de los aerosoles y sus interacciones con las nubes y la radiación; sin embargo sus estimaciones presentan mayor incertidumbre.

Finalmente, de acuerdo a la Figura 2.2, en comparación a los factores antropogénicos se tiene que el FR natural (dados por la irradiancia solar y la actividad volcánica) presenta una contribución muy baja al FR neto durante la era industrial.

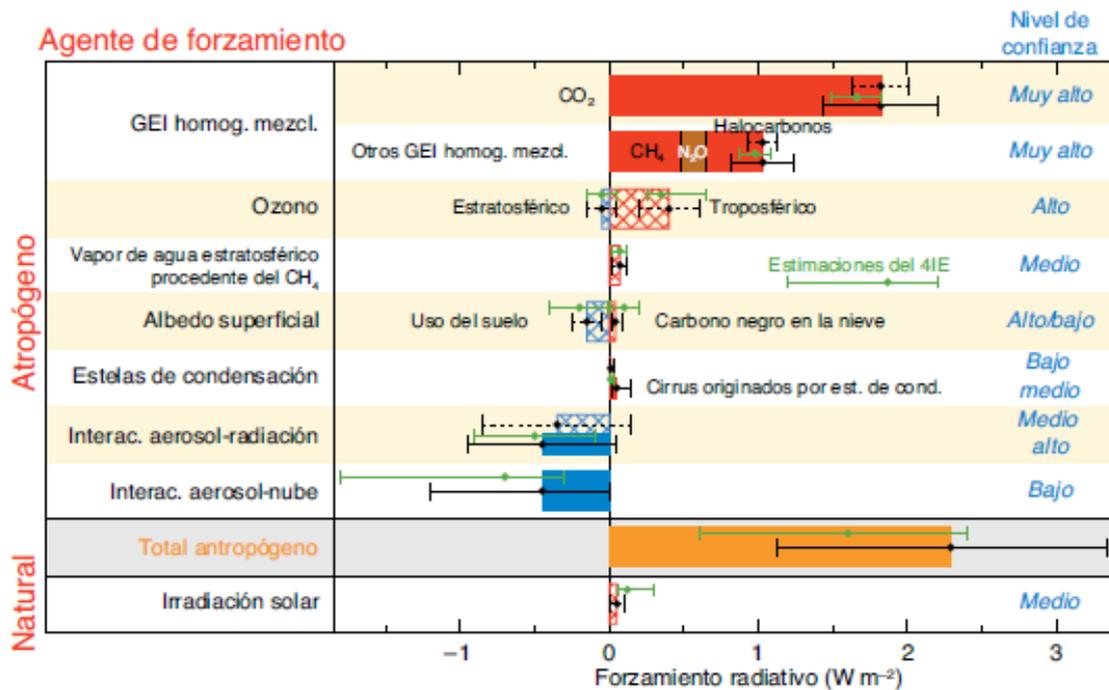


Figura 2.2: Forzamiento radiativo (FR) de cambio climático durante la era industrial (1750 - 2011) debido a los cambios de concentración en el mismo período. Con intervalos de incertidumbre asociados (las barras coloreadas representan el forzamiento radiativo efectivo, las barras rayadas el forzamiento radiativo, y los rombos verdes y las incertidumbres asociadas representan el forzamiento radiativo estimado en el Cuarto Informe de Evaluación (4IE)). Fuente: IPCC (2013).

2.3.3 Escenarios de cambio climático

Las proyecciones de los cambios del sistema climático se realizan utilizando una jerarquía de modelos climáticos. Así, se tienen los Modelos de Circulación General (GCM por sus siglas en inglés). Los GCM son representaciones matemáticas de procesos importantes en el sistema climático de la Tierra. Buscan representar procesos físicos en la atmósfera, en los océanos, en la criósfera y en la superficie terrestre y son la herramienta disponible más avanzada que actualmente se tiene para simular la respuesta futura del sistema climático global a los aumentos en los GEI (IPCC, 2013).

Los GCM simulan cambios basados en un conjunto de escenarios de forzamientos antropógenos y en el marco de la quinta fase del Proyecto de comparación de modelos acoplados (CMIP5) del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas se utilizó un nuevo conjunto de escenarios, denominados Trayectorias de Concentración

Representativas (RCP por sus siglas en inglés) para realizar las nuevas simulaciones de modelos climáticos. Los RCP describen cuatro trayectorias distintas en el siglo XXI de las emisiones y las concentraciones atmosféricas de GEI, las emisiones de contaminantes atmosféricos y el uso del suelo. Los RCP se identifican por su FR total para el año 2100 que varía desde 2.6 a 8.5 W/m² (Figura 2.3). Así, se tiene un escenario de mitigación estricto denominado RCP2.6 (FR = 2.6 W/m², 421 ppm de CO₂-eq en 2100), dos escenarios intermedios como el RCP4.5 (FR = 4.5 W/m², 538 ppm de CO₂-eq en 2100) y RCP6.0 (FR = 6.0 W/m², 670 ppm de CO₂-eq en 2100) y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de GEI denominado RCP8.5 (FR = 8.5 W/m², 936 ppm de CO₂-eq en 2100). Los RCP permiten simular una amplia gama de resultados climáticos en base a una serie de diferentes suposiciones socioeconómicas, tecnológicas y biofísicas. Sin embargo, no pueden ser interpretados como políticas climáticas.

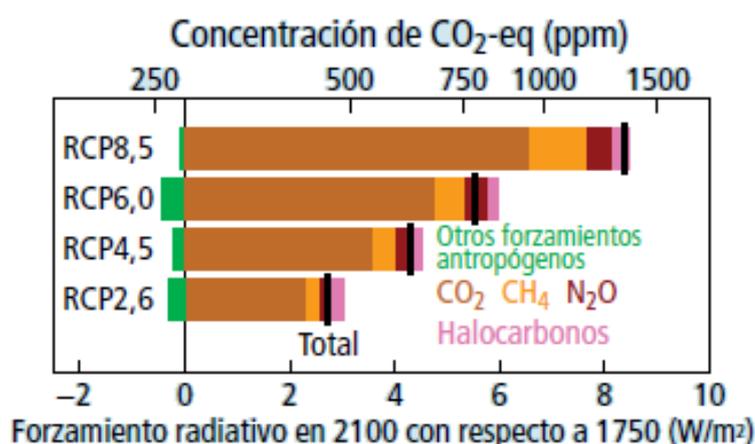


Figura 2.3: Futuros niveles de forzamiento radiativo para las trayectorias RCP y concentraciones totales de CO₂-equivalente (en ppm) en 2100. Fuente: IPCC (2013).

En CMIP5 se ha utilizado un gran número de GCM en base a los escenarios RCP; cuyos resultados constituyen el elemento fundamental de las proyecciones del sistema climático.

2.3.4 Proyecciones futuras de cambio climático global

Las proyecciones climáticas sugieren:

- Aumento de temperatura promedio entre 1 °C y 2 °C (1 °C y 3.7 °C) en el periodo 2046 - 2065 (2081 – 2100) en referencia a la temperatura observada en el periodo 1986-2005 (Tabla 2.1).

- Aumento en el nivel medio del mar entre 24 cm y 30 cm (40 cm y 63 cm) para mediados del siglo XXI (finales del siglo XXI).
- La cubierta de hielo Ártico y la extensión de los glaciares seguirán disminuyendo (IPCC, 2013).
- Probable modificación de los patrones de eventos climáticos extremos pero persiste la incertidumbre sobre su evolución y además existe un nivel bajo de confianza en proyecciones regionales específicas sobre este punto.

Para América del Sur se observa desde 1960 un aumento de temperatura de 0.1 °C por década y una disminución de días fríos y aumento de días calurosos. Por otro lado, las proyecciones climáticas sugieren con un nivel de confianza medio un aumento de temperatura de 1.6 °C y 4 °C en referencia al periodo 1986 – 2005 y existe además confianza media de que los eventos climáticos extremos se modifiquen y se presenten mayores temperaturas por regiones. Respecto a los cambios de precipitación, las señales de las proyecciones son heterogéneas y localizadas con un nivel de confianza bajo. Así, por ejemplo una reducción de 22% para el Noreste de Brasil y un incremento de 25% en la zona sudeste de América del Sur (IPCC, 2013).

Tabla 2.1: Proyección del cambio en la temperatura media global del aire en la superficie y de la elevación media mundial del nivel del mar para mediados y finales del siglo XXI, en relación con el período de referencia 1986-2005. Fuente: IPCC (2013).

	2046 - 2065			2081 - 2100	
	Escenario	Media	Rango probable ^c	Media	Rango probable
Cambio en la temperatura media global del aire en superficie (en °C)	RCP2.6	1	0.4 - 1.6	1	0.3 - 1.7
	RCP4.5	1.4	0.9 - 2.0	1.8	1.1 - 2.6
	RCP6.0	1.3	0.8 - 1.8	2.2	1.4 - 3.1
	RCP8.5	2	1.4 - 2.6	3.7	2.6 - 4.8
Elevación media mundial del nivel del mar (en metros)	RCP2.6	0.24	0.17 - 0.32	0.4	0.26 - 0.55
	RCP4.5	0.26	0.19 - 0.33	0.47	0.32 - 0.63
	RCP6.0	0.25	0.18 - 0.32	0.48	0.33 - 0.63
	RCP8.5	0.3	0.22 - 0.38	0.63	0.45 - 0.82

2.4 Cambio climático y sequías

2.4.1 Cambios observados en sequías a nivel global

Esta sección presenta una breve revisión de los cambios históricos en sequías globales. A pesar de que los resultados de tendencias de sequías a largo plazo son complejos y no existe patrones emergentes y coherentes de sequía (IPCC, 2013); se ha notado variaciones espacio temporales de sequía a escala regional (Easterling et al., 2000). Durante los últimos 500 – 1000 años, América del Norte, Oeste de África (Shanahan et al., 2009), y el Este de Asia han experimentado periodos secos por varios años hasta múltiples décadas (Dai, 2011).

Las áreas muy secas a nivel global han disminuido en 7% en el periodo 1950 – 1972, pero estos han aumentado en el orden de 12 – 30% desde la década de 1970, particularmente a inicios de 1980 con disminución de la precipitación inducida por El Niño Oscilación del Sur (ENOS) y calentamiento global (Dai, 2011; Dai et al., 2004).

En relación a la variabilidad espacio-temporal de las sequías a nivel global, se encontraron dos estudios que reportaron diferentes tendencias. Así, Sheffield et al. (2012) encontraron pequeños cambios en la sequía global (1950-2008), y que los aumentos previamente informados fueron sobreestimados (Fig. 2.4). Mientras que Dai (2012) reportó tendencia significativa al incremento de las sequías en determinadas regiones del globo, además de un incremento del porcentaje de áreas con sequías a nivel global (Fig. 2.5).

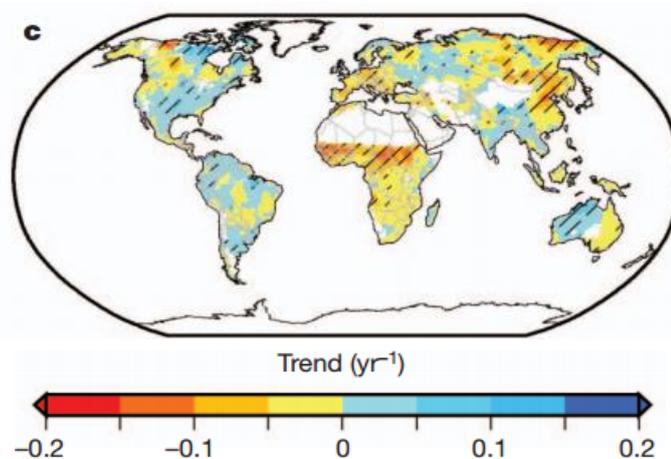


Figura 2.4: Tendencias del PDSI_{pm} (PDSI con ETP calculada por el método de Penman–Monteith) para el periodo 1950-2008, promedio de cuatro fuentes de datos de precipitación. Fuente: Sheffield et al. (2012).

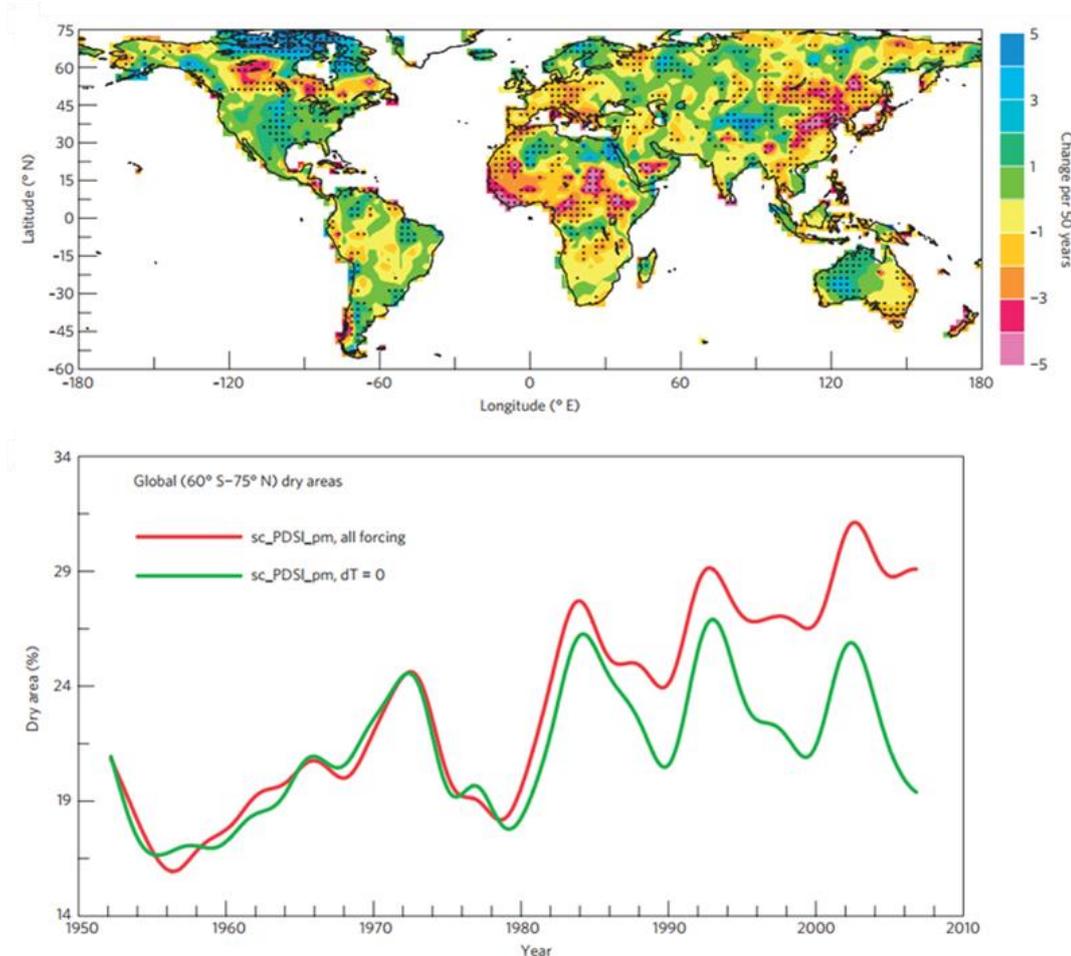


Figura 2.5: Arriba: Tendencias del sc_PDSI_pm (PDSI auto-calibrado y con ETP calculada por el método de Penman–Monteith) a nivel global; Abajo: Series de tiempo de porcentaje de áreas secas con y sin forzamiento. Fuente: Dai (2012).

Las diferencias encontradas en los estudios anteriores, según lo analizado por Trenberth et al. (2014) se debe principalmente a la base de datos utilizado por cada estudio y al método de estimación de la evapotranspiración potencial (ETP) durante el cálculo del índice PDSI, de lo que se concluye que la base de datos a utilizar tiene vital relevancia en el análisis de las sequías. De este modo, utilizando una base de datos de precipitación más actual que las bases de datos utilizadas en los estudios mencionados anteriormente (Climate Research Unit -CRU TS3.21, Global Precipitation Climatology Centre-GPCCv6 y el Global Precipitation Climatology Project-GPCP), se obtuvo la variabilidad temporal de la precipitación para la zona 30°S-30°N para el periodo 1950-2010, evidenciándose ciertas discrepancias entre las bases de datos a partir de los años 90 debido a la menor disponibilidad de datos observados de estaciones para todas las bases de datos (Fig. 2.6).

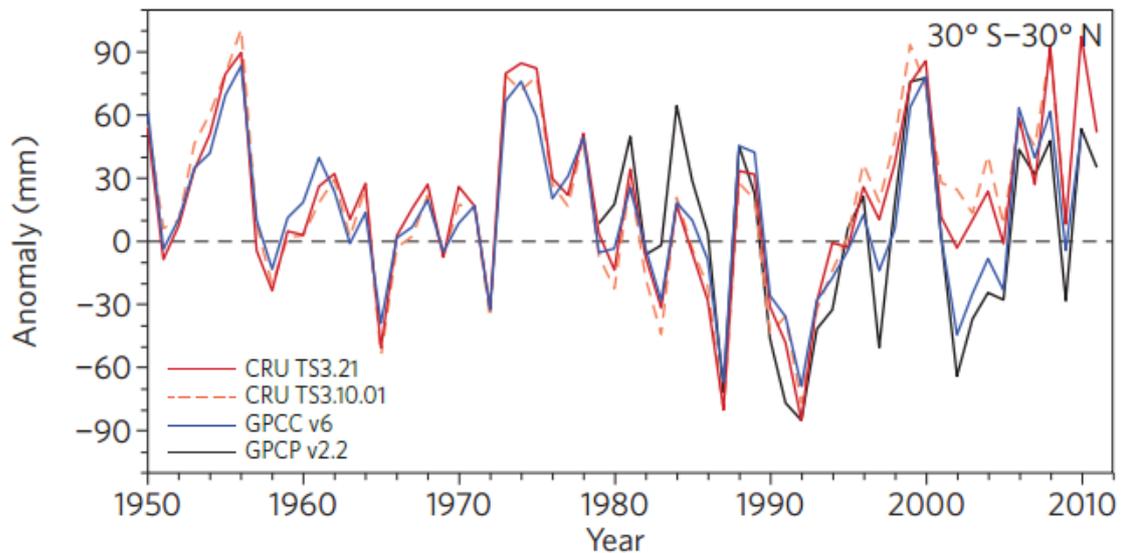


Figura 2.6: Series de tiempo de precipitación promedio (30° S- 30° N) con un periodo base de 1981–2000. Utilizando la más reciente versión de la base de datos del CRU TS3.21. Fuente: Trenberth et al. (2014).

Asimismo, el scPDSI_{pm} estimado con esta última base de datos muestra que todas las bases de datos excepto la del CRU TS3.10.01 muestran una tendencia a la sequía estadísticamente significativa (Fig. 2.7). Teniendo en cuenta que los datos de precipitación CPC + GPCP fueron utilizados por Dai (2012) y que Sheffield et al. (2012) utilizaron versiones anteriores de los cuatro conjuntos de datos de precipitación, se explica las diferencias encontradas por ambos autores.

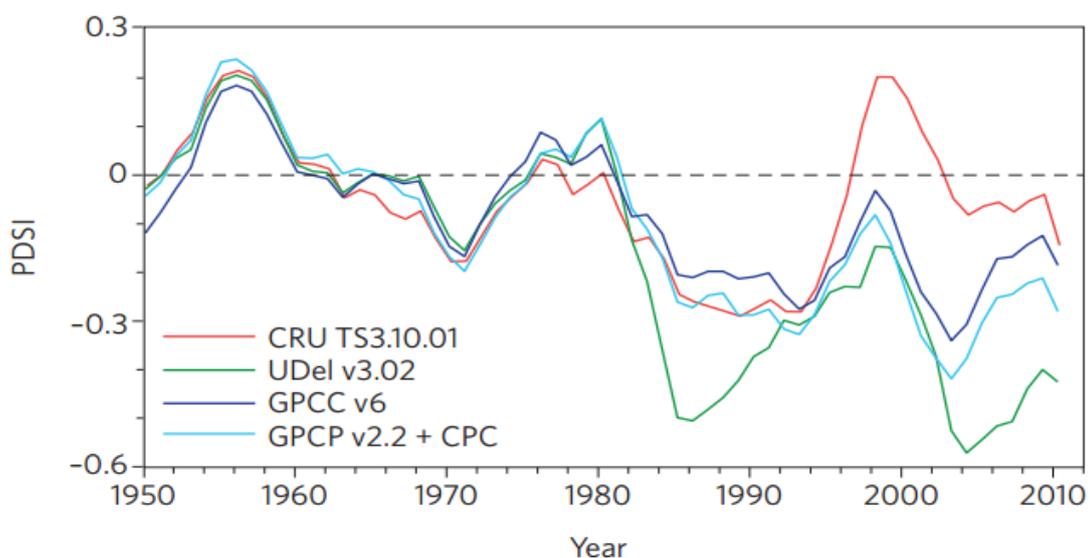


Figura 2.7: Serie de tiempo del promedio global de scPDSI_{pm} anual, calculado utilizando cuatro bases de datos diferentes. Fuente: Trenberth et al. (2014).

2.4.2 Cambios proyectados en sequías a nivel global

En un escenario de cambio climático, existe la fuerte expectativa de un aumento general de la ETP, que está directamente relacionado con el aumento del calentamiento de la superficie. Esto probablemente dará lugar a un aumento de la evaporación o evapotranspiración real en las plantas, sólo si la humedad adecuada está disponible. Así, potencialmente hay más sequedad, pero en situaciones de sequía parte de la energía extra va a incrementar la temperatura, lo que amplifica el calentamiento de la tierra seca. Esto además asume que las otras cosas siguen siendo iguales, lo cual no es así. Entre 1900 hasta la actualidad, otras variaciones (incluyendo el cambio de humedad natural y velocidad del viento) han sido importantes debido a la aparente tendencia a la sequedad (Trenberth et al., 2014).

Sin embargo, las proyecciones de modelos climáticos sugieren que el proceso de aridez se produciría en muchas zonas en las latitudes bajas y medias bajo una creciente concentración de gases de efecto invernadero (GEI) (Dai, 2012). Más específicamente, existe una fuerte tendencia a que las zonas húmedas se hagan más húmedas y las secas más secas, con una expansión hacia los polos de la zona subtropical seca (Seager et al., 2010).

Para estudiar la forma en que la sequía podría cambiar bajo el aumento de los Gases de Efecto Invernadero (GEI), Dai (2012) analizó las simulaciones de modelos climáticos acoplados en escenarios de emisiones de GEI intermedias para la fase 5 del proyecto (CMIP5), encontrando que la mayoría (más del 82%) de los 14 modelos CMIP5 analizados muestran una disminución del contenido de humedad del suelo en la capa superior de 10 cm durante el siglo XXI en la mayoría de América, Europa, África Meridional, el Medio Oriente, el Sudeste de Asia y Australia. La sequedad de la humedad del suelo es reproducido en gran parte por el `sc_PDSI_pm`, aunque este sugiere aumentos más grandes en humedad sobre el Asia Central y Oriental y al Norte de Norteamérica. Asimismo, se aprecia la disminución en el contenido de humedad del suelo en casi la totalidad de la cuenca amazónica, incluyendo la Amazonía peruana, además de condiciones de sequía severas a extremas en esta misma zona para finales del siglo XXI (Figura 2.8 a y b).

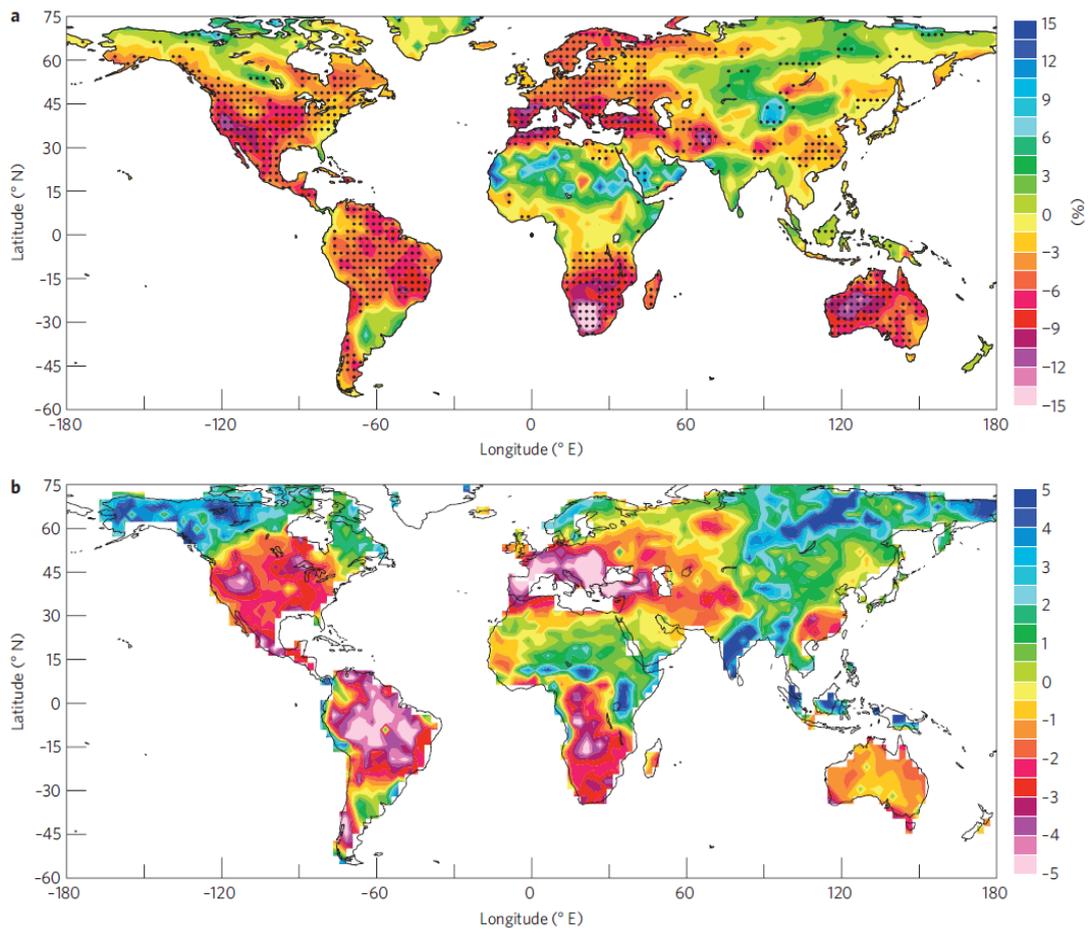


Figura 2.8: Cambios futuros en la humedad del suelo (a). Promedio del sc_PDSI_pm para 2090-2099 en base a 14 modelos del CMIP5 bajo el escenario RCP4.5 (b). Fuente: Dai (2012).

A pesar de las considerables variaciones regionales, los estudios generalmente sugieren que se proyecta una tendencia neta global a la sequía durante el siglo XXI. Así, en base a los escenarios planteados por el IPCC en el 2000, se estimó que a lo largo del siglo XXI, la frecuencia de días secos aumenta según los escenarios de emisiones A2 y A1B, pero varía poco según B1 (Tebaldi et al., 2006). El área de superficie terrestre en sequía extrema aumenta del 1-30% (actual) al 30-50% (en 2100) en el escenario A2, con eventos ligeramente menos frecuentes pero mucho más largos (Burke et al., 2006, como se muestra en la Figura 2.9).

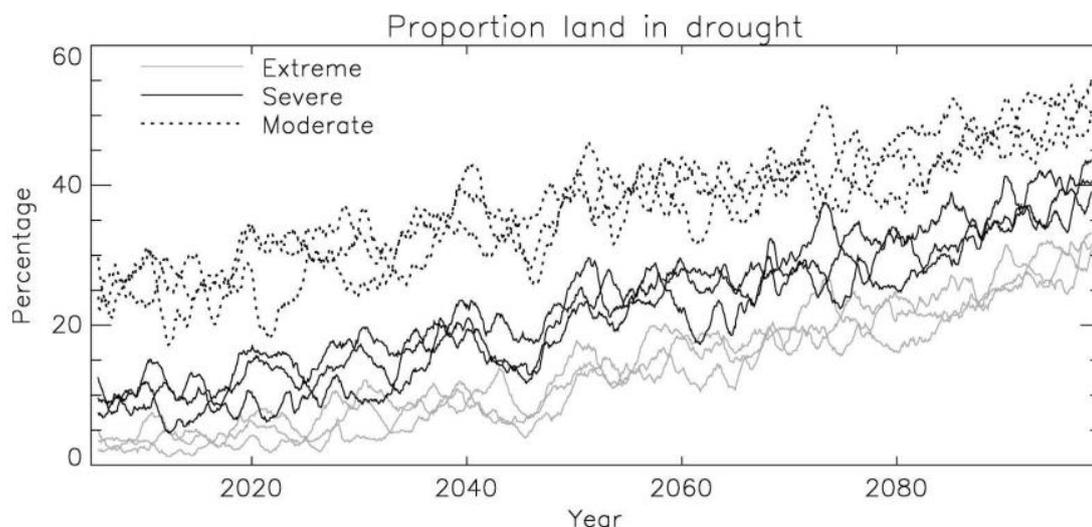


Figura 2.9: La proporción de la superficie terrestre en sequía (extrema, severa o moderada) en cada mes. En cada caso se muestran los resultados de las tres simulaciones realizadas con el escenario de emisiones A2. Fuente: Figura 9 de Burke et al. (2006).

Para Sudamérica, los escenarios climáticos futuros producidos por downscaling (reducción de escala) regional sugieren una disminución de la precipitación en la región tropical, con un aumento en las áreas subtropicales (Sánchez et al., 2015). Asimismo, en relación con los extremos, los escenarios de cambio climático sugieren un aumento en los períodos de sequía, con noches cálidas más frecuentes (Marengo et al., 2009).

2.4.3 Cambios observados en sequías en el Perú

De acuerdo al informe Perú hacia la IDMP (“Integrated Drought Management Programme”) en el año 2013 (<http://www.droughtmanagement.info/literature/UNW-DPC-NDMP-Country-Report-Peru-2013.pdf>), gran parte del Perú está expuesto a sequías periódicas, incluyendo regiones importantes de la costa y sierra, cuya intensidad estaría asociada a la ocurrencia de eventos como el Fenómeno El Niño.

Entre 2000 y 2010 se reportaron a nivel nacional 163 eventos de sequías, siendo mayor en la vertiente del Pacífico (con 127 eventos), seguidos por la vertiente del Titicaca (25 eventos) y la vertiente del Atlántico (11 eventos). La mayor cantidad de eventos reportados corresponden a los ocurridos entre el año 2000 al 2008 y el año 2010 con 73 y 62 eventos respectivamente.

Siendo la precipitación la principal forzante de la sequía y debido a las pocas investigaciones sobre los cambios observados en las sequías a nivel del Perú, en la Tabla 2.2 presentamos un resumen de los estudios relacionados a las tendencias en las precipitaciones. De esta tabla se desprende que, las tendencias diferenciadas (aumento y reducción) de las precipitaciones no permiten hacer conclusiones sobre alguna tendencia sistemática (IGP, 2005a; Marengo et al., 2011; SENAMHI, 2012a). Sin embargo, las tendencias observadas muestran aumentos sistemáticos de las lluvias en la vertiente occidental de la sierra, así como reducciones en parte de la vertiente oriental de la sierra sur y central.

Tabla 2.2: Estudios sobre tendencias en las precipitaciones en el Perú.

Fuente: Marengo et al. (2011).

Región	Periodo	Variable	Tendencia
Cuenca del Piura (Andes noroccidentales)	1963-2003	Precipitación	Verano, otoño: +9 a 14 mm/año Invierno: -0.5 mm/año Primavera: +0.2 a 0.5 mm/año
Cuenca del Santa (Andes occidentales Centrales)	1965-2006	Precipitación	Anual: 20-30% incremento en los últimos 40 años
Cuenca del Mantaro (Andes centrales orientales)	1965-2010	Precipitación	Anual: -3 a -51 mm/década Verano: -3 a -29 mm/década Invierno: -1 a -6 mm/década
Arequipa (Andes del Sur)	1964-2006	Precipitación	-2 a +1.5 mm/década
Parte media-alta de la Cuenca del Urubamba (Andes sur Oriental)	1965-2010	Precipitación	Anual: +2 a +20 mm/década Verano: +9 a +18 mm/década Invierno: +1 a +2 mm/década
Cuenca del Mayo (Andes nororiental)	1965-2006	Precipitación	Anual: -20 a +20% Verano : -10 a 40% Invierno : -10 a -40%
Parte norte de la región Apurímac (Andes centrales occidentales)	1965-2009	Precipitación	Anual: +36.3 a +63.2 mm/década Verano: +32.7 a +44.7 mm/década Invierno: +1.0 a +1.5 mm/década

Asimismo, otras investigaciones en el Perú, enfocadas en cuencas amazónicas, muestran que las precipitaciones no evidencian tendencias estadísticamente significativas (Lavado Casimiro et al., 2013). Sin embargo, estudios de caracterización climática en las regiones de Cusco y Apurímac demuestran que durante el periodo de lluvias (octubre a marzo) ambas regiones vienen presentando tendencias positivas estadísticamente significativas, es decir, aumento de lluvias, sugiriendo una menor probabilidad de ocurrencia de sequías (SENAMHI, 2012b).

Por otro lado, el Perú está expuesto a los impactos de El Niño Oscilación del Sur (ENOS), que afecta a la agricultura, pesca, ecosistemas y a la infraestructura social y económica. El mayor evento del ENOS durante 1997-1998 registró pérdidas de más de 3,500 millones de dólares, de los cuales el 80% se corresponden a los daños por inundaciones en el Norte del Perú y el 20% a las sequías en la sierra sur. Asimismo, las sequías más intensas ocurridas en el periodo 1965-2006 se presentaron en la fase positiva del ENOS como 1965-66, 1982-83 y 1991-92.

Hasta el momento se conoce que los eventos de sequías en el Perú tienen diferentes orígenes y pueden generar diferentes tipos de impacto dependiendo de la región. La región amazónica es la más estudiada en cuanto a sequías se refiere, en esta región las sequías afectan principalmente a los ecosistemas y a la economía por la dificultad del transporte fluvial; y las investigaciones revelan que, durante el evento del ENOS de 1997-1998 hubo un déficit de precipitaciones en la cuenca amazónica durante Junio-Diciembre (Bell et al., 1999), la precipitación y la escorrentía muestran una reducción particularmente desde la mitad de 1980 (Lavado Casimiro et al., 2012). Las sequías en esta región están asociadas a anomalías positivas en la temperatura superficial del mar en el Atlántico Tropical norte y débil transporte de vientos y humedad hacia la parte alta del Amazonas, que en asociación con el incremento de subsidencia sobre la Amazonía central y sur explica la reducción de precipitación (Espinoza et al., 2011).

En la región Altoandina, son muy escasas las investigaciones que hayan estudiado las sequías en comparación con la región amazónica y la mayoría de estos estudios están enfocados en pequeñas regiones. Así, se tiene la caracterización de las sequías en algunas cuencas del norte del pacífico utilizando el IPE para evaluar los eventos secos (Acuña et al., 2011). Por otro lado, existen evidencias de la influencia del ENOS en las sequías en el

sur del Perú (Kane, 2000, 1999), además de que las temperaturas cálidas de la superficie del mar en el Atlántico tropical norte tienden a producir sequías en las cuencas del sur de los Andes (Lavado Casimiro et al., 2012).

En la región Costera del Perú, se ha estudiado la precipitación y escorrentía (Lavado Casimiro et al., 2012), evidenciándose cambios solamente en los caudales mínimos debido a la fuerte actividad antrópica en estas zonas y mas no así en la precipitación.

En la cuenca del Mantaro se han realizado algunos estudios sobre las sequías y la vulnerabilidad climática de la cuenca, en los cuales se analizaron las sequías en base al IPE para el periodo 1970-2004, habiéndose identificado a los años 1991 y 1992, como los años más secos en la cuenca, asimismo, el mismo estudio identificó una relación negativa significativa entre las variaciones de la temperatura superficial del mar (TSM) en el Pacífico ecuatorial central (Niño 3.4 y Niño 4) y las precipitaciones en la zona central y sur de la cuenca del Mantaro (IGP, 2005b). Por otro lado, también se encontraron buenas correlaciones entre la Radiación de Onda Larga Saliente (OLR) en la el Pacífico ecuatorial central (Niño 3.4 y Niño 4) y las precipitaciones en la cuenca del Mantaro (IGP, 2005b). Además, algunos estudios reportaron una disminución de la frecuencia de períodos húmedos a partir de los años noventa en la cuenca del río Mantaro, la frecuencia de periodos húmedos ha disminuido en gran parte de la cuenca, y a partir del año 2003 no se han presentado años lluviosos. Asimismo, en la parte norte de la cuenca (zonas de Cerro de Pasco y Marcapomacocha), la deficiencia de lluvias es cada vez más frecuente, teniendo impactos en las reservas de agua dulce.

2.4.4 Cambios proyectados en sequías en el Perú

De la Tercera Comunicación Nacional del Perú (MINAM, 2016), si bien no existe una descripción específica sobre las proyecciones de sequías se han rescatado las proyecciones en precipitaciones a nivel del Perú que se resume a continuación:

Los escenarios futuros, basados en el CMIP5 a la hora de proyectar las precipitaciones comparando el período 2036-2065 respecto a 1971-2000 encuentran variaciones en los promedios de precipitación. Así, los resultados obtenidos muestran una alta variabilidad

espacial, con cambios de aumento/disminución en estaciones cercanas, excepto en la parte noroeste del país, donde la señal hacia condiciones más húmedas es clara.

También, se describe a escala de algunos departamentos y cuencas, las proyecciones en precipitación pero hemos rescatado las proyecciones para la cuenca del Mantaro que es nuestro ámbito de estudio. Así, hacia el 2030 habría una reducción de hasta de -30 % en la precipitación de la cuenca del río Mantaro, principalmente en su franja occidental. En el verano, las precipitaciones estarían dentro de su variabilidad +/-15 %, salvo Ayacucho (Mantaro). En otoño, habría un exceso de +15 % y +30 %, excepto en Marcapomacocha, Huayao, Pilchaca y Lircay (ubicadas en la cuenca del Mantaro). Durante la primavera, habría tanto reducciones como aumentos, de entre +/-15 %.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Descripción del área de estudio

La zona de estudio corresponde a la Cuenca del Río Mantaro (CRM) el cual se muestra en la Figura 3.1. La CRM está ubicada en los Andes centrales del Perú, entre los paralelos 10°34'30'' y 13°35'30'' de latitud Sur, y entre los meridianos 73°55'00'' y 76°40'30'' de longitud Oeste. La CRM limita por: el norte con las cuencas del río Huaura e Intercuenca Alto Huallaga, este (Perené, Anapetí, Intercuenca Bajo Pampas), sur (San Juan, Pisco y Pampas) y Oeste (Chancay-Huaral, Chillón, Rímac, Mala y Cañete). Política y administrativamente la zona de estudio abarca parcialmente las regiones de Junín, Pasco, Huancavelica y Ayacucho. La CRM presenta una superficie de drenaje de 34 550 km² y drena sus aguas hacia la vertiente del océano Atlántico (río Amazonas) a través del río Mantaro el cual se origina en el Lago Junín (4080 m.s.n.m.) y recorre 735 kilómetros hasta su confluencia con el río Apurímac (480 m.s.n.m.) donde dan origen al río Ene.

La precipitación es una de las variables climatológicas más importantes en la CRM, debido a su gran importancia para las actividades socioeconómicas, como la agricultura, la generación de energía eléctrica, el suministro de agua potable, etc.

3.1.1 Climatología

De acuerdo al Atlas climático de precipitación y temperatura del aire en la Cuenca del Río Mantaro (IGP, 2005b), en la CRM existe una marcada estacionalidad en la distribución temporal de la contribución de las precipitaciones (Figura 3.2), con máximos (mínimos) valores entre enero y marzo (junio y julio). El 83% de la precipitación anual tiene lugar entre los meses de octubre a abril. La principal estación lluviosa ocurre durante el verano austral (diciembre a marzo) y está asociado al ingreso hacia la cuenca de los vientos del este de nivel medio (600 hPa) y superior (200 hPa); los cuales arrastran aire húmedo desde la cuenca amazónica y alimentan las tormentas convectivas sobre los Andes centrales (Falvey and Garreaud, 2005; Garreaud, 1999). Mientras, la estación seca es asociada con los vientos del oeste (IGP, 2005b).

La distribución espacial de precipitaciones no es homogénea en la cuenca (Figura 3.3). A lo largo de los Andes, las partes altas de la cuenca (extremo norte y sur occidental) presentan los valores máximos de precipitación (1 000 mm/año). Mientras, la zona centro-sur de la cuenca (entre Pampas y Huanta) experimentan las tasas de precipitación anual más baja (550 mm/año).

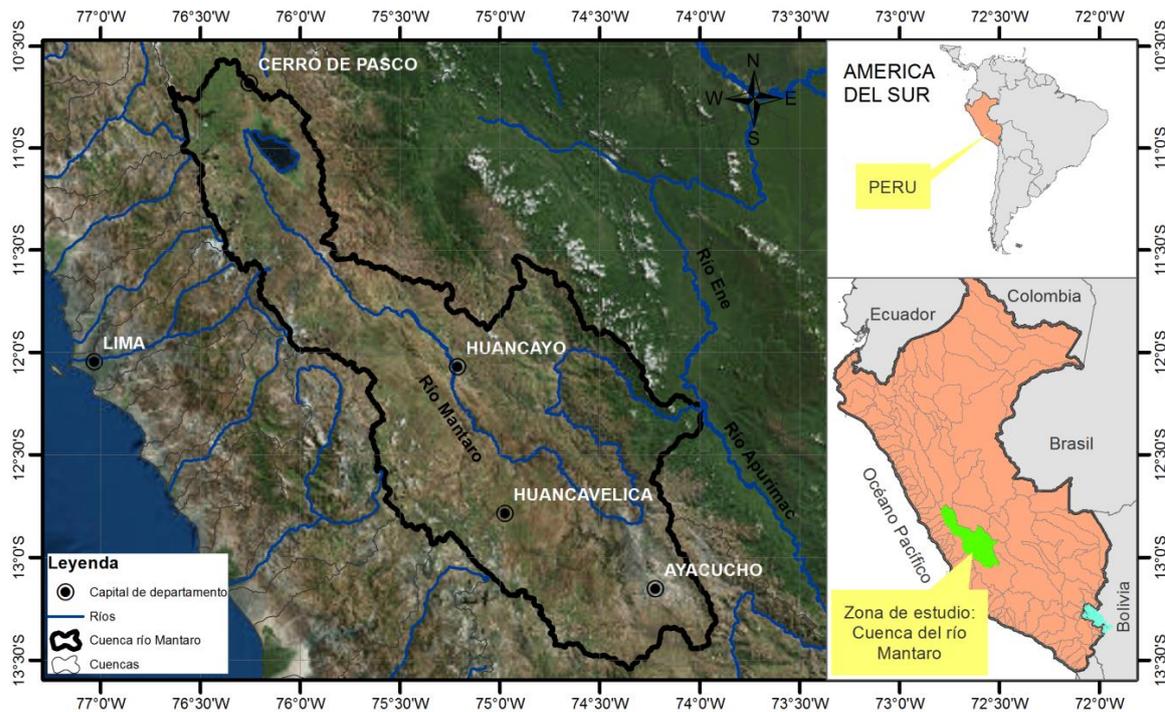


Figura 3.1: Mapa de ubicación de la cuenca hidrográfica del río Mantaro.

Fuente: Elaboración propia.

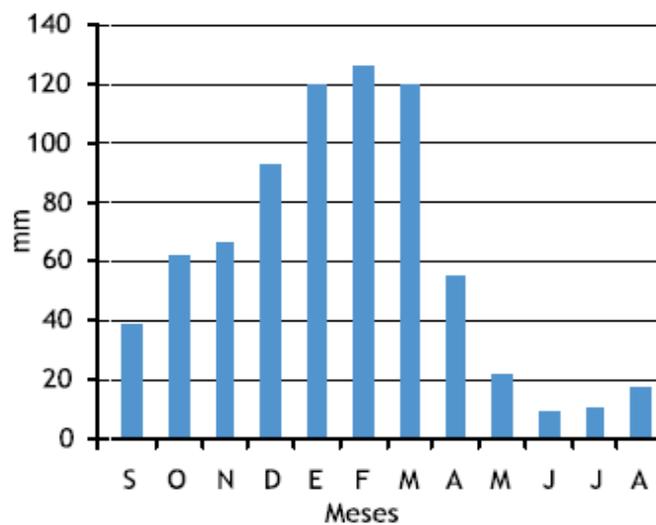


Figura 3.2: Distribución temporal de la precipitación media mensual en CRM (período 1960 – 2002). Fuente: IGP 2005.

Por otro lado, en la parte amazónica de la cuenca (sur este, salida de la cuenca) se experimentan las contribuciones más altas de precipitación (1 600 mm/año).

Con respecto a la temperatura media del aire, los valores mínimos (máximos) se presentan en el mes de julio (noviembre). Especialmente a lo largo de los Andes, en las zonas altas de la cuenca (extremo occidental) se presenta valores alrededor de 4 °C, en el valle del Mantaro (8 – 10 °C) y en el sector centro-sur de la cuenca (12 – 16 °C). Mientras tanto, hacia la desembocadura del río Mantaro (región oriental) éstas llegan a 24 °C.

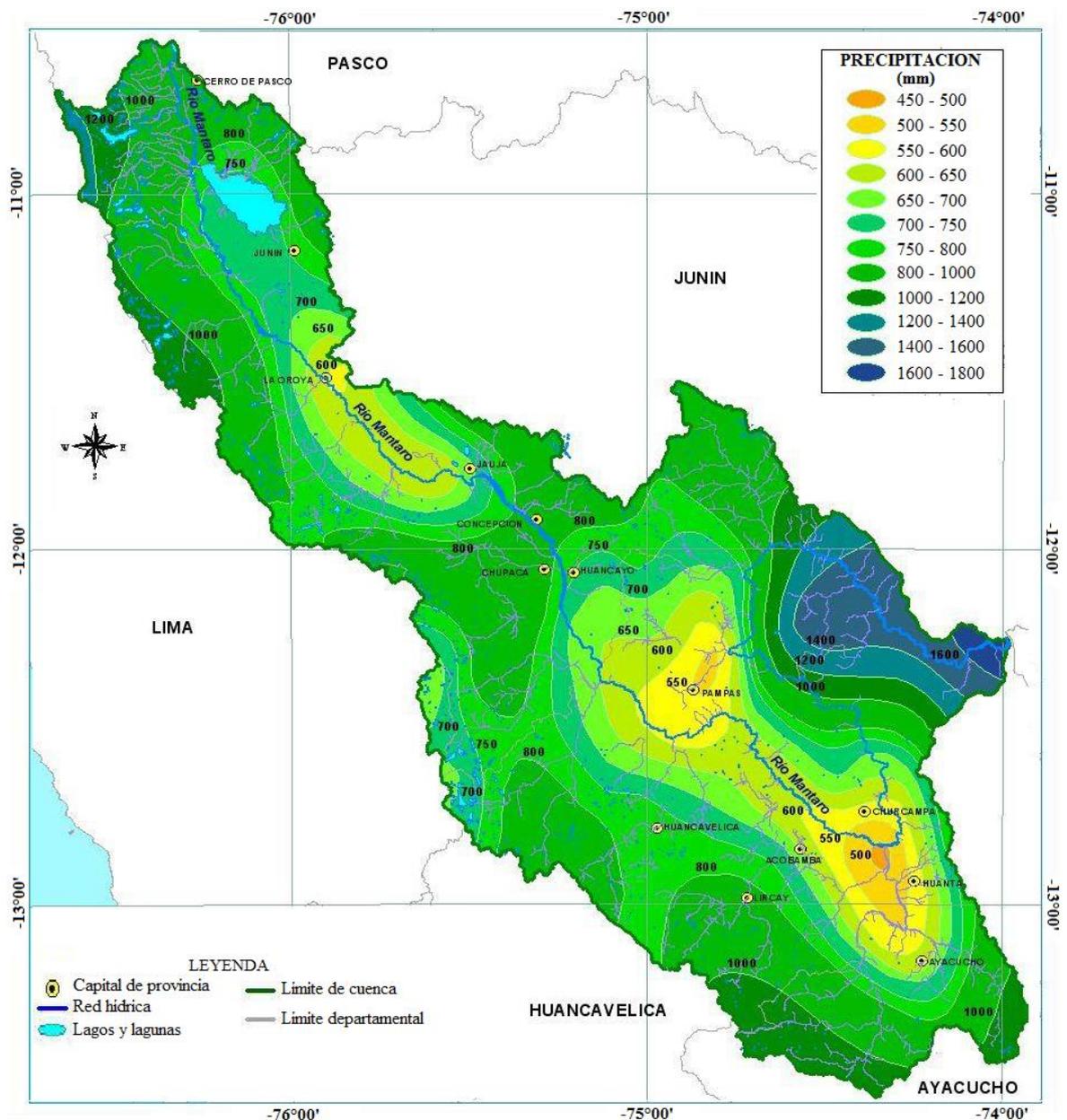


Figura 3.3: Distribución espacial de la precipitación media anual en CRM (período 1960 – 2002). Fuente: IGP 2005.

3.2 Materiales

En el desarrollo de esta investigación, ha de emplearse las siguientes informaciones:

3.2.1 Sistema de información geográfica (SIG)

Para identificar el área de influencia de la zona de estudio se ha recopilado la información de sistemas hidrográficos del Perú en formatos de SIG, para ello se recurrió al banco de datos de la Autoridad Nacional del Agua (ANA-PERU). Asimismo, para comprender la distribución espacial de las estaciones en relación a la elevación, se ha recopilado el modelo de elevación digital de terreno (DEM por sus siglas en inglés) de 90 m de resolución a partir del Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) disponible en: <http://srtm.csi.cgiar.org/>

3.2.2 Datos de precipitación observada

Considerando la recomendación de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) de que los análisis sobre la variabilidad climática han de comprender un periodo de al menos 30 años (Lorenzo, 2012). En este estudio se ha recopilado la información de series de tiempo de precipitación mensual, únicamente de las estaciones pluviométricas con longitud de registro extenso (40 años) y bajo porcentaje de datos faltantes (< 20%) para un periodo común (1970 – 2010). Así, en la Tabla 3.1 se muestra las estaciones seleccionadas, donde se puede observar que la mayoría de las estaciones tienen menor a 10% de datos faltantes con excepción de las estaciones de Carhuacayan (10.21%), Jauja (11.67%), Ingenio (16.46%), Chichicocha (13.12%), Acobamba (11.67% y La Quinoa (14.58%). La Figura 3.4 muestra la distribución espacial de las estaciones pluviométricas (37 estaciones en total) de las cuales 11 estaciones corresponden al SENAMHI y 26 estaciones a la compañía eléctrica ELECTROPERÚ.

3.2.3 Datos de precipitación proyectada

En esta investigación se utiliza los resultados del estudio “Regionalización Estadística de Escenarios Climáticos en Perú” (SENAMHI, 2014); en el cual se reportó los datos de precipitación proyectada hacia el año 2050 (media centrada del periodo 2030 – 2070) de 3 GCM (CanESM2, CNRM-CM5 y MPI-ESM-MR; ver Tabla 3.2) más representativos para el Perú y para 2 escenarios de RCP (RCP4.5 y RCP8.5). Donde los datos de cada GCM y

RCP han sido regionalizados o disminuidos de resolución a escala de estaciones (downscaling) para un total de 265 (10) estaciones de SENAMHI a nivel nacional (a nivel de la CRM, ver Tabla 3.1). Así, en este estudio se utiliza la información de 6 escenarios posibles (3 GCM x 2 RCP) de precipitación proyectada hacia el año 2050 de 10 estaciones pluviométricas (Tabla 3.2) para la caracterización de la sequía proyectada en la CRM en base a los escenarios de cambio climático.

Tabla 3.1: Estaciones pluviométricas con información de precipitación mensual más extensa para el periodo 1970 – 2010. DF es el porcentaje de datos faltantes.

N°	Nombre	Longitud	Latitud	Altitud m.s.n.m.	DF (%)	Fuente	Precipitación Proyectada
1	Tambo de sol	-76.12	-10.87	4119	5.62	ELECTROPERU	No
2	Upamayo	-76.28	-10.92	4111	0.42	ELECTROPERU	No
3	Junín	-75.99	-11.15	4121	5.42	ELECTROPERU	No
4	Carhuacayan	-76.28	-11.20	4144	10.21	SENAMHI	Si
5	Hueghue	-76.28	-11.24	4172	2.29	ELECTROPERU	No
6	Yantac	-76.40	-11.33	4688	0.42	SENAMHI	Si
7	Marcapomacocha	-76.33	-11.40	4437	3.33	SENAMHI	Si
8	Jauja	-75.48	-11.78	3361	11.67	SENAMHI	Si
9	Pachacayo	-75.72	-11.81	3616	1.67	ELECTROPERU	No
10	Mantaro	-75.40	-11.83	3322	8.75	ELECTROPERU	No
11	Ingenio	-75.29	-11.88	3422	16.46	SENAMHI	Si
12	Yauricocha	-75.91	-11.96	4421	0.62	ELECTROPERU	No
13	Huayao	-75.34	-12.03	3357	5.00	SENAMHI	Si
14	Chichicocha	-75.61	-12.17	4507	13.12	ELECTROPERU	No
15	Palaco	-75.30	-12.35	3542	7.50	ELECTROPERU	No
16	Acostambo	-75.05	-12.36	3745	7.92	ELECTROPERU	No
17	Pajayracra	-74.66	-12.36	2305	7.71	ELECTROPERU	No
18	Huancayoccasa	-74.71	-12.37	3627	7.71	ELECTROPERU	No
19	Telleria	-75.12	-12.38	3227	7.50	ELECTROPERU	No
20	Pampas	-74.87	-12.39	3232	8.54	ELECTROPERU	No
21	Nogales	-74.68	-12.39	2931	7.71	ELECTROPERU	No
22	Pilchaca	-75.08	-12.41	3650	1.04	SENAMHI	Si
23	Kichuas	-74.77	-12.47	3113	6.88	ELECTROPERU	No
24	Villena	-74.69	-12.52	2773	8.54	ELECTROPERU	No
25	Mejorada	-74.93	-12.53	2828	4.79	ELECTROPERU	No
26	Huancalpi	-75.24	-12.54	4438	0.62	SENAMHI	Si
27	Huichicocha	-75.53	-12.56	4693	2.71	ELECTROPERU	No
28	Cobriza	-74.39	-12.59	3023	8.54	ELECTROPERU	No
29	Chilicocha	-75.45	-12.70	4546	5.62	ELECTROPERU	No
30	Churcampa	-74.38	-12.74	3344	7.71	ELECTROPERU	No
31	Huancavelica	-74.98	-12.78	3689	7.29	ELECTROPERU	No
32	Acobamba	-74.56	-12.86	3337	11.67	SENAMHI	Si
33	Huanta	-74.26	-12.93	2560	7.29	ELECTROPERU	No
34	Astobamba	-75.08	-12.93	4571	8.12	ELECTROPERU	No
35	Lircay	-74.73	-12.98	3530	1.04	SENAMHI	Si
36	Huapa	-74.73	-12.99	3300	7.50	ELECTROPERU	No
37	La Quinua	-74.14	-13.03	3316	14.58	SENAMHI	No

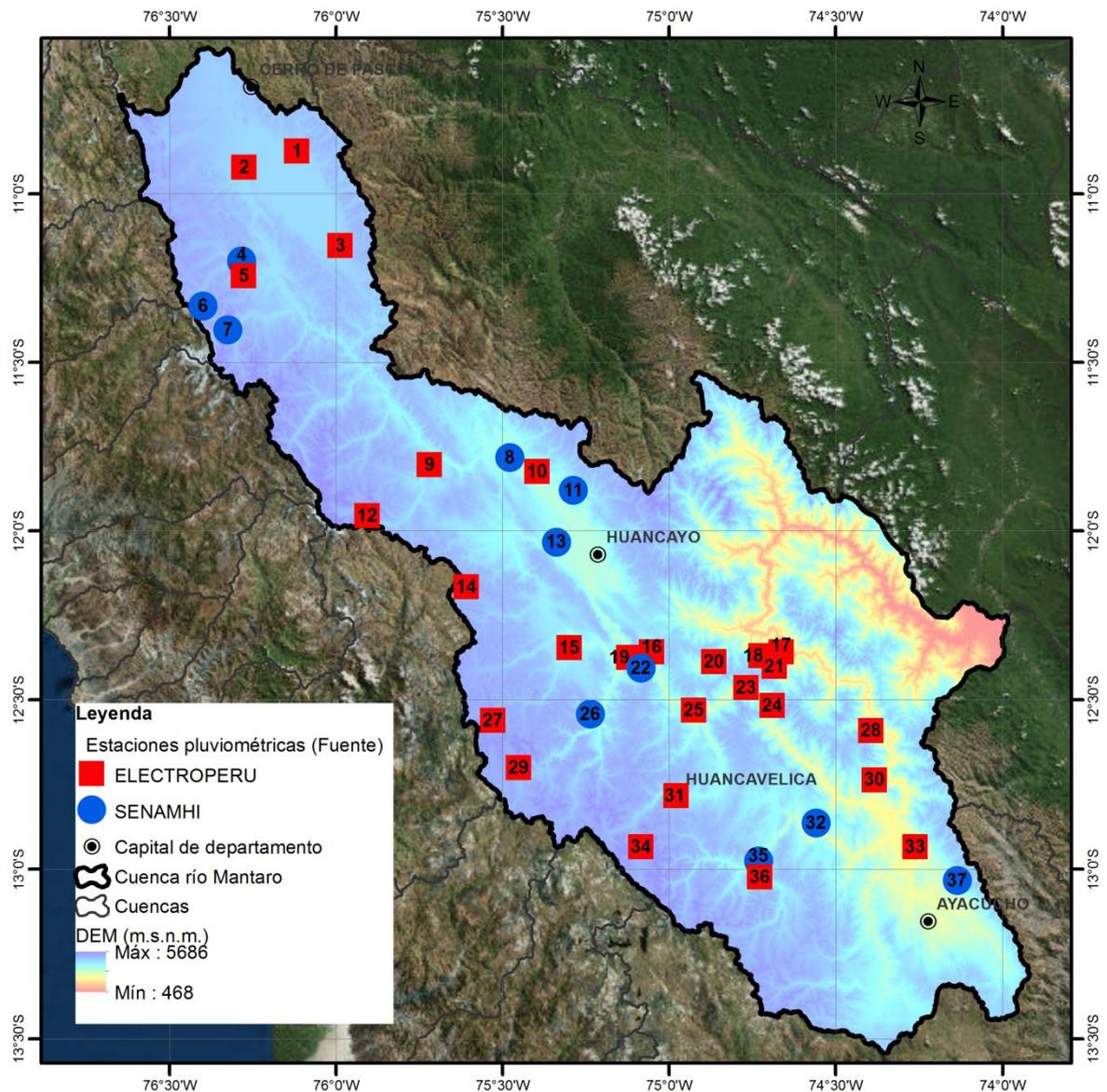


Figura 3.4: Distribución espacial de las estaciones pluviométricas con registros de precipitación más extensa en la cuenca de río Mantaro. Los números indican el orden de las estaciones de norte a sur de acuerdo a la Tabla 3.1.

Tabla 3.2: Modelos de Circulación General (GCM) representativos para el Perú.

Fuente: SENAMHI (2014).

Nombre MCG	Instituto	Resolución	Referencia
CanESM2	CCCMA	2.8° X 2.8°	(Chylek et al., 2011)
CNRM-CM5	CNRM-CERFACS	1.4° X 1.4°	(Voldoire et al., 2013)
MPI-ESM-MR	MPI	1.8° X 1.8°	(Jungclaus et al., 2010; Raddatz et al., 2007)

3.2.4 Programas de cómputo

Los programas utilizados en la ejecución de la metodología fueron las siguientes:

Hydraccess 4.5, permitió que las observaciones de precipitación mensual sean organizadas en una base de datos en Microsoft Access, lo cual sirvió para la crítica de datos y formación de regiones homogéneas con respecto a la variabilidad interanual de la precipitación. Está disponible en: <http://www.ore-hybam.org/>

R (lenguaje de programación), es un lenguaje de programación de código abierto y un entorno de software libre (<http://www.r-project.org>) para el análisis estadístico y gráfico. R fue desarrollado inicialmente por Robert Gentleman y Ross Ihaka del Departamento de Estadística de la Universidad de Auckland en 1993 y su desarrollo actual es responsabilidad de (R Core Team, 2017). En el contexto de esta tesis R fue utilizado para la completación de datos faltantes utilizando el paquete cutoffR (Feng et al., 2014b), para el cálculo del índice de precipitación estandarizada (IPE) utilizando el paquete SPEI (Beguería and Vicente-Serrano, 2017) y para el análisis de tendencia utilizando el paquete Trend (Pohlert, 2016).

ArcGis 10.1, permitió realizar la edición y presentación a través de mapas de la información geográfica.

3.3 Metodología

La Figura 3.5 muestra el diagrama de flujo de las etapas a seguir para cumplir con los objetivos de la tesis. De acuerdo a este diagrama, el trabajo consiste en realizar el análisis exploratorio de datos para detectar los datos atípicos e inconsistencias en la serie de tiempo de precipitación mensual, completación de datos faltantes, formación de regiones homogéneas a través del método del vector regional y caracterización de las sequías observadas por cada región homogénea tanto a corto y largo plazo en base al IPE. Adicionalmente, se realizará la caracterización de los cambios proyectados en las sequías bajo los escenarios de cambio climático. Finalmente, se realizará el análisis de tendencia de las sequías observadas.

A continuación, se describe en detalle los procedimientos de cada etapa de la metodología.

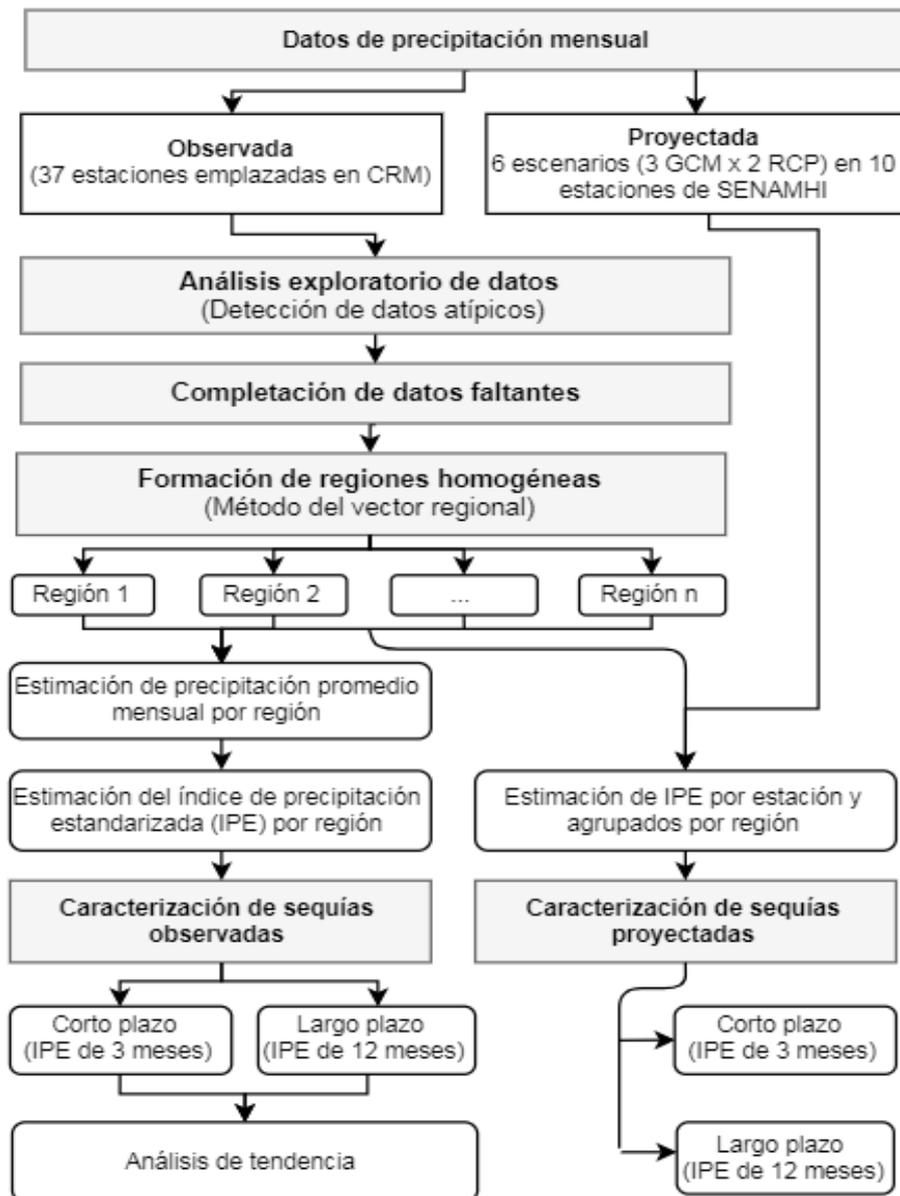


Figura 3.5: Diagrama de flujo de la metodología.
Fuente: Elaboración propia.

3.3.1 Análisis exploratorio de datos

Esta etapa consiste en la detección de datos atípicos (outliers) mediante el diagrama de cajas (Boxplot). Los posibles datos atípicos que serán detectados con el gráfico de Boxplot, serán contrastados conociendo su fecha de ocurrencia con el comportamiento de eventos de precipitación de estaciones contiguas; de aquí se pondrá en juicio si los datos atípicos detectados deberán ser eliminados o incluidos en la siguiente etapa de análisis.

Diagrama de caja (Boxplot)

La regla de Boxplot es un test visual para reconocer outliers. El rango intercuartil es incluido dentro de una caja y los intervalos de confianza de 5% y 95% son indicados con barras de error fuera de la caja. Aquellos valores que caen fuera de los intervalos de confianza son candidatos a ser outliers (Iglewicz y Hoaglin, 1993).

Límite para el intervalo de confianza al 95%:

$$\frac{x - Q_3}{Q_3 - Q_1} > L_S \quad (1)$$

Límite para el intervalo de confianza al 5%:

$$\frac{Q_1 - x}{Q_3 - Q_1} > L_I \quad (2)$$

$$L_I = Q_1 - (Q_3 - Q_1) \cdot 1.5 \quad (3)$$

$$L_S = Q_3 + (Q_3 - Q_1) \cdot 1.5 \quad (4)$$

Donde L_I, L_S es el valor crítico en la regla de Boxplot, x es el punto fuera del límite más alto o más bajo en la regla de boxplot y Q_i = Cuartil i-ésimo.

3.3.2 Completación de datos faltantes

La completación de datos faltantes en la serie de tiempo de precipitación mensual fue llevada a cabo aplicando el método más reciente denominado CUTOFF, el cual es un método automático de completación de datos espacio-temporales y está implementado en el paquete cutoffR en el programa R (Feng et al., 2014b). La robustez de este método ha sido validada en la completación de datos faltantes en observaciones de precipitación mensual de la cuenca Murray–Darling en Australia (Feng et al., 2014a).

Método CUTOFF

El principio de este método es utilizar tanto la información temporal y espacial para la completación de datos. Para describir el procedimiento, supongamos que se tiene observaciones espacio-temporales mensuales incompletas en una matriz X de dimensión $m \times n$ donde m es meses y n es estaciones. Sea $x_{(i,j),k}$ la observación en el mes i en el año j en la estación k , para $i = 1, 2, \dots, 12$; $j = 1, 2, \dots, w$ y $k = 1, 2, \dots, n$; y supongamos que una observación específica $x_{(i^*, j^*), k^*}$ es dato faltante, siendo el mes i^* en el año j^* y en la

estación k^* como el dato faltante (candidato) a completar. A continuación se describe los pasos para completar el dato faltante:

- Se crea una lista de estaciones de referencia (denominado L_{k^*}) conformado por estaciones que tienen alta correlación con la estación candidata k^* ; siendo los valores de correlación mayor que un valor de correlación definido por un umbral r .
- Sea $J_{i,k}$ el conjunto de años de referencia que no incluye el año j^* para el cual $x_{(i,j),k}$ no es dato perdido en el mes i y estación k .
- Se estima \bar{R} (Ecuación 5) como el valor promedio de las observaciones en el mes i^* de todos los años ($J_{i,k}$) y estaciones (L_{k^*}) de referencia. \bar{C} (Ecuación 6) como el valor promedio de las observaciones en el mes i^* de todos los años de referencia ($J_{i,k}$) solo de la estación candidata k^* . R (Ecuación 7) como el valor promedio de las observaciones en el mes i^* para el año j^* de las estaciones de referencia (L_{k^*}).

$$\bar{R} = \frac{\sum_{k \in L_{k^*}} \sum_{j \in J_{i^*,k}} x_{(i^*,j),k}}{\sum_{k \in L_{k^*}} |J_{i^*,k}|} \quad (5)$$

$$\bar{C} = \frac{\sum_{j \in J_{i^*,k^*}} x_{(i^*,j),k^*}}{|J_{i^*,k^*}|} \quad (6)$$

$$R = \frac{\sum_{k \in L_{k^*}} x_{(i^*,j^*),k}}{|L_{k^*}|} \quad (7)$$

- Finalmente, se calcula el valor a completar \hat{x} que corresponde a $x_{(i^*,j^*),k^*}$ como:

$$\hat{x}/\bar{C} = R/\bar{R} \quad (8)$$

$$\hat{x} = R(\bar{C}/\bar{R}) \quad (9)$$

Un valor del umbral $r = 0.75$ para la formación del conjunto de estaciones que participan en la completación de datos faltantes de una estación específica es recomendado por (Feng et al., 2014a).

3.3.3 Formación de regiones homogéneas

La formación de regiones homogéneas consiste en dos etapas: primero, formación preliminar de regiones en base a una aglomeración preliminar de las estaciones. Segundo, formación de regiones homogéneas.

Para la primera etapa existen diversas formas clásicas de agrupar estaciones por ejemplo en base a criterios subjetivos como la proximidad, características fisiográficas o elevación de las estaciones. También existen técnicas matemáticas que permiten aglomerar estaciones entre ellas se tiene las técnicas de aglomeración jerárquica (p.e. método de Ward), métodos de aglomeración particionales (p.e. K-means), método de análisis de componentes principales y entre otros. Así, en este estudio utilizamos el método de Ward para la agrupación preliminar de las 37 estaciones pluviométricas consideradas en este estudio en base a sus datos de precipitación promedio mensual de cada mes del período 1970-2010.

En la segunda etapa se define si cada formación preliminar de regiones es una región homogénea a través del Método del Vector Regional (MVR) utilizando el programa HYDRACCESS. El MVR permite agrupar estaciones pluviométricas con comportamiento similar con respecto a la variabilidad interanual de la precipitación y ha sido ampliamente utilizado en Perú (Curi-Tapahuasco, 2017; Espinoza et al., 2009; León-Altuna, 2014; Rau et al., 2017).

Método de Ward

El método de Ward es un método aglomerativo, que consiste en generar una serie de particiones de los datos: la primera partición consta de n grupos (clusters) de una sola estación cada una y la última partición consiste en un sólo grupo que contiene todas las n estaciones. Para la aglomeración de los grupos se utilizan medidas de proximidad y para el caso específico del método Ward la fusión de dos grupos se basa en la medida del criterio suma de los errores al cuadrado. El objetivo en cada etapa es minimizar el aumento total de la suma de los errores al cuadrado (E) dentro del cluster, dada por:

$$E = \sum_{m=1}^g E_m \quad (10)$$

Donde

$$E_m = \sum_{l=1}^{n_m} \sum_{k=1}^{p_k} (x_{ml,k} - \bar{x}_{m,k})^2, \quad (11)$$

En la que $\bar{x}_{m,k} = (1/n_m) \sum_{l=1}^{n_m} x_{ml,k}$ (la media del m-ésimo cluster para la k-ésima variable), $x_{ml,k}$ siendo la puntuación de la k-ésima variable ($k = 1, \dots, p$) para el l-ésimo objeto ($l=1, \dots, n_m$) en el m-ésimo cluster ($m=1, \dots, g$). Este aumento es proporcional a la distancia euclidiana cuadrada entre los centroides de los clusters unidos, pero el método difiere de otros métodos aglomerativos en que los centroides son ponderados por $n_m n_q / (n_m + n_q)$ al calcular distancias entre centroides, donde n_m y n_q son los números de los objetos en los dos grupos m y q.

Método del Vector Regional

El vector regional (VR) es una estación ficticia que es una “especie de promedio” de todas las estaciones de una región preliminarmente definida, con la cual se comparan cada una de las estaciones para finalmente descartar aquellas que no son consistentes con el VR. El VR se calcula bajo el concepto de precipitación media extendida, salvando así los problemas del peso de las estaciones con valores de precipitación muy baja y alta. Luego, empleando el método de mínimos cuadrados se encuentra los índices pluviométricos regionales anuales Z_i y la precipitación media extendida P_j , esto se logra al minimizar la Ecuación (12).

$$S = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (P_{ij}/P_j - Z_i)^2 \quad (12)$$

Donde; i es el índice del año, j es el índice de la estación, N es el número de años, M es el número de estaciones. P_{ij} es la precipitación anual en la estación j el año i, P_j es la precipitación media extendida al período de N años y finalmente Z_i es el índice pluviométrico regional del año i.

De acuerdo a (Rau et al., 2017), una región se considera como homogénea si la desviación estándar de las diferencias entre los índices pluviométricos anuales de las estaciones y los índices del VR son menores a 0.4. Además, el coeficiente de correlación entre el VR y los valores pluviométricos anuales de las estaciones deben ser mayores a 0.7.

Como resultado de esta etapa se tendrá las regiones homogéneas con comportamiento similar respecto a la variabilidad interanual de la precipitación, el cual es muy importante en este estudio ya que cada región homogénea permitirá conocer el conjunto de estaciones que lo conforman.

3.3.4 Caracterización de las sequías observadas

La caracterización de las sequías observadas se realizó para cada región homogénea; para ello en cada región se estimó el promedio regional de precipitación mensual para el periodo de análisis (1970-2010) en base a las observaciones de las estaciones que conforman una región. Luego, en base al promedio regional de precipitación mensual se estimó la serie de IPE regional tanto para escalas de tiempo a corto plazo (sequía de 3 meses) y largo plazo (sequías de 12 meses). La serie de IPE regional permitió caracterizar la sequía en cada región en términos de su duración, intensidad, severidad y probabilidad de ocurrencia. Cabe señalar que la estimación de IPE se realizó utilizando el paquete SPEI en el software libre R (Beguería y Vicente-Serrano, 2017).

Para caracterizar las sequías, en base a las series de IPE se identificaron los eventos de sequía definidos como los periodos continuos con valores de IPE menores al umbral (-1.0) y por cada evento se determinaron las características de sequía (duración, intensidad, severidad y probabilidad de ocurrencia) en base a la siguiente definición:

Duración (meses)

Estimado como el número de meses consecutivos con valores de IPE por debajo del umbral ($IPE < -1.0$) (ver Figura 3.6).

Intensidad

Para la presente tesis, se consideró la estimación de la intensidad como el máximo valor del déficit del IPE ocurrido durante el evento de sequía (Figura 3.6).

Severidad

La severidad de los eventos de sequía se cuantificó como la acumulación de la sucesión de déficits del IPE durante un evento de sequía (Figura 3.6).

Probabilidad de Ocurrencia

Para la presente tesis, la probabilidad de ocurrencia (PO) de una determinada intensidad de sequía (Moderada, Severa o Extrema), según lo definido en la Tabla 3.3, se estimó como el porcentaje de meses bajo determinada intensidad de sequía, respecto al número total de meses de evaluación en el periodo de análisis (1970-2010). Así, la PO se calculó en base a la ecuación 13.

$$PO = \frac{ni \times 100}{St} \quad (13)$$

Dónde, PO es la Probabilidad de Ocurrencia, ni es el número de meses con sequías de determinada intensidad (Moderada, Severa o Extrema) y St es el número total de meses de evaluación (480 en nuestro caso).

Tabla 3.3: Clasificación de la intensidad de las sequías en base al IPE. Fuente: World Meteorological Organization (2012)

Intensidad	IPE
Sequía Moderada	$-1.5 < \text{IPE} < -1.0$
Sequía Severa	$-2.0 < \text{IPE} \leq -1.5$
Sequía Extrema	$\text{IPE} \leq -2.0$

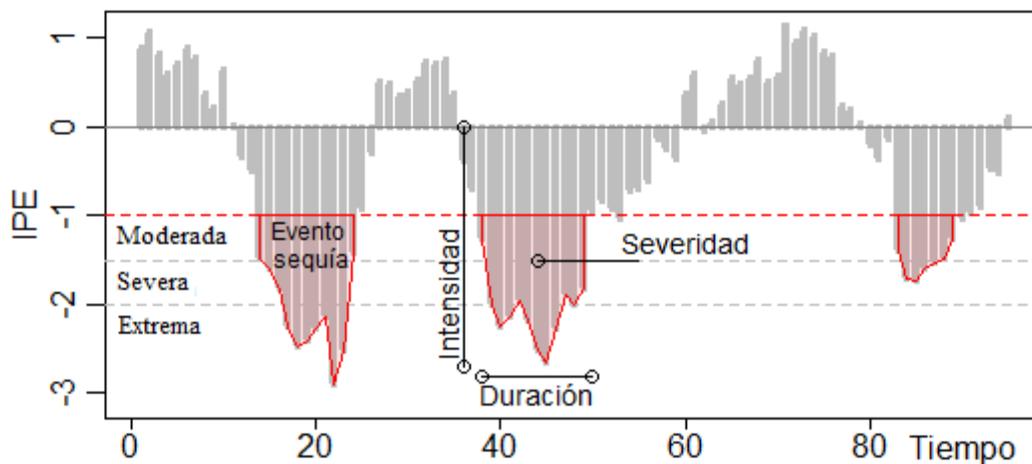


Figura 3.6: Características de las sequías

Índice de precipitación estandarizado (IPE)

El IPE desarrollado por Mckee *et al.* (1993) es un índice de probabilidad que nos da una representación de los periodos secos y húmedos estandarizados; cuantificando el déficit de precipitación en distintas escalas de tiempo. Se basa en el uso de series de tiempo

de precipitación mensual y su correspondiente ajuste a la función de distribución de probabilidad (*Gamma* en este caso), que posteriormente es transformada en la función normal. Producto del ajuste y la transformación, cada dato de IPE calculado representa el número de desviaciones estándar que un dato está alejado de la media de la serie de tiempo de precipitación.

Una de las fortalezas notables del IPE es la distribución de probabilidad normalizada, de manera que tanto la sequía como la humedad pueden ser comparados a través de diferentes regiones (Qin et al., 2015).

Suponiendo que x es precipitación mensual acumulada en la escala de tiempo de la investigación (1 mes, 3 meses, 6 meses, 12 meses, etc.), la cual se ajusta a una función de densidad de probabilidad $g(x)$ como sigue:

$$g(x) = \frac{x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)}, x > 0 \quad (14)$$

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} x^{\alpha-1} e^{-x} dx \quad (15)$$

Dónde x es la precipitación acumulada, $\Gamma(x)$ es la función gamma, α y β son los parámetros de forma y escala respectivamente, los cuales pueden ser estimados en base a los estadísticos de las series de precipitación por el método de máxima verosimilitud (Guttman, 1999) como:

$$\alpha = \frac{1 + \sqrt{1 + 4A/3}}{4A} \quad (16)$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\alpha} \quad (17)$$

$$A = \ln(\bar{x}) + \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad (18)$$

Dónde n es la longitud de la serie de tiempo (meses). Luego la probabilidad acumulada de precipitación x en la escala de tiempo dada es expresada como:

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} dx \quad (19)$$

Si $t=x/\beta$, la ecuación 19 se transforma en una función gamma incompleta:

$$G(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^x t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (20)$$

La ecuación 20 no considera la situación extrema donde la precipitación mensual acumulada $x=0$. Como resultado, la ecuación 20 es modificada como $H(x)$:

$$H(x) = q + (1-q)G(x) \quad (21)$$

Donde q es la probabilidad de $x=0$, es decir, la frecuencia de ocurrencia de $x=0$ en todas las series observadas. Cuando son transformadas en la función de distribución estandarizada normal, finalmente el IPE se expresa como:

$$SPI = \begin{cases} -\left(t - \frac{c_0 + c_1 + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right), t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{H_{(x)}^2}\right)}, 0 < H_{(x)} \leq 0.5 \\ t - \frac{c_0 + c_1 + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}, t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1-H_{(x)})^2}\right)}, 0.5 < H_{(x)} \leq 1 \end{cases} \quad (22)$$

Donde las constantes equivalen a: $c_0 = 2.515517$, $c_1 = 0.802853$, $c_2 = 0.010328$, $d_1 = 1.432788$, $d_2 = 0.189269$ y $d_3 = 0.001308$.

3.3.5 Caracterización de las sequías proyectadas

La caracterización de las sequías proyectadas se realizó de manera similar a la caracterización de las sequías observadas, considerando la estimación de la duración, intensidad, severidad y frecuencia de los eventos de sequía, en base a las precipitaciones proyectadas por los escenarios considerados en el presente estudio.

Es importante mencionar que la caracterización de las sequías proyectadas se realizó en base a 10 estaciones de SENAMHI emplazadas dentro de la CRM que cuentan con información de precipitaciones proyectadas hasta el año 2050 (media centrada del periodo 2030-2070). Asimismo, la caracterización se realizó considerando las sequías a corto (IPE-3) y a largo plazo (IPE-12).

3.3.6 Análisis de tendencia

Esta etapa corresponde al análisis de tendencia de las características (duración, intensidad y severidad) de las sequías históricas; para ello se utilizó el test de Mann Kendall (MK), el cual es ampliamente utilizado en la detección de tendencia en estudios hidrológicos.

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. 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.

El estadístico S de Tau de Kendall se define como sigue:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(X_j - X_i) \quad (23)$$

Donde X_j son los valores de datos secuenciales, n es la longitud del conjunto de datos, y:

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1 & \text{si } \theta > 0 \\ 0 & \text{si } \theta = 0 \\ -1 & \text{si } \theta < 0 \end{cases} \quad (24)$$

Para $n \geq 8$, la estadística S es aproximadamente normal distribuido con la media y la varianza de la siguiente manera:

$$E(S) = 0 \quad (25)$$

$$V(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{m=1}^n t_m m(m-1)(2m+5)}{18} \quad (26)$$

Donde t_m es el número de vínculos de grado m . La prueba estadística estandarizada Z se calcula:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{V(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{V(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (27)$$

El valor de probabilidad P de la estadística S de MK para datos de la muestra se puede estimar usando la función de distribución acumulativa normal como:

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^Z e^{-t^2/2} dt \quad (28)$$

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis exploratorio de datos (AED)

En la etapa del AED se ha realizado los gráficos de cajas (Boxplots), para detectar los datos atípicos (outliers) de manera cualitativa. Así, en la Figura 4.1, se muestra el diagrama de caja de la distribución de los datos mensuales por estación donde se observa que la mayoría de las estaciones tiene los valores de precipitación dentro de los límites de confianza (superior e inferior). Sin embargo, también se observa presencia de datos de precipitación (196 de 17760 datos, siendo 1.1% del total de datos) fuera del límite superior del intervalo de confianza, catalogándose estos como posibles datos atípicos. La mayor cantidad de los posibles datos atípicos de precipitación fueron registrados en los meses de la temporada lluviosa y las magnitudes de estos datos también fueron registrados en estaciones vecinas; por lo que no se encontró una clara evidencia de que éstos sean datos atípicos y por lo tanto no se han reportado presencia de datos atípicos en este estudio.

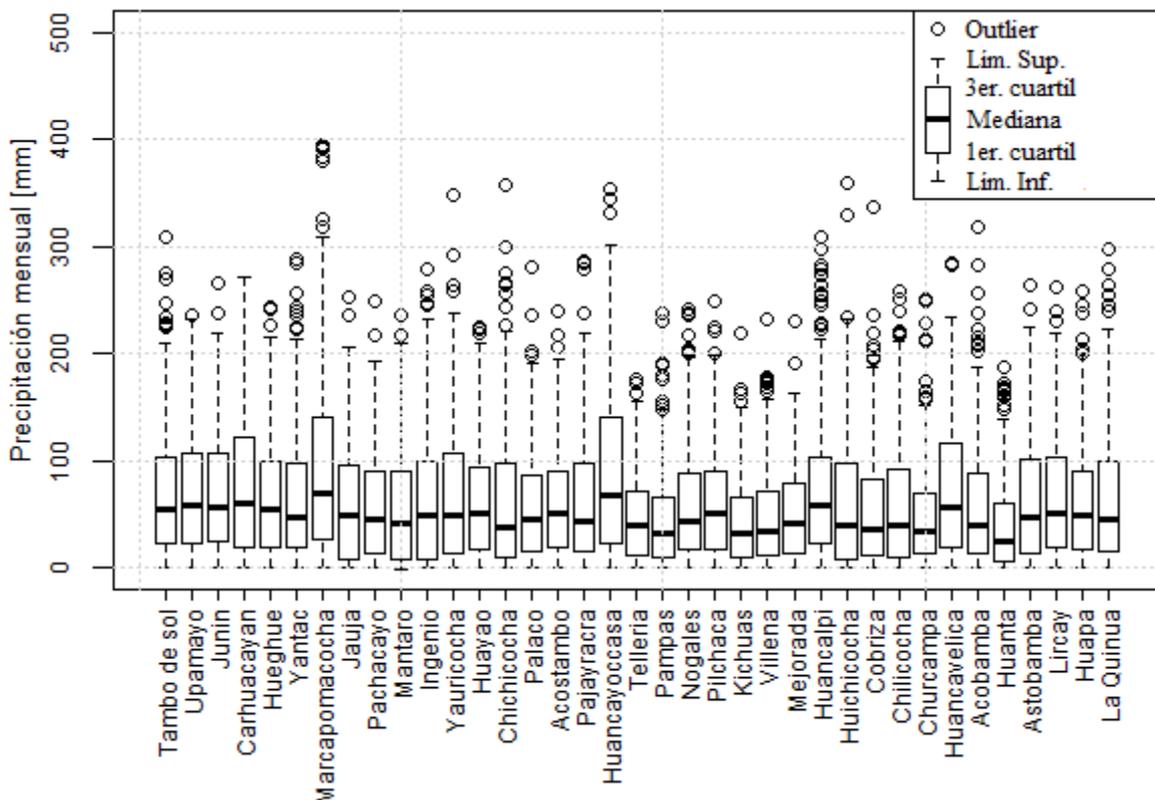


Figura 4.1: Gráfico de boxplot de precipitación mensual (periodo 1970-2010) por cada estación pluviométrica.

4.2 Completación de datos faltantes

La completación de datos faltantes fue llevada a cabo con el método CUTOFF (Feng et al., 2014a). Para aplicar este método fue importante definir el umbral de correlación el cual define el grupo de estaciones que transfiere información espacio-temporal para completar los datos faltantes de una determinada estación. Así, la Figura 4.2 muestra que todos los valores de coeficiente de correlación de precipitación mensual entre pares de las estaciones son significantes a un nivel de significancia de 0.05. Además, los valores de correlación encontrados entre sí son mayores a 0.6; el cual demuestra una correspondencia positiva entre todas las estaciones de la CRM. En consecuencia para el presente estudio se ha definido un valor de correlación de 0.80 como umbral para la completación de datos faltantes (puntos de color azul).

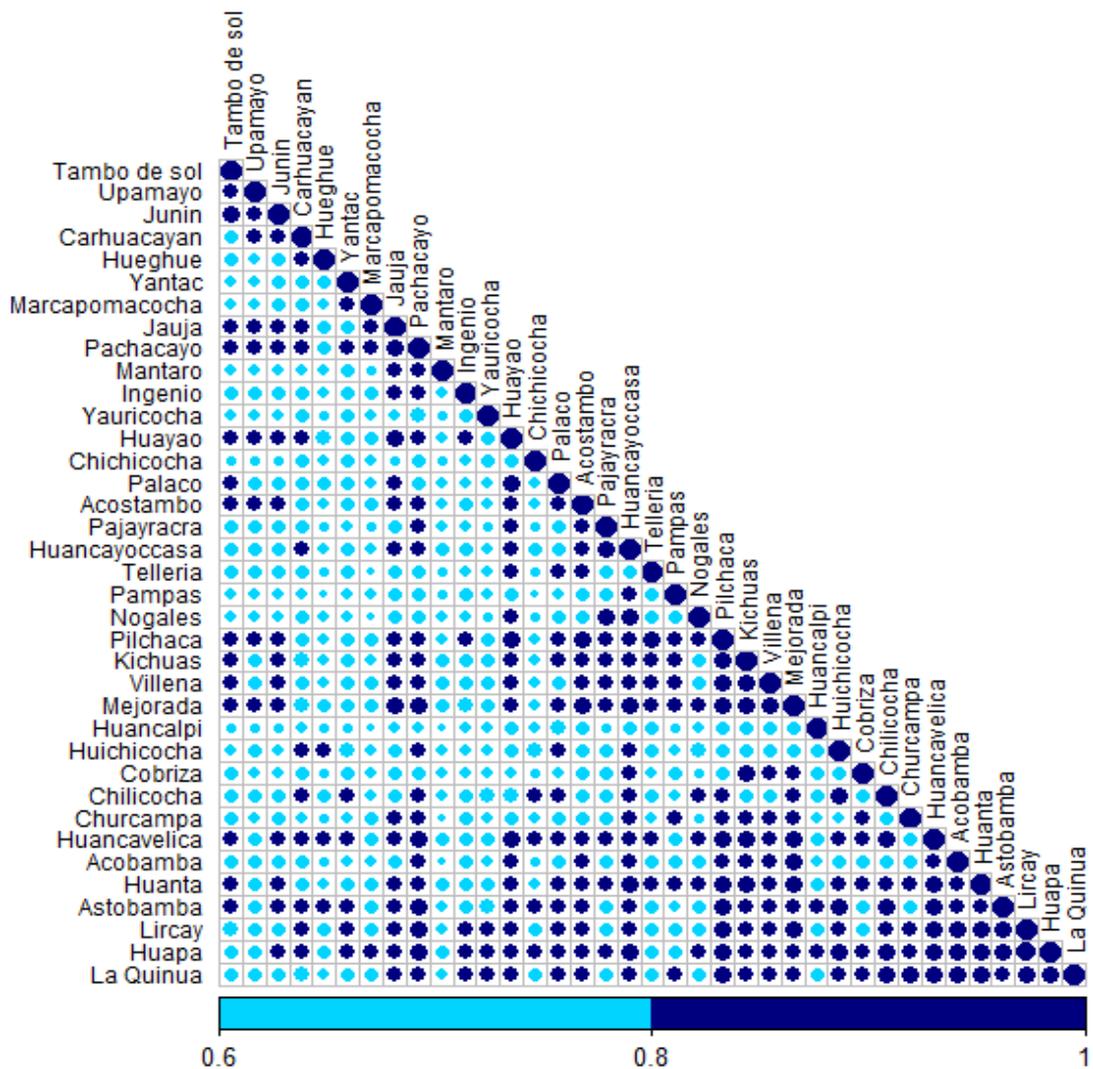


Figura 4.2: Correlación de precipitación mensual entre pares de estaciones significantes a un nivel de 0.05.

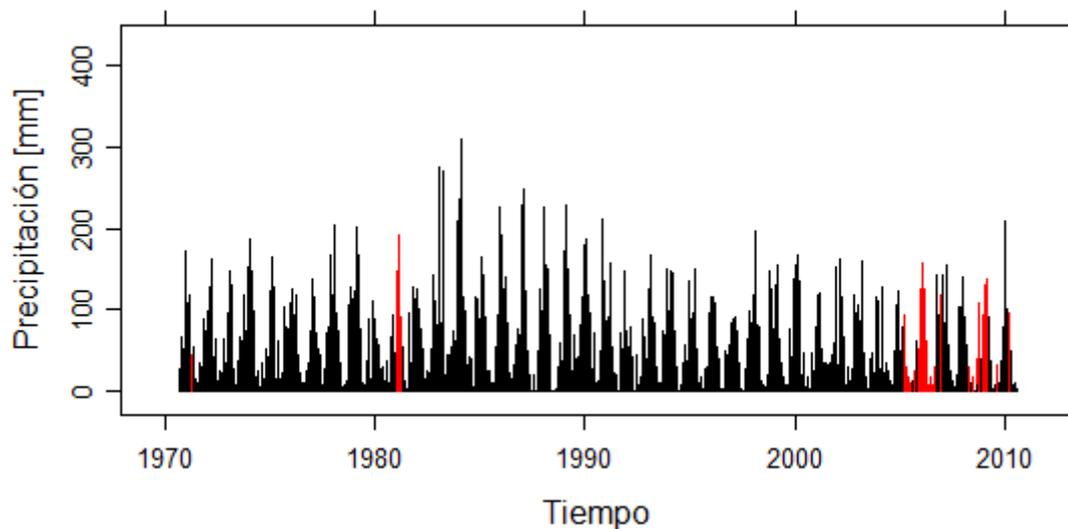


Figura 4.3: Serie de tiempo de precipitación mensual de la estación pluviométrica Tambo de Sol. Datos observados (completados) en barra negra (roja).

Como resultado del proceso de completación de datos faltantes a manera de ejemplo en la Figura 4.3 se muestra la serie de tiempo de precipitación mensual de la estación Tambo de Sol, en el cual se puede apreciar que los datos completados (barra roja, Figura 4.3) son coherentes con la variabilidad de los datos observados (barra negra, Figura 4.3). Los resultados de la completación de datos faltantes para las demás estaciones pluviométricas se muestran en el Anexo 8.1.

4.3 Formación de regiones homogéneas

Las regiones homogéneas fueron definidos utilizando el Método del Vector Regional (MVR) en el programa HYDRACCESS. Para ello en una primera etapa a través del método de Ward se realizó una agrupación preliminar de estaciones utilizando como variables descriptores a: la precipitación media mensual, elevación, longitud y latitud; siendo previamente todas las variables estandarizadas. Así, la agrupación preliminar en base al método de Ward se presenta en el gráfico de dendrograma (Figura 4.4); el cual es un diagrama de árbol que muestra los grupos que se forman al crear los conglomerados de las observaciones en cada paso y sus niveles de similitud. Así, en este estudio en base al dendrograma se ha definido una partición final de 4 grupos preliminares lo cual ocurre a un nivel de similitud de 6 (Figura 4.4).

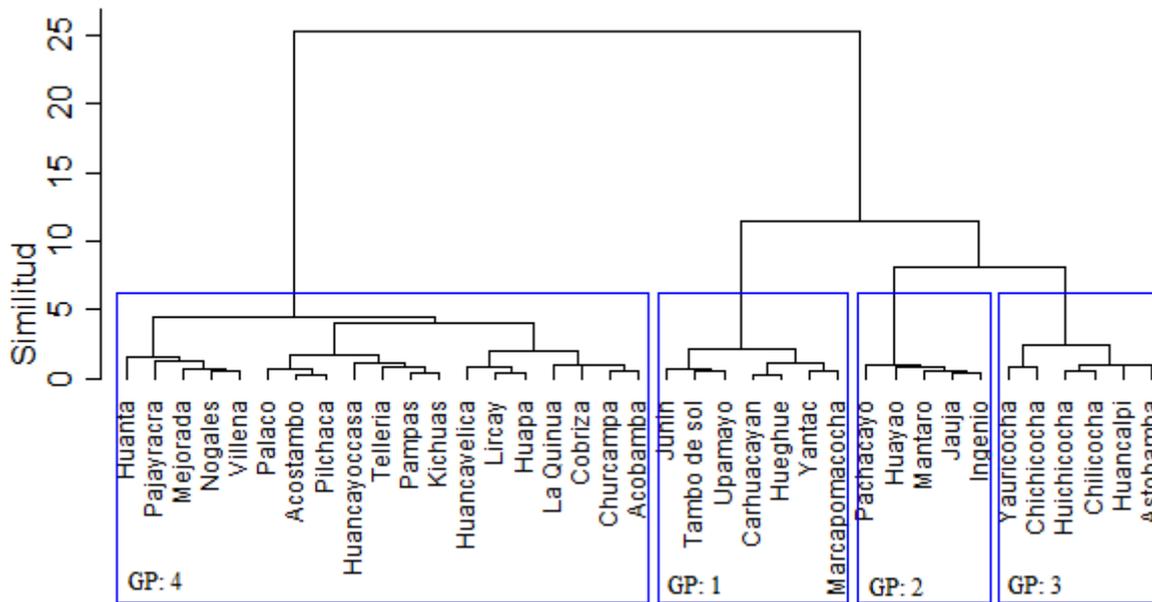


Figura 4.4: Dendrograma en base al método de Ward. GP es Grupo Preliminar.

La distribución espacial del agrupamiento preliminar de estaciones en base al método de Ward se muestra en la Figura 4.5, donde se puede apreciar que el grupo 1 corresponde a las estaciones localizadas en la parte alta y al norte de la cuenca, las estaciones del grupo 2 se encuentran en la parte media de la cuenca alrededor de la ciudad de Huancayo, las estaciones del grupo 3 se encuentran situadas a lo largo de la parte alta de la cordillera de los Andes entre los departamentos de Junín y Huancavelica; y finalmente las estaciones del grupo 4 están situadas a lo largo del centro y sur de la cuenca entre los departamentos de Huancavelica y Ayacucho.

En la segunda etapa del proceso de formación de regiones homogéneas, a través del MVR se verificó si los grupos preliminares definidos con el método de Ward son regiones homogéneas. La Figura 4.7 y 4.8 muestran los resultados definitivos de MVR para cada región, donde podemos apreciar los índices anuales de cada estación pluviométrica y del vector regional con sus respectivos límites de confianza. Asimismo, se aprecia la desviación estándar de las diferencias (DED) entre los índices pluviométricos anuales de las estaciones y los índices del VR, además del coeficiente de correlación (CC) entre el VR y los valores pluviométricos anuales de las estaciones. El grupo preliminar es considerado como región homogénea si los valores de DED son menores a 0.4 y si los valores de CC son mayores a 0.7 (Rau et al., 2017). Así, en base a la DED y el CC todas las regiones son homogéneas debido a los bajos valores de DED (< 0.21) y además de que los valores de

CC en general son próximos y mayores a 0.7 en todas las estaciones de cada región. Es importante señalar que en orden a formar las regiones homogéneas definitivas en base al agrupamiento preliminar, se ha reubicado la estación Palaco de la región 4 (CC=0.50) a la región 3 (CC= 0.66). Además, la estación Yantac (CC = 0.30) de la región 1 y Cobriza (CC = 0.28) de la región 4 fueron excluidos de sus respectivas regiones y de los análisis posteriores por presentar valores muy bajos de CC. En consecuencia, en la Figura 4.6 se muestra la delimitación de las regiones homogéneas en base a MVR, donde la delimitación de cada región fue realizada en base el área de influencia de cada una de las estaciones que lo conforman utilizando el método de Thiessen.

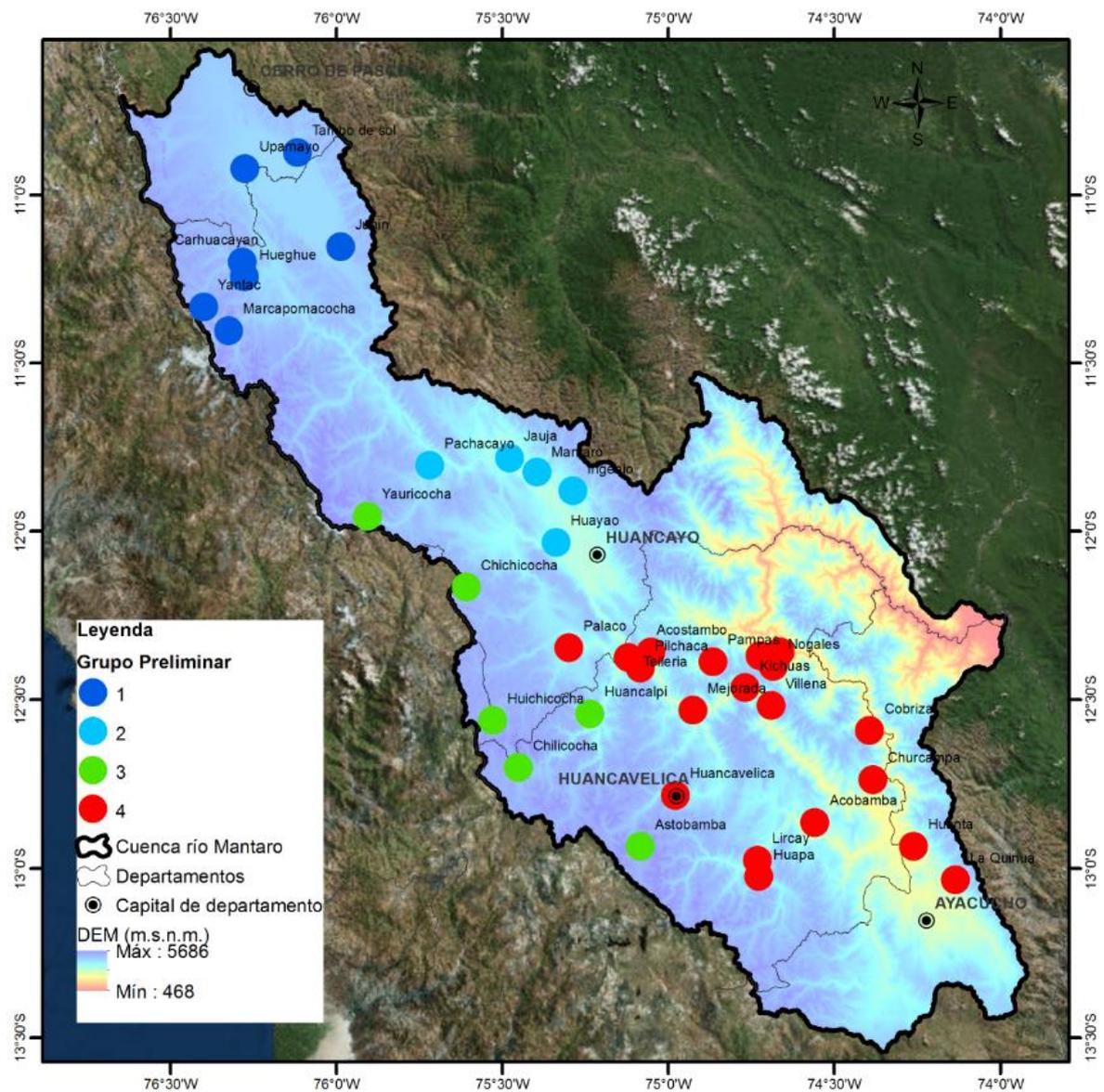


Figura 4.5: Distribución espacial del agrupamiento preliminar de estaciones en base al método de Ward.

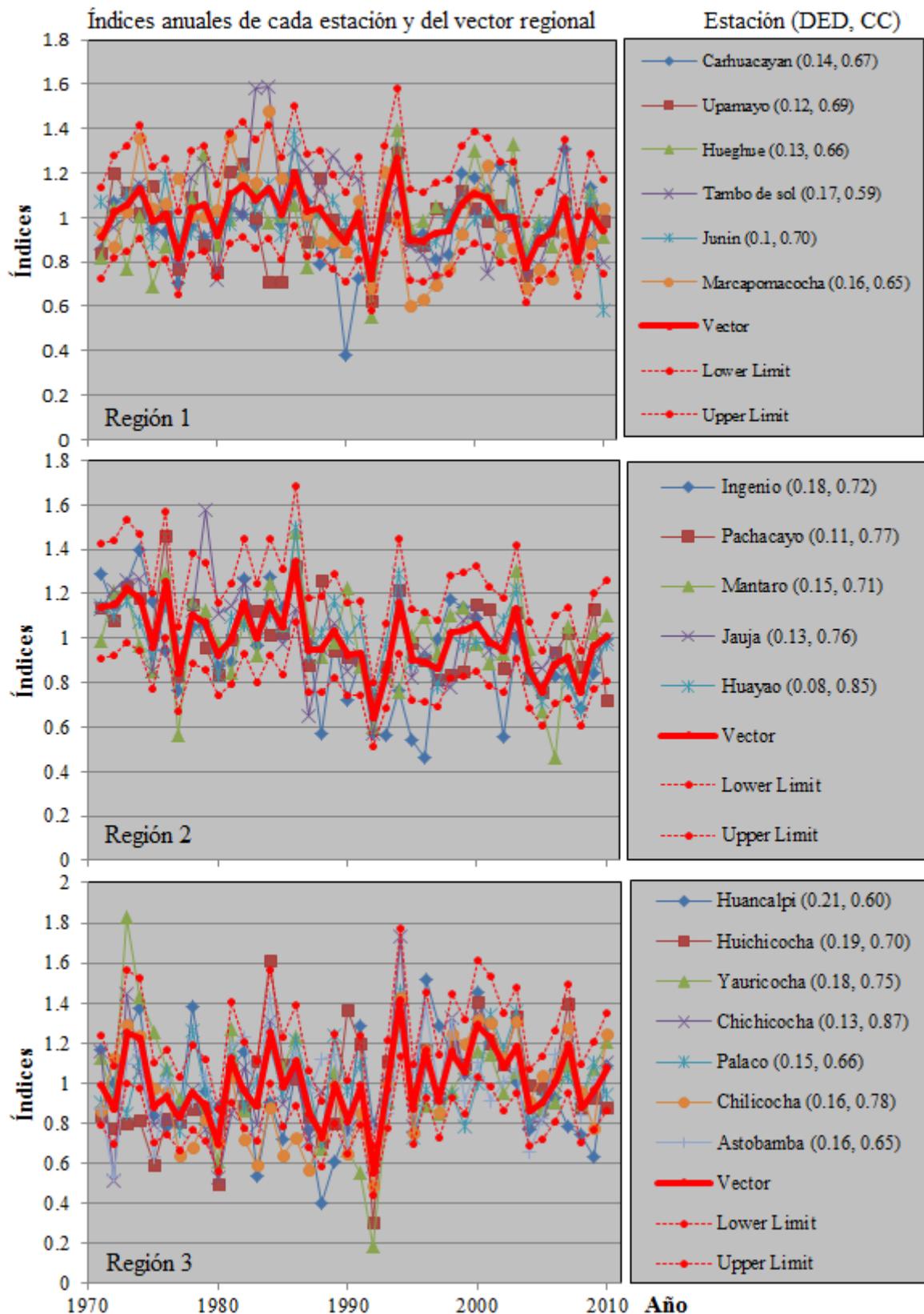


Figura 4.7: Resultados de MVR para la región homogénea 1, 2 y 3. DED: desviación estándar de las diferencias entre los índices anuales de las estaciones y el vector regional (VR). CC: coeficiente de correlación entre el VR y las lluvias anuales de las estaciones.

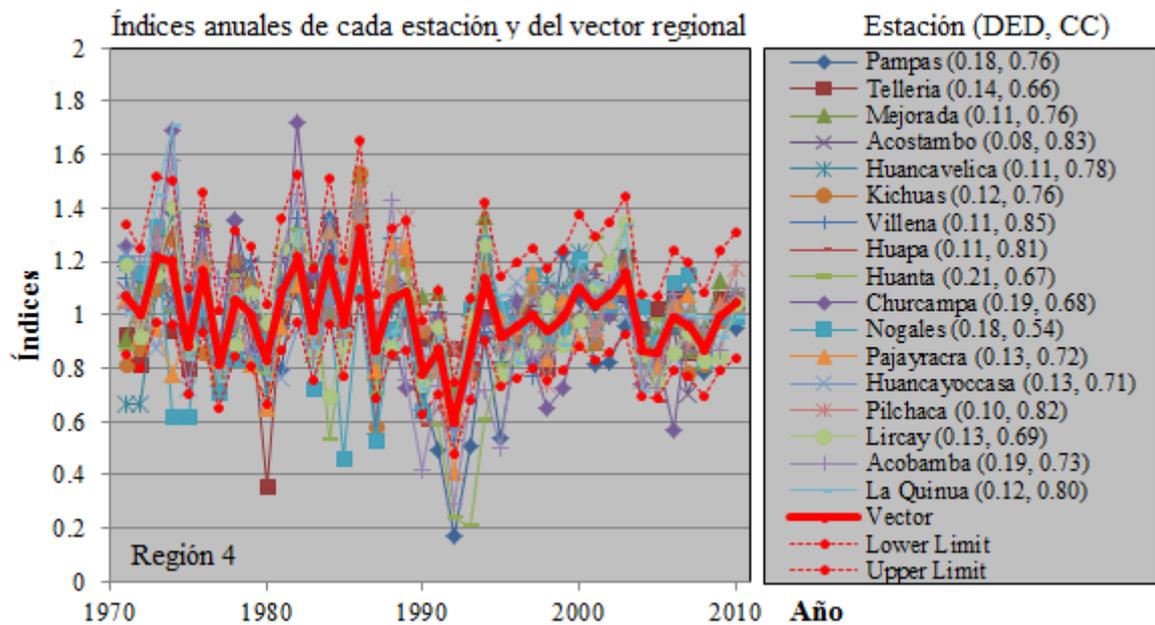


Figura 4.8: Resultados de MVR para la región homogénea 4. DED: desviación estándar de las diferencias entre los índices anuales de las estaciones y el vector regional (VR). CC: coeficiente de correlación entre el VR y las lluvias anuales de las estaciones.

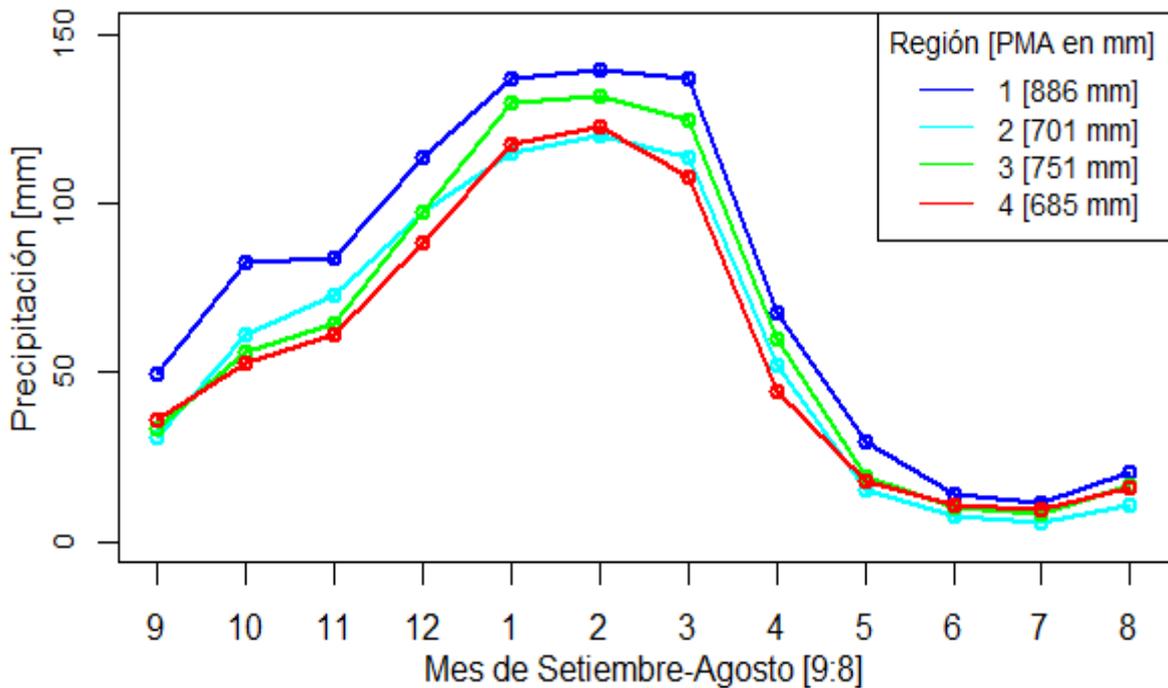


Figura 4.9: Distribución temporal de la precipitación media mensual para cada región homogénea en la CRM (período 1970 – 2010).

4.4 Caracterización de las sequías observadas

La caracterización de las sequías en el siguiente trabajo fue realizado a escala de cada una de las 4 regiones pluviométricas descritas en la sección anterior, para este propósito en cada una de las regiones se ha obtenido una serie de precipitación mensual (1970-2010) en base al promedio de las estaciones que pertenecen a cada región. Luego de este proceso, con las series de precipitación regional se ha realizado la caracterización de las sequías observadas tanto a corto plazo (sequía de 3 meses) y largo plazo (sequías de 12 meses) utilizando la metodología del IPE para el periodo de 1970-2010. En ese sentido, la serie del IPE regional permitió caracterizar la sequía en cada región en términos de su duración, intensidad, severidad y probabilidad de ocurrencia.

4.4.1 Sequías a corto plazo (IPE-3)

Utilizando el IPE-3 para cada una de las 4 series regionales de precipitación, se han obtenido la variación temporal del IPE-3 (1970-2010), el cual se muestra en la Figura 4.10. En general, se observa que la variabilidad del IPE-3 es semejante en cada una de las 4 regiones determinadas en base a la ciclicidad diferenciada entre períodos húmedos y secos. Considerando que nuestro objetivo de estudio son las sequías, este estudio es enfocado en los eventos de sequías ($IPE-3 < -1$).

Considerando las características de las sequías (ver Figura 3.6), para el IPE-3 en resumen en cada una de las regiones se ha construido la Tabla 4.1 y la Figura 4.11. Donde se observa que el número de eventos varía entre 29 (Región 4) a 37 (Región 2); la duración máxima en meses de estos eventos no difiere mucho entre las 4 regiones estando entre 6 a 9 meses; las intensidades máximas varían entre -2.94 y -3.30 y las severidades máximas van entre 13.15 y 20.56. En base a estos resultados solo se ve un ordenamiento espacial (de Sur a Norte) en las severidades máximas ya que estas van de mayor a menor desde la Región 4 hacia la Región 1.

En orden de evaluar el período de tiempo exacto en los cuales se presentaron las sequías más extremas se han calendarizado los eventos más fuertes basado en las propiedades de las sequías. Así, la Tabla 4.2 muestra los tres eventos de sequías más fuertes en cada uno de las cuatro regiones con sus respectivas características estadísticas.

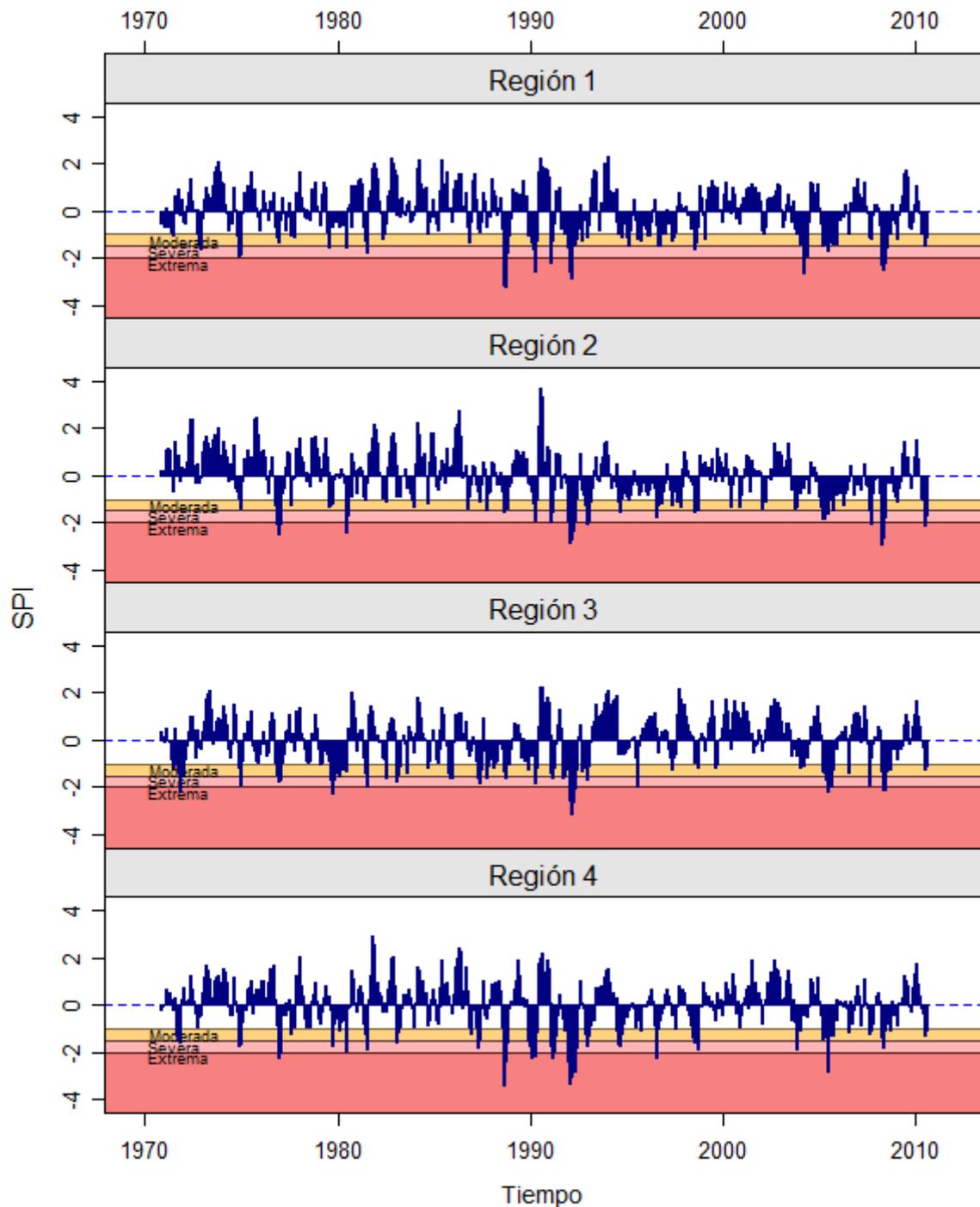


Figura 4.10: Evolución temporal de IPE-3 para cada región homogénea en CRM (período 1970 – 2010).

De esta calendarización, se observa en las 4 regiones que el evento de sequía más extremo empezó a finales del año 1991 extendiéndose hasta mediados de 1992. También, se observa que este evento fue más drástico en el Sur (Región 4) llegando a alcanzar una severidad de 20.56. En los siguientes dos eventos extremos, no se observaron patrones temporales homogéneos entre las 4 regiones. Finalmente, los valores de probabilidades de

ocurrencia de los IPE-3 en cada una de las regiones se muestran en la Tabla 4.3. El porcentaje de meses con sequías comparado al total de meses evaluados es en promedio 16% similar en las 4 regiones. Sin embargo, existen variaciones entre las diferentes categorizaciones de sequías para cada una de las regiones. Así, las sequías moderadas van en el orden de 7.1% (Región 4) a 10.7% (Región 3); las sequías severas entre 3.4% (Región 1) y 5% (Región 3) y las sequías extremas entre 3.4% (Región 4) y 2.1% (Región 3). Los resultados de todos los eventos identificados de sequía a corto plazo en base al IPE-3 se muestran en el Anexo 8.3 (Tabla 8.1).

Tabla 4.1: Características de las sequías (IPE-3) para cada región homogénea en la CRM (periodo 1970-2010)

Región	Nº de eventos	Duración máxima	Intensidad máxima	Severidad máxima
Región 1	35	7	-3.24	13.15
Región 2	37	6	-2.94	14.08
Región 3	36	8	-3.13	15.73
Región 4	29	9	-3.30	20.56

Tabla 4.2: Eventos de sequías (IPE-3) más severas para cada región homogénea en la CRM (periodo 1970-2010)

Evento	Duración	Intensidad	Severidad	Inicio (año mes)	Fin (año mes)
Región 1					
17	7	-2.85	13.15	1991 12	1992 06
13	5	-3.24	11.38	1988 08	1988 12
33	5	-2.50	9.80	2008 03	2008 07
Región 2					
16	6	-2.82	14.08	1991 12	1992 05
31	6	-1.85	9.08	2005 02	2005 07
35	4	-2.94	8.83	2008 03	2008 06
Región 3					
22	7	-3.13	15.73	1991 12	1992 06
6	8	-2.27	12.24	1979 09	1980 04
31	7	-2.18	11.24	2005 03	2005 09
Región 4					
15	9	-3.30	20.56	1991 10	1992 06
13	6	-2.26	10.86	1989 12	1990 05
24	7	-2.84	10.76	2005 03	2005 09

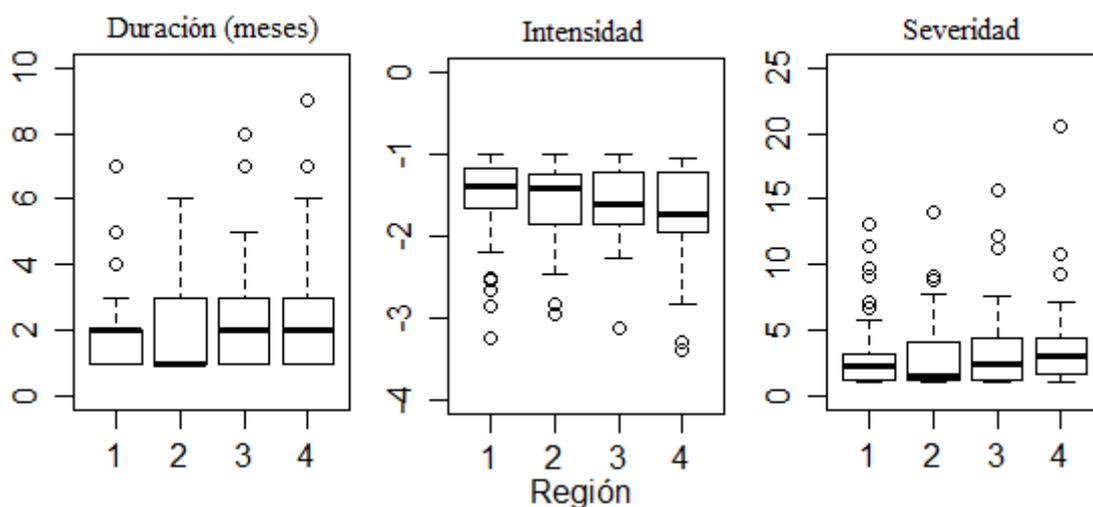


Figura 4.11: Diagrama de boxplot de duración, intensidad y severidad de los eventos de sequías (IPE-3) para cada región homogénea en la CRM (período 1970 – 2010).

Tabla 4.3: Probabilidad de ocurrencia de eventos de sequía (IPE-3) de intensidad moderada, severa y extrema para cada región en la CRM (período 1970 – 2010).

Intensidad de sequía	Región			
	1	2	3	4
No sequía	84.1	84.1	82.2	84.7
Moderada	10.0	9.6	10.7	7.1
Severa	3.4	3.6	5.0	4.8
Extrema	2.5	2.7	2.1	3.4

4.4.2 Sequías a largo plazo (IPE-12)

Utilizando el IPE-12 para cada una de las 4 series regionales de precipitación, se han obtenido la variación temporal del IPE-12 (1970-2010), el cual se muestra en la Figura 4.12. En general, se observa que la variabilidad del IPE-12 (con menor ruido que el IPE-3) es semejante en cada una de las 4 regiones.

Considerando las características de las sequías (ver Figura 3.6), para el IPE-12 en resumen en cada una de las regiones se ha construido la Tabla 4.4 y la Figura 4.13. Donde se observa que el número de eventos varía entre 10 (Región 4) a 15 (Región 1); la duración máxima en meses de estos eventos entre las 4 regiones están entre 15 a 22 meses; las intensidades máximas varían entre -2.95 y -3.63 y las severidades máximas van entre 33.67 y 54.32. En base a estos resultados las severidades e intensidades máximas se dan en la Región 4.

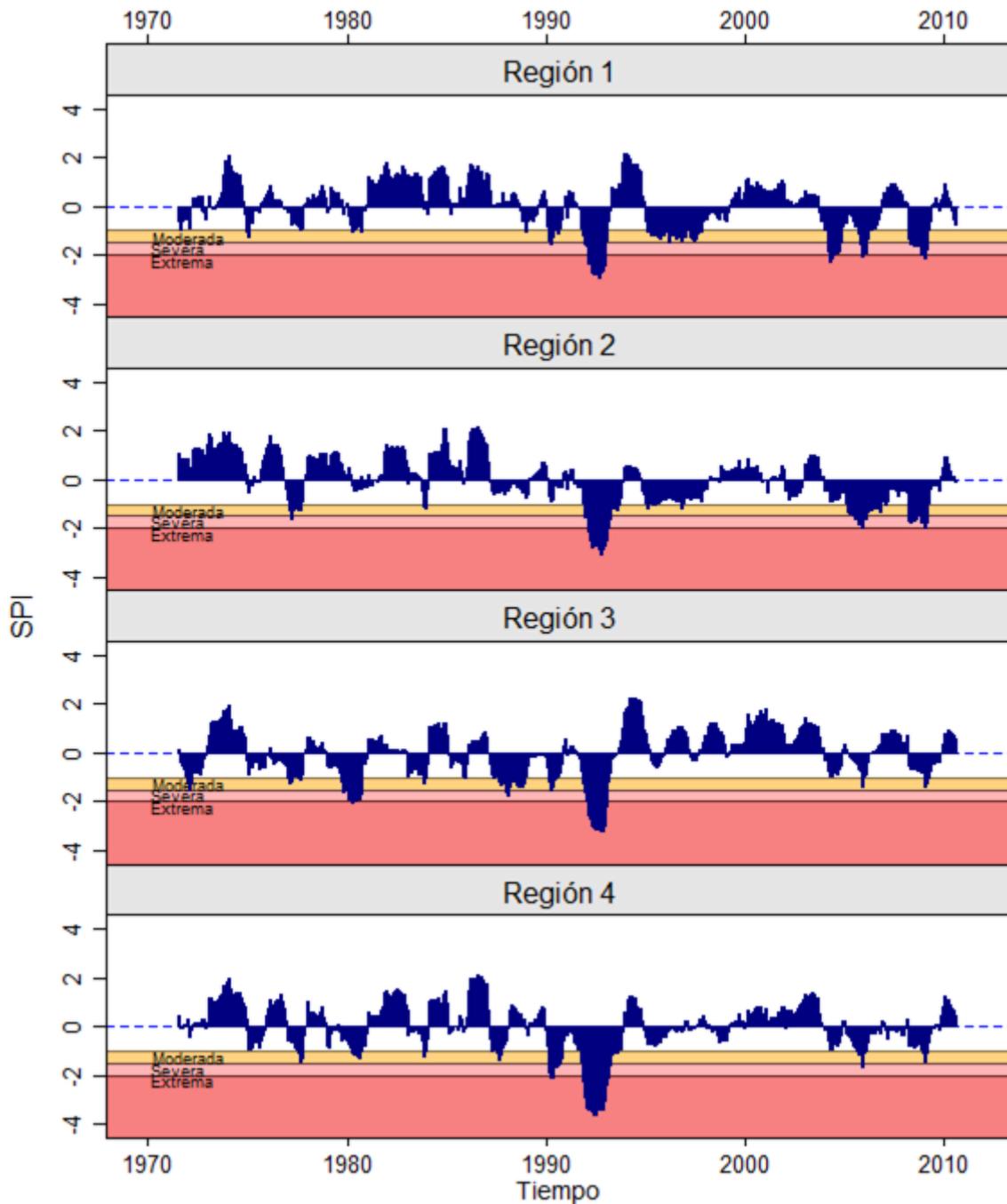


Figura 4.12: Evolución temporal de IPE-12 para cada región homogénea en CRM (período 1970 – 2010).

En orden de evaluar el período de tiempo exacto en los cuales se presentaron las sequías más extremas se han calendarizado los eventos más fuertes basado en las propiedades de las sequías de largo plazo (IPE-12). Así, la Tabla 4.5 muestra los tres eventos de sequías más fuertes en cada uno de las cuatro regiones con sus respectivas características estadísticas. Donde, se observa que el evento de sequía más extremo se da al mismo tiempo en las 4 regiones entre finales de 1991 hasta inicios de 1993; con

excepción de la región 2 en donde se extendió hasta setiembre de 1993; periodo en la cual también se observaron los eventos de sequía más extremos a corto plazo (IPE-3). Finalmente, los valores de probabilidades de ocurrencia de los IPE-12 en cada una de las regiones se muestran en la Tabla 4.6. El porcentaje de meses con sequías comparado al total de meses evaluados es en promedio 15 % en las 4 regiones. Sin embargo, existen variaciones entre las diferentes categorizaciones de sequías para cada una de las regiones. Así, las sequías moderadas van en el orden de 6.6% (Región 4) a 9% (Región 1); las sequías severas entre 1.3% (Región 4) y 4.9% (Región 1) y las sequías extremas entre 2.8% (Regiones 2 y 3) y 3.8% (Región 4). El inventario de todos los eventos identificados de sequía a largo plazo en base al IPE-12 se muestran en el Anexo 8.3 (Tabla 8.2).

Tabla 4.4: Características de las sequías (IPE-12) para cada región homogénea en la CRM (periodo 1970-2010)

Región	N° de eventos	Duración máxima	Intensidad máxima	Severidad máxima
Región 1	15	15	-2.95	33.67
Región 2	11	22	-3.06	44.20
Región 3	11	16	-3.22	40.19
Región 4	10	19	-3.63	54.32

Tabla 4.5: Eventos de sequías (IPE-12) más severas para cada región homogénea en la CRM periodo (1970-2010)

Evento	Duración	Intensidad	Severidad	Inicio (año mes)	Fin (año mes)
Región 1					
7	15	-2.95	33.67	1991 11	1993 01
15	11	-2.12	18.59	2008 04	2009 02
13	9	-2.26	16.35	2004 03	2004 11
Región 2					
4	22	-3.06	44.2	1991 12	1993 09
8	18	-1.96	26.34	2005 03	2006 08
11	12	-2.01	19.96	2008 03	2009 02
Región 3					
9	16	-3.22	40.19	1991 11	1993 02
4	12	-2.01	20.9	1979 10	1980 09
7	16	-1.75	20.86	1987 09	1988 12
Región 4					
7	19	-3.63	54.32	1991 10	1993 04
6	8	-2.13	13.85	1990 03	1990 10
9	7	-1.68	8.38	2005 08	2006 02

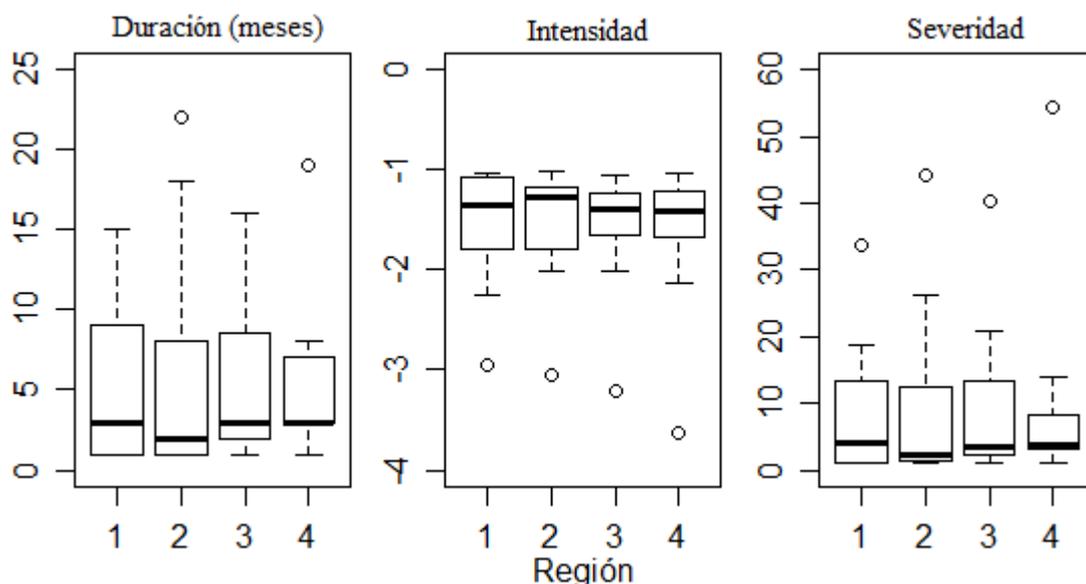


Figura 4.13: Diagrama de boxplot de duración, intensidad y severidad de los eventos de sequías (IPE-12) para cada región homogénea en la CRM (período 1970 – 2010).

Tabla 4.6: Probabilidad de ocurrencia de eventos de sequía (IPE-12) de intensidad moderada, severa y extrema para cada región en la CRM (período 1970 – 2010).

Intensidad de sequía	Región			
	1	2	3	4
No sequía	83.2	85.7	86.6	88.3
Moderada	9.0	7.5	7.3	6.6
Severa	4.9	4.1	3.4	1.3
Extrema	3.0	2.8	2.8	3.8

4.5 Análisis de tendencias de las sequías observadas

4.5.1 Tendencias de sequías observadas a corto plazo (IPE-3)

Para observar si las sequías en la CRM están incrementándose o disminuyendo, se realizó un análisis de tendencia para el IPE-3; pero con el objetivo de identificar más claro las tendencias solo se han escogido los valores trimestrales de la temporada lluviosa (primavera - SON, verano - DEF y otoño - MAM) dicha evaluación fue realizada en cada región homogénea en la CRM. Los resultados del análisis de tendencia se muestran en la Figura 4.14. Considerando los IPEs de SON, DEF y MAM no existen tendencias significativas en ninguna de las cuatro regiones consideradas por lo que podemos concluir que existe la estacionariedad de los IPE-3 para estos períodos.

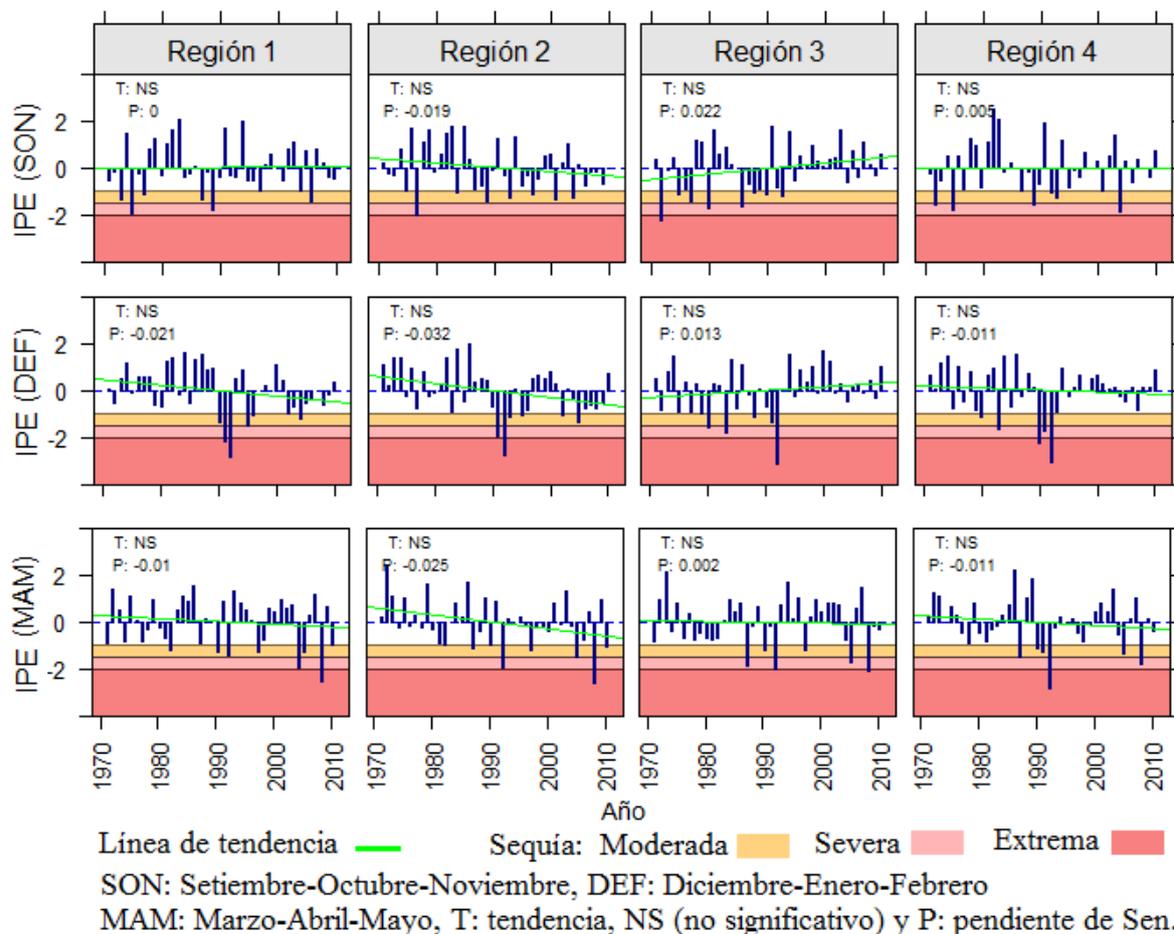


Figura 4.14: Análisis de tendencia de sequías a corto plazo (IPE-3) para las estaciones más lluviosas del año hidrológico (primavera - SON, verano - DEF y otoño - MAM) en cada región homogénea en la CRM (período 2030 – 2070).

4.5.2 Tendencias de sequías observadas a largo plazo (IPE-12)

Al igual que para el IPE-3 se ha realizado también el análisis de tendencia para el IPE-12, en este caso solo considerando los años hidrológicos (Septiembre del año i a Agosto del año $i+1$). Los resultados se muestran en la Figura 4.15 donde la región 2 a escala de año hidrológico muestra una tendencia significativa hacia el incremento de eventos de sequías anuales con una pendiente de Sen de -0.05, las demás regiones no presentan tendencias significativas.

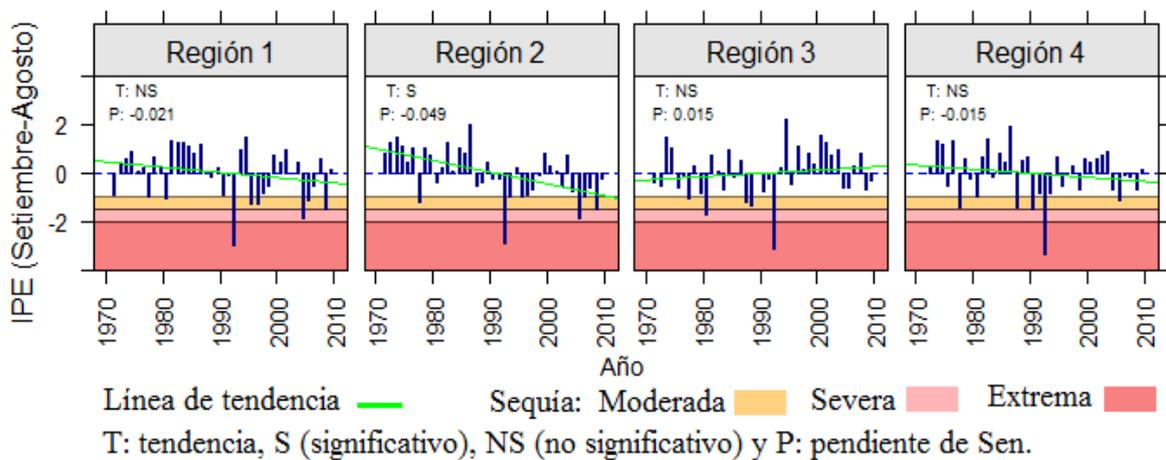


Figura 4.15: Análisis de tendencia de sequías a largo plazo (IPE-12) para el año hidrológico (Setiembre-Agosto) en cada región homogénea en la CRM (período 2030 – 2070).

4.6 Caracterización de las sequías proyectadas

Similar a la caracterización de las sequías observadas, el IPE fue utilizado para la caracterización de las sequías futuras tanto a corto plazo (IPE-3) y a largo plazo (IPE-12) para el periodo 2030-2070. Para este propósito la caracterización de las sequías futuras por cada región homogénea se ha realizado utilizando las estaciones de SENAMHI con datos de precipitación proyectada para el periodo 2030-2070 para los dos escenarios de emisión (RCP4.5 y RCP8.5) en base a los tres modelos de circulación global – GCM (CanESM2, CNRM-CM5 y MPI-ESM-MR). Así, las regiones 1, 2, 3 y 4 fueron caracterizadas en base a 2 (Marcapomacocha y Carhuacayan), 3 (Jauja, Ingenio y Huayao), 1 (Huancalpi) y 3 (Pilchaca, Lircay y Acobamba) estaciones respectivamente (Figura 4.16). Cabe señalar que tanto el IPE-3 e IPE-12, así como las características de las sequías (duración, intensidad, severidad y probabilidad de ocurrencia) fueron estimados independientemente para cada estación, escenario de emisión y GCM; luego los resultados fueron resumidos realizando promedios entre ellos ("ensamblados") ya sea por GCM o escenario de emisión para caracterizar estadísticamente las sequías futuras para cada región homogénea.

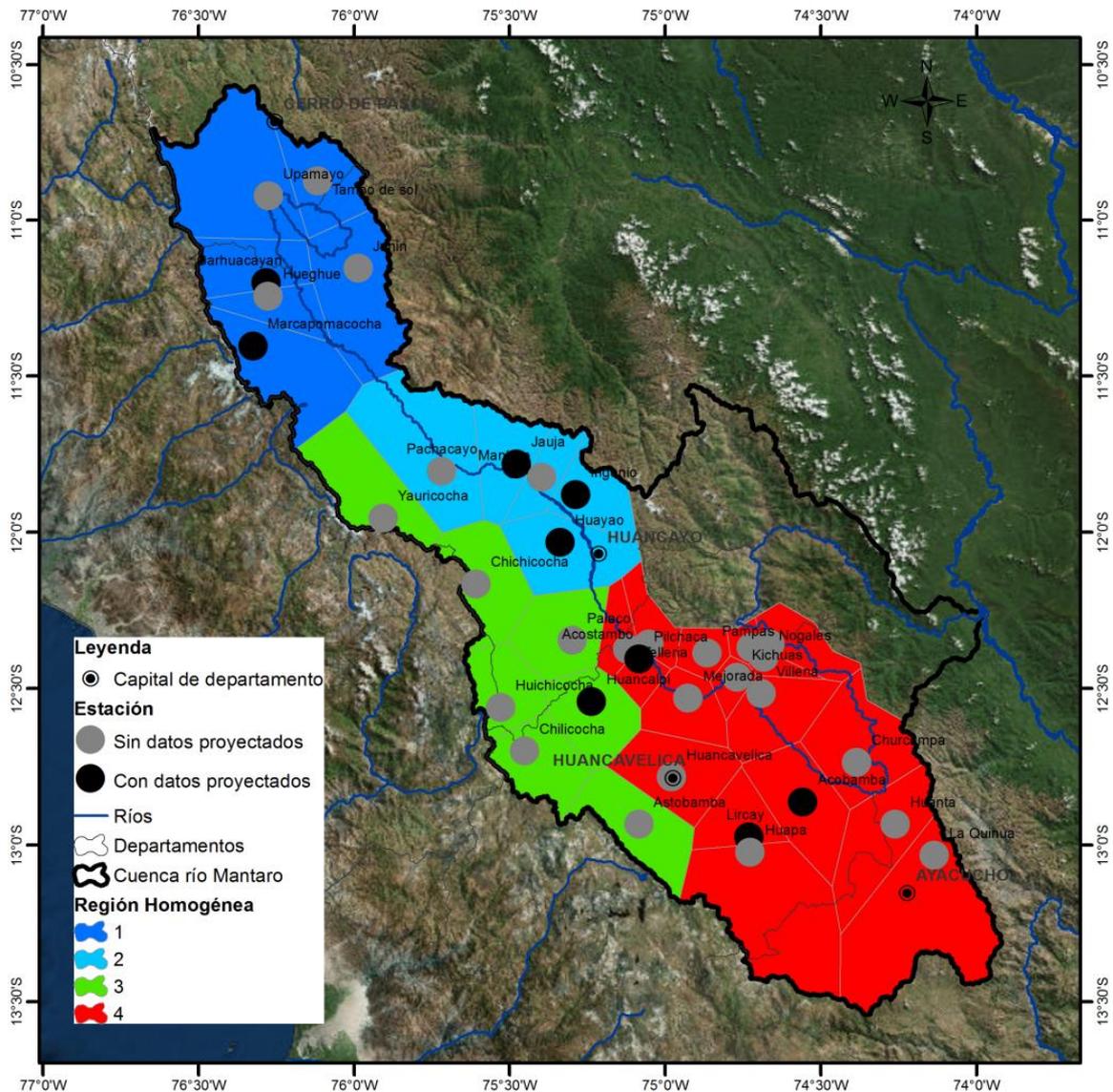


Figura 4.16: Distribución espacial de las estaciones pluviométricas con datos proyectados de precipitación para el periodo 2030-2070.

4.6.1 Sequías proyectadas a corto plazo (IPE-3)

Con el objetivo de evaluar las distribuciones teóricas de los IPE-3 tanto históricas como futuras, se han construido para cada región homogénea en la CRM las funciones de densidad de probabilidad (FDP). Así, la Figura 4.17 muestra para cada región homogénea en la CRM la FDP tanto del IPE-3 histórico (período de referencia 1970-2010) y de los IPE-3 futuros (periodo 2030-2070) dados por los GCM (CanESM2, CNRM-CM5 y MPI-ESM-MR) para cada uno de los escenarios de emisión (RCP4.5 y RCP8.5). En general, se observa que las FDP históricas y futuras son similares en todas las regiones para ambos escenarios de emisión (RCP4.5 y RCP8.5). Lo cual demuestra que similares valores

observados de IPE-3 en el período de referencia (1970-2010) se podrían presentar en el futuro (2030-2070) bajo ambos escenarios de emisión (RCP4.5 y RCP8.5).

Para observar mejor las características (duración, intensidad y severidad) de los eventos de sequías a corto plazo (IPE-3) tanto de las sequías históricas y futuras; se han construido los diagramas de boxplot (Figura 4.18) para cada región homogénea en la CRM. De acuerdo a la Figura 4.18, en general no se observan diferencias significativas entre las características de las sequías históricas y futuras. Sin embargo, los diagramas de boxplot muestran claramente que la gama de los valores de las duraciones de los eventos de sequía en el futuro serán similares a las duraciones observadas en el periodo de referencia (1970-2010); siendo incluso menores las intensidades y severidades de las sequías proyectadas en comparación a las intensidades de sequía extrema observada como en la sequía de 1991-1992. Para mayor claridad de las diferencias entre las sequías históricas (periodo 1970-2010) y futuras (2030-2070) en la Tabla 4.7 se muestra la cantidad de eventos de sequía, duración máxima, intensidad máximas y la severidad máxima de las sequías para cada región homogénea y escenario de emisión.

Así, con respecto al número de eventos de sequías de corto plazo (IPE-3) se observa que en las cuatro regiones habrán más eventos de sequías en el futuro (2030-2070) que los eventos de sequía observados en el periodo de referencia (1970-2010) en ambos escenarios de emisión; incrementando estos de 10.3% (región 4) hasta 46.9% (región 3) para el escenario de emisión RCP4.5 y de 12.8% (región 4) hasta 37.5% (región 3) para RCP8.5. En consecuencia, la región homogénea 3 experimentará mayor cantidad de eventos de sequía a corto plazo en el futuro.

Mientras tanto, comparando las duraciones máximas de los eventos de sequía histórica y futuras; no se observan diferencias marcadas en estas duraciones. Sin embargo, la región 2 sería donde las duraciones máximas podrían incrementar en un mes (de 8 meses a 9 meses) bajo ambos escenarios de emisión y la región 3 sufriría un incremento de un mes para el escenario RCP4.5.

En cuanto a las intensidades y severidades máximas se observa que los eventos de sequías en el futuro serían a la vez menos intensos y severos que las sequías históricas en las regiones 1, 2 y 4, para el caso de la región 2 sólo la severidad máxima se incrementaría

en 4.9% para el escenario RCP8.5 y en la región 3 para el escenario RCP4.5, las intensidades serían 15.4% más intensos y 14.5% más severos.

Finalmente, la Tabla 4.8 muestra la caracterización de las sequías históricas y futuras con respecto a las probabilidades de ocurrencia (PO) de las diferentes categorías de la sequía en función de la intensidad (moderada, severa y extrema). Para la discusión de los resultados se estimó la diferencia porcentual entre la PO futura e histórica. Así, se ha encontrado en resumen que:

- La PO de las sequías (IPE<-1) mayormente muestran un incremento no tan significativo de las frecuencias de sequías para las regiones 2, 3 y 4; en el caso de la región 1 se mantiene para el escenario RCP8.5 y un ligero decremento para el escenario RCP4.5 con respecto al histórico.
- Las PO para las sequías moderadas y severas, también muestran en la mayoría de los casos analizados incrementos pero no tan significativos con algunas disminuciones de sequías severas en las regiones 1 y 3 para el escenario RCP4.5, con variaciones insignificantes.
- Las PO para las sequías extremas contrario a las otras categorías no muestra incrementos de estos eventos, ya que en todas las regiones y todos los escenarios muestran que estos eventos disminuirán. Sin embargo la variación porcentual es mínima.

Tabla 4.7: Características de las sequías proyectadas (IPE-3) para cada región homogénea en la CRM (periodo 2030-2070)

Región	Escenario de Emisión	N° de eventos	Duración máxima	Intensidad máxima	Severidad máxima
1	Histórico	34	13	-4.8	35.5
	RCP4.5	42	9	-3.6	14.2
	RCP8.5	39	10	-3.6	19.3
2	Histórico	38	8	-4.3	16.3
	RCP4.5	43	9	-4.2	16.2
	RCP8.5	45	9	-3.1	17.1
3	Histórico	32	9	-2.6	16.6
	RCP4.5	47	10	-3.0	19.0
	RCP8.5	44	7	-2.6	14.2
4	Histórico	39	10	-4.0	26.6
	RCP4.5	43	9	-3.4	13.3
	RCP8.5	44	9	-3.7	18.1

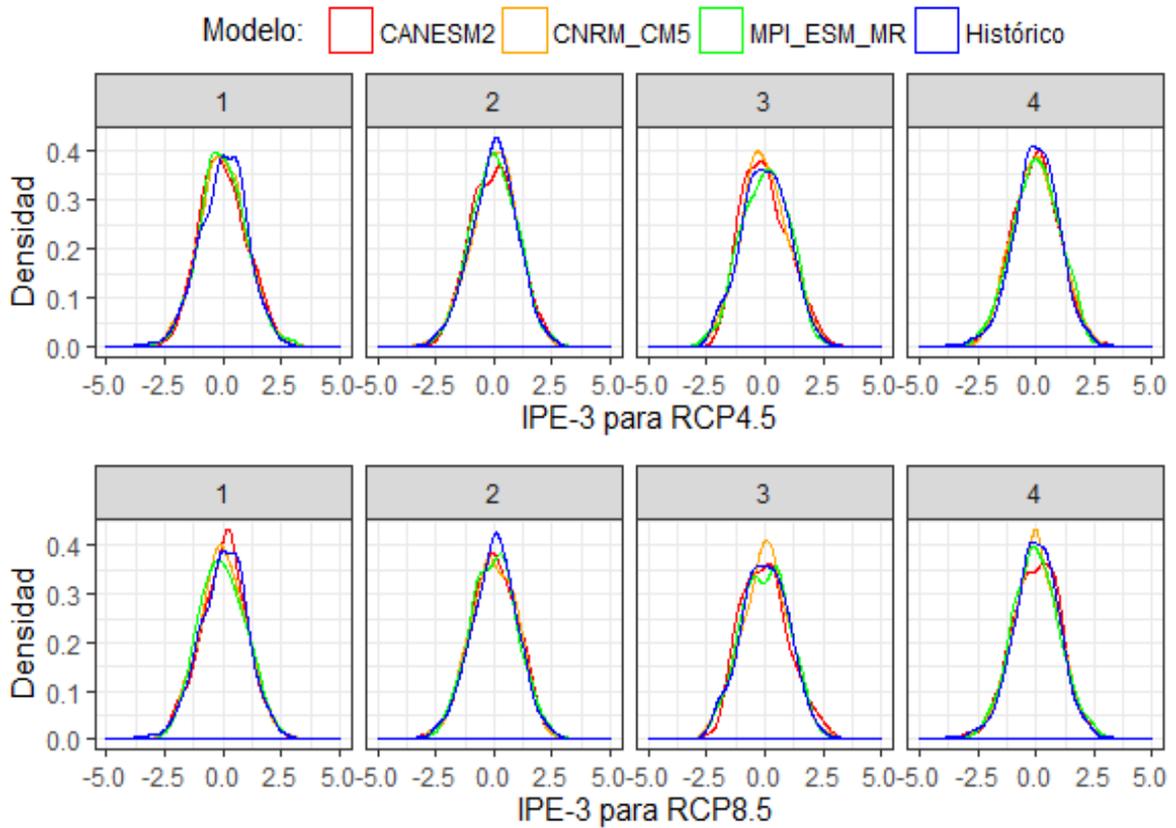


Figura 4.17: Arriba (Abajo) se muestra para cada región homogénea en la CRM la función de densidad de probabilidad de IPE-3 histórico y IPE-3 proyectado por cada modelo para el escenario de emisión RCP4.5 (RCP8.5). Histórico (proyectado) corresponde al IPE del periodo base (futuro) de 1970-2010 (2030-2070).

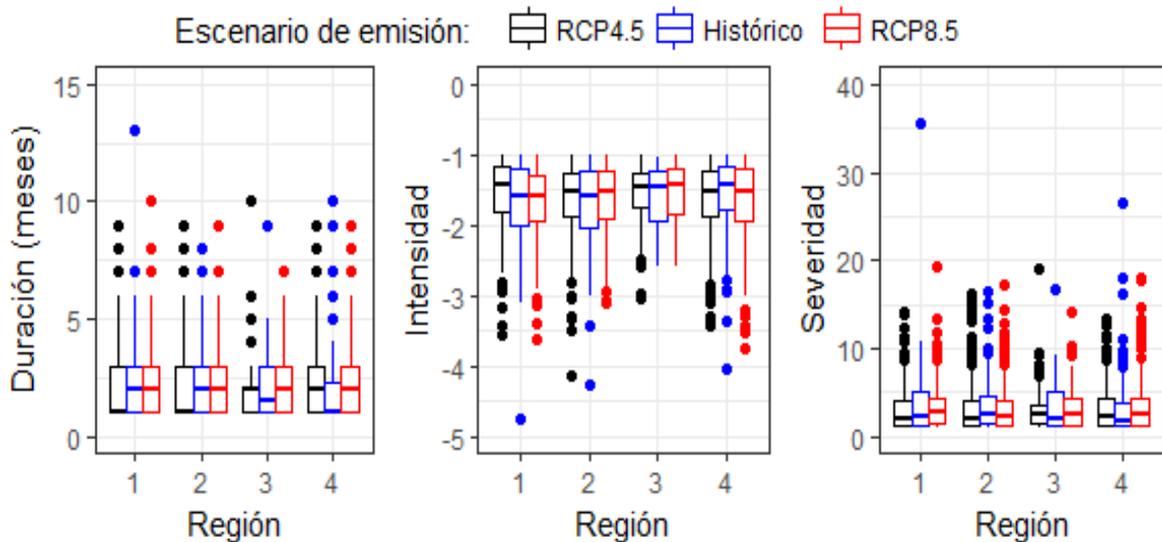


Figura 4.18: Diagrama de boxplot de duración, intensidad y severidad de los eventos de sequías proyectadas (IPE-3) para cada región homogénea en la CRM (período 2030 – 2070).

Tabla 4.8: Probabilidad de ocurrencia de eventos de sequía proyectada (IPE-3) de intensidad moderada, severa y extrema para cada región en la CRM (período 2030 – 2070).

Región	Escenario de Emisión	No sequía	Sequía			
			Total	Moderada	Severa	Extrema
1	Histórico	84.0	16.0	8.3	4.9	2.8
	RCP4.5	84.2	15.8	9.2	4.3	2.2
	RCP8.5	84.0	16.0	9.0	5.0	2.1
2	Histórico	84.6	15.4	8.6	4.0	2.9
	RCP4.5	83.7	16.3	9.1	4.8	2.4
	RCP8.5	83.8	16.2	9.2	4.7	2.3
3	Histórico	84.7	15.3	7.7	4.8	2.7
	RCP4.5	84.1	15.9	9.8	4.3	1.7
	RCP8.5	82.4	17.6	10.8	4.9	2.0
4	Histórico	85.6	14.4	8.1	3.5	2.9
	RCP4.5	83.6	16.4	9.7	4.5	2.3
	RCP8.5	84.0	16.0	9.1	4.4	2.4

4.6.2 Sequías proyectadas a largo plazo (IPE-12)

Al igual que lo mostrado en el IPE-3 se han construido FDP presentes y futuras, a fin de evaluar la variabilidad de las series de IPE-12 presentes y futuros para cada región homogénea y para cada uno de los escenarios y sus respectivos modelos. Así, la Figura 4.19 muestra para cada región homogénea en la CRM las FDP de los IPE-12 histórico y futuro para cada uno de los modelos de escenarios de emisión (RCP4.5 y RCP8.5), los cuales corresponden a las series del IPE-12 presente (1970-2010) y futuro (2030-2070) de los diferentes modelos utilizados. En general, se observa que el patrón más claro de cambio se da en la región 3 donde las FDP futuras cambian respecto a las FDP presente sobre todo en el incremento de las series categorizadas como "normales" pero para analizar a detalle más variaciones entre las series del IPE-12 presentes y futuras, se deben evaluar los eventos de sequía (Figura 3.6).

Para observar mejor las variaciones entre los IPE-12 presentes y futuros pero considerando la duración, intensidad y severidad de los eventos de sequías, se han construido diagramas de boxplot (Figura 4.20) para cada región homogénea en la CRM (período 2030 – 2070). Donde se aprecia que la variabilidad futura en las cuatro regiones de la duración, intensidad y severidad de las sequías proyectadas respecto al histórico no presentan una señal clara y como en el caso del IPE-3 se observan también varios valores

anómalos ("outliers") sin un patrón claro. Así, para diferenciar más a detalle algunos cambios entre las sequías presentes y futuras se ha elaborado una Tabla que detalla con mayor claridad las diferencias entre las sequías históricas y futuras basados en los eventos de sequía (ver Figura 3.6).

La Tabla 4.9 muestra las características de las sequías futuras (IPE-12) para cada región homogénea en la CRM durante el periodo 2030-2070 utilizando las estaciones descritas en la sección anterior. Se puede observar que considerando el número de eventos de sequías y las duraciones máximas en el futuro (2030-2070) versus las sequías históricas (1970-2010) en tres de las cuatro regiones (1,2 y 3) para el futuro habrán más eventos de sequías, siendo estas más numerosas en las regiones 1 y 2 para los escenarios RCP8.5 (incremento de más de 10 eventos); la región 4 mantendrá el número de eventos de sequías estables. Las duraciones máximas de estos eventos de sequías solo presentan un incremento en la región 4 (ambos escenarios y hasta 6 meses en RCP8.5) y región 2 (RCP4.5 en 12 meses).

En cuanto a las intensidades y severidades máximas los cambios futuros muestran en la mayoría de las regiones cambios hacia la disminución con mayor claridad en la región 1; y en menor medida en las regiones 2 y 3 considerando el escenario RCP8.5, y en la región 4 considerando el escenario RCP4.5. Llegando en el caso de la región 2 a incrementos de hasta 11% y 20% para intensidades máximas y severidades máximas. Algunos incrementos para las intensidades y severidades máximas también se han estimado para la región 4 (RCP8.5) siendo estas poco significativas (menos del 3%).

Para el IPE-12 se han cuantificado las probabilidades de ocurrencia (PO) de eventos de sequía futura, considerando las categorías de moderada, severa y extrema para cada región en la CRM. Así, la Tabla 4.10 muestra las sequías históricas (1970-2010) y las sequías futuras (2030-2070). Estimando la PO y considerando las diferencias entre las sequías futuras y presentes, se ha encontrado en resumen para el IPE-12:

- La PO de las sequías (IPE<-1) muestra que en el futuro en todos los casos se incrementaría las PO, siendo más notable en la región 4 para ambos escenarios, alcanzando un incremento de hasta 19% para el RCP8.5 con respecto al histórico.

- Las PO de las sequías moderadas muestran claramente que bajo ambos escenarios de emisión (RCP4.5 y RCP8.5) se presentaría mayor PO de estas sequías en el futuro (2030-2070) en comparación a los históricos en todas las regiones.
- Las PO para las sequías severas muestran menor (mayor) PO de sequías severas en las regiones 1 y 2 (3 y 4) para ambos escenarios en comparación a la PO histórico. Se puede apreciar que existe una disminución de hasta el 21% en la región 1 para el RCP4.5, y del 20% en la región 2 para el RCP8.5; por otro lado, incrementos del 28% y 61% para las regiones 3 y 4 respectivamente para el escenario RCP8.5.
- Las PO de las sequías extremas bajo ambos escenarios muestran en general disminución de PO de estos eventos respecto a los históricos en todas las regiones, con excepción de la región 1 para el escenario RCP8.5.

Tabla 4.9: Características de las sequías proyectadas (IPE-12) para cada región homogénea en la CRM (periodo 2030-2070)

Región	Escenario de Emisión	Nº de eventos	Duración máxima	Intensidad máxima	Severidad máxima
1	Histórico	12	34	-4.6	58.8
	RCP4.5	20	29	-2.7	44.1
	RCP8.5	24	28	-3.1	49.8
2	Histórico	12	26	-3.3	50.7
	RCP4.5	20	38	-3.7	61.0
	RCP8.5	22	20	-3.1	41.1
3	Histórico	10	34	-2.9	63.7
	RCP4.5	16	30	-3.1	45.0
	RCP8.5	11	20	-2.8	31.7
4	Histórico	21	17	-3.7	48.6
	RCP4.5	22	22	-3.3	42.1
	RCP8.5	20	23	-3.8	50.0

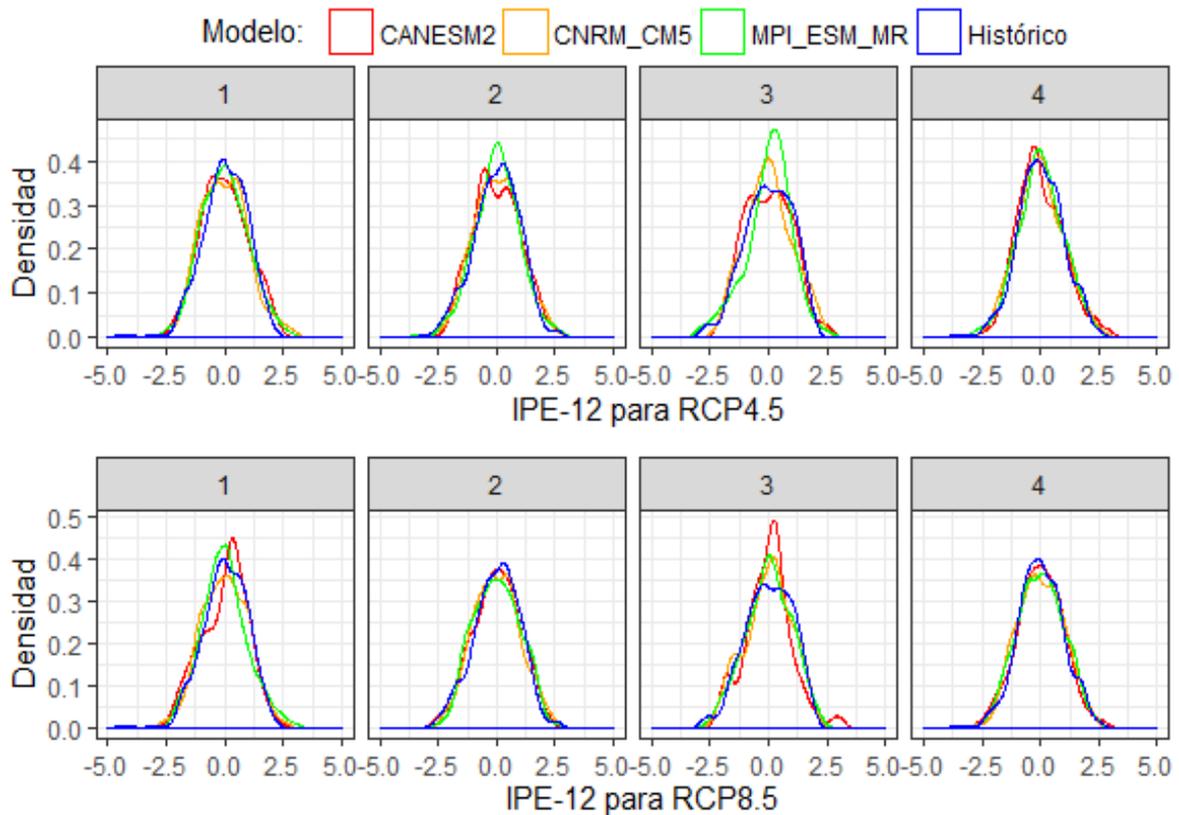


Figura 4.19: Arriba (Abajo) se muestra para cada región homogénea en la CRM la función de densidad de probabilidad de IPE-12 histórico y IPE-12 proyectado por cada modelo para el escenario de emisión RCP4.5 (RCP8.5). Histórico (proyectado) corresponde al IPE del periodo base (futuro) de 1970-2010 (2030-2070).

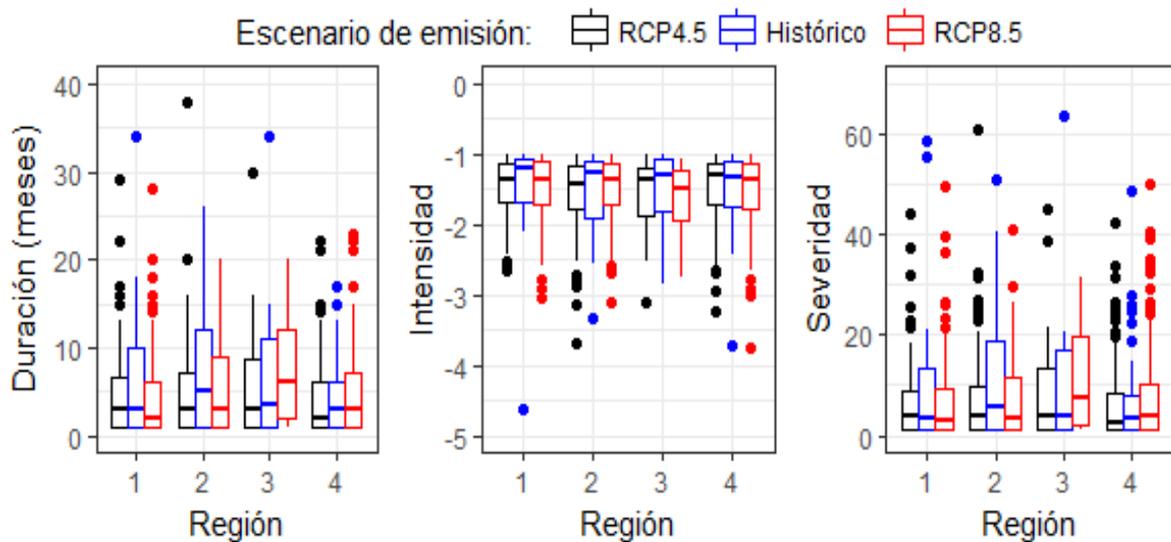


Figura 4.20: Diagrama de boxplot de duración, intensidad y severidad de los eventos de sequías proyectadas (IPE-12) para cada región homogénea en la CRM (período 2030 – 2070).

Tabla 4.10: Probabilidad de ocurrencia de eventos de sequía proyectada (IPE-12) de intensidad moderada, severa y extrema para cada región en la CRM (período 2030 – 2070).

Región	Escenario de Emisión	No sequía	Sequía			
			Total	Moderada	Severa	Extrema
1	Histórico	84.5	15.5	8.4	5.3	1.7
	RCP4.5	83.4	16.6	10.8	4.2	1.6
	RCP8.5	82.8	17.2	10.1	4.9	2.2
2	Histórico	84.6	15.4	6.8	5.5	3.1
	RCP4.5	83.9	16.1	9.5	4.7	1.8
	RCP8.5	82.6	17.4	10.8	4.4	2.2
3	Histórico	83.6	16.4	8.5	5.3	2.6
	RCP4.5	83.2	16.8	9.5	5.2	2.1
	RCP8.5	83.4	16.6	7.7	6.8	2.1
4	Histórico	86.3	13.7	7.9	3.1	2.7
	RCP4.5	84.2	15.8	9.9	4.1	1.9
	RCP8.5	83.7	16.3	9.4	5.0	1.9

V. CONCLUSIONES

Objetivos Específico 1: Realizar el análisis exploratorio de datos.

El 1.1% del total de datos de precipitación mensual (196 de 17760 datos) se encontraron fuera del límite superior del intervalo de confianza en el diagrama de Boxplot; sin embargo no fueron catalogados como datos atípicos ya que los datos de precipitación fueron registrados en meses de temporada de lluvias y sus magnitudes han sido registradas en las estaciones vecinas. Por lo tanto no se ha reportado presencia de datos atípicos en este estudio.

Objetivos Específico 2: Caracterizar y regionalizar las series de tiempo de precipitación a escala interanual en la cuenca del río Mantaro.

Se identificaron cuatro regiones homogéneas en la cuenca del río Mantaro: Espacialmente, 3 regiones colindan con la divisoria de la vertiente del Pacífico (regiones 1, 3 y 4) y una está hacia el norte de la CRM (región 2). La región 1 es donde las tasas de precipitaciones son mayores con una contribución promedio anual de 886 mm, seguida por la región 3 (751 mm), región 2 (701 mm) y finalmente la región 4 (685 mm). Las 2 regiones más lluviosas: región 1 localizada en la parte nor-oeste de la CRM, se encuentra a una elevación promedio de 4250 m.s.n.m.; región 3 localizada en la parte occidental de la CRM se encuentra a una elevación promedio de 4500 m.s.n.m. Por otra parte, las 2 regiones con menor tasa de precipitación anual: región 2 localizada en la parte Norte pero central de la CRM (Valle del Mantaro), se encuentra a una elevación promedio de 3420 m.s.n.m.; región 4 localizada en la parte sur-este de la CRM se encuentra a una elevación promedio de 3200 m.s.n.m. En las cuatro regiones el ciclo mensual de la lluvia es similar, siendo el periodo húmedo de Septiembre a Abril y el periodo seco de Mayo a Agosto.

Objetivos Específico 3: Realizar la caracterización espacio-temporal y sus tendencias de las sequías históricas en las regiones homogéneas de la cuenca del río Mantaro.

En base a las cuatro regiones identificadas, se ha realizado la caracterización de las sequías históricas en el periodo de referencia (1970-2010) basados en sus características de

duración, severidad, intensidad y sus probabilidades de ocurrencia (PO) tanto para las sequías de corto plazo utilizando el IPE-3 y las sequías de largo plazo (IPE-12).

Respecto a las sequías de corto plazo (IPE-3), en cuanto a la cantidad de eventos, duración e intensidad de las sequías; las regiones 1, 2 y 3 presentan mayores impactos de sequía. Sin embargo, considerando la severidad de la sequía; es en la región 4 donde se presentaron condiciones más severas. El número promedio de eventos de sequías observadas en el periodo de referencia en las cuatro regiones es de 34. La duración de estos eventos de sequías van entre 6 (región 2) a 9 meses (región 4). En cuanto al evento más fuerte de sequía (más severa y más intensa), es coincidente en las cuatro regiones ya que en general empezó a finales del año 1991 hasta mediados de 1992, siendo este el período más seco en la CRM en el período 1970-2010. Se encontró que las sequías a corto plazo tienen una probabilidad de ocurrencia promedio de 16% en las 4 regiones, siendo notable que en región 3 se presenta el menor porcentaje de probabilidad de ocurrencia (2.1%) de eventos de sequía extrema. El análisis de tendencia de sequías a corto plazo (IPE-3) no muestra tendencias de sequías significativas en todas las regiones, por cuanto existe estacionariedad en el período analizado.

Para las sequías de largo plazo (IPE-12), el número de eventos identificados es mucho mayor en la región 1 (15 eventos) que en las demás regiones (10 eventos en promedio). La duración máxima se presenta en la región 2 (22 meses) variando los demás eventos de sequía entre 15 (región 1) a 19 meses (región 4). Sin embargo, considerando la severidad de la sequía; es en la región 4 también donde se presentaron condiciones más severas. En cuanto al evento más fuerte de sequía (más severa y más intensa), es coincidente en las cuatro regiones ya que en promedio empezó a fines de año 1991 llegando hasta setiembre de 1993 (región 2). Las probabilidades de ocurrencia de sequías basadas en el IPE-12 muestran que la región 1 es la que presenta mayor PO (17%) siendo en orden descendente para las regiones 2, 3 y 4 respectivamente. Las tendencias para las sequías utilizando el IPE-12 y solo considerando para los años hidrológicos se concluye que solo la región 2 muestra una tendencia significativa hacia el incremento de eventos de sequías anuales en el período analizado.

Objetivos Específico 4: Caracterizar las sequías proyectadas bajo escenarios del cambio climático en las regiones homogéneas de la cuenca del río Mantaro.

En base a las sequías proyectadas para el período 2030-2070 se puede concluir que:

- Considerando las sequías de corto plazo (IPE-3), en las 4 regiones se presentarán más eventos de sequías en el futuro (2030-2070); incrementándose en mayor porcentaje en la región 3 con 46.9 y 37.5% para los escenarios de emisión RCP4.5 y RCP8.5 respectivamente en referencia a las sequías históricas (periodo 1970-2010). Las sequías severas serían 4.9% (14.5%) más severas que las históricas en la región 2 (3) de acuerdo al escenario de emisión RCP8.5 (RCP4.5), mientras en las otras regiones se esperaría eventos de sequía menos severos que las sequías históricas más severas observadas como la del año 1991-1992 en ambos escenarios de emisión. Además, las PO de las sequías extremas (IPE-3) muestran que estos eventos disminuirán, sin embargo estas disminuciones no son tan significativos.
- Considerando las sequías a largo plazo (IPE-12), las sequías proyectadas en tres de las cuatro regiones (1,2 y 3) presentarían más eventos de sequías bajo ambos escenarios de emisión (RCP4.5 y RCP8.5). La duración de las sequías proyectadas serían mayores a los históricos principalmente en la región 2 y 4 para ambos escenarios de emisión. Mientras tanto, las intensidades y severidades máximas de las sequías proyectadas serán menos intensos y severos que los históricos en todas las regiones, excepto en la región 2 donde se presentaría sequías 11% más intensos y 20% más severos para el escenario RCP4.5. Finalmente, en general las PO de las sequías extremas (IPE-12) muestran para las cuatro regiones disminución de estos eventos.

VI. RECOMENDACIONES

A continuación se dan algunas recomendaciones y sugerencias para futuras investigaciones y desarrollo de estudios afines.

- Se recomienda que previa a la aplicación de la metodología del Índice de Precipitación Estandarizado (IPE), el análisis exploratorio de datos sea robusto y resistente a la distribución de datos, de manera tal que permita efectuar una completación de datos faltantes cuyos resultados otorguen una mejor certidumbre sobre la naturaleza de lo que se desea realizar.
- Se recomienda extender la investigación de la caracterización de las sequías en otras cuencas alto-andinas, así como otras del territorio del país con mayor impacto socioeconómico, con la finalidad de conocer y entender la variabilidad espacio-temporal de las sequías bajo diferentes condiciones climáticas.
- Se recomienda ampliar investigaciones sobre la relación entre los procesos océano-atmosféricos y sus efectos en los eventos extremos de sequía en el Perú.
- Se recomienda generar a través de la investigación, alertas de peligro y vulnerabilidad futura de las sequías bajo escenarios de cambio climático para una mejor toma de decisión en el proceso de aprovechamiento, manejo, operación y control de los recursos hídricos en la CRM y a nivel nacional.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Acuña, J., Felipe, O., Ordoñez, J., Arboleda, F., 2011. Análisis Regional de la frecuencia de precipitaciones anuales para la determinación de mapas de sequías. *Rev. Peru GEO-ATMOSFÉRICA RPGA II*, 104–115.
- Ancil, F., Larouche, W., Viau, A.A., Parent, L.-étienne, 2002. Exploration of the standardized precipitation index with regional analysis. *Can. J. Soil Sci.*
- Andreadis, K.M., Clark, E.A., Wood, A.W., Hamlet, A.F., Lettenmaier, D.P., 2005. Twentieth-Century Drought in the Conterminous United States. *J. Hydrometeorol.* 6, 985–1001. doi:10.1175/JHM450.1
- Beguiría, S., Vicente-Serrano, S.M., 2017. SPEI Calculation of the Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index.
- Bell, G.D., Halpert, M.S., Schnell, R.C., Higgins, R.W., Lawrimore, J., Kousky, V.E., Tinker, R., Thiaw, W., Chelliah, M., Artusa, A., 1999. Climate assessment for 1999. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 81, 1–48. doi:10.1175/1520-0477(2000)81[s1:CAF]2.0.CO;2
- Brando, P.M., Balch, J.K., Nepstad, D.C., Morton, D.C., Putz, F.E., Coe, M.T., Silvério, D., Macedo, M.N., Davidson, E. a, Nóbrega, C.C., Alencar, A., Soares-Filho, B.S., 2014. Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought-fire interactions. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 111, 6347–52. doi:10.1073/pnas.1305499111
- Bras, R.L., 1990. *Hydrology: an introduction to hydrologic science*, Addison-Wesley series in civil engineering. Addison-Wesley.
- Bryant, E., 2005. *Natural Hazards*, Cambridge University Press.
- Burke, E.J., Brown, S.J., Christidis, N., 2006. Modeling the Recent Evolution of Global Drought and Projections for the Twenty-First Century with the Hadley Centre Climate Model. *J. Hydrometeorol.* 7, 1113–1125. doi:10.1175/JHM544.1
- Carvajal-Velez, L., 2008. *Human Development Report 2007 / 2008 Impacts of Climate Change on Human Development*.
- Chylek, P., Li, J., Dubey, M.K., Wang, M., Lesins, G., 2011. Observed and model

- simulated 20th century Arctic temperature variability: Canadian Earth System Model CanESM2.
- CNULD, 1994. Convencion Internacional de Lucha contra la sedertificación en los países afectados por sequía grave o desertificación, en particular en Africa.
- Cook, B.I., Ault, T.R., Smerdon, J.E., 2015. Unprecedented 21st century drought risk in the American Southwest and Central Plains. *Sci. Adv.* 1, e1400082–e1400082. doi:10.1126/sciadv.1400082
- Curi-Tapahuasco, S., 2017. Caracterización de las sequías hidrológicas en la vertiente peruana del océano pacífico. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Dai, A., 2012. Increasing drought under global warming in observations and models. *Nat. Clim. Chang.* 3, 52–58. doi:10.1038/nclimate1633
- Dai, A., 2011. Drought under global warming: A review. *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Chang.* 2, 45–65. doi:10.1002/wcc.81
- Dai, A., Trenberth, K.E., Qian, T., 2004. A Global Dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870–2002: Relationship with Soil Moisture and Effects of Surface Warming. *J. Hydrometeorol.* 5, 1117–1130. doi:10.1175/JHM-386.1
- Domonkos, P., 2003. Recent Precipitation Trends in Hungary in the Context of Larger Scale Climatic Changes 255–271.
- Easterling, D.R., Evans, J.L., Groisman, P.Y., Karl, T.R., Kunkel, K.E., Ambenje, P., 2000. Observed variability and trends in extreme climate events: A brief review. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 81, 417–425. doi:10.1175/1520-0477(2000)081<0417:OVATIE>2.3.CO;2
- Espinoza, J.C., Ronchail, J., Guyot, J.L., Cochonneau, G., Naziano, F., Lavado, W., De Oliveira, E., Pombosa, R., Vauchel, P., 2009. Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, and Ecuador). *Int. J. Climatol.* 29, 1574–1594. doi:10.1002/joc.1791
- Espinoza, J.C., Ronchail, J., Guyot, J.L., Junquas, C., Vauchel, P., Lavado, W., Drapeau, G., Pombosa, R., 2011. Climate variability and extreme drought in the upper Solimões River (western Amazon Basin): Understanding the exceptional 2010 drought. *Geophys. Res. Lett.* 38, 1–13. doi:10.1029/2011GL047862
- Falvey, M., Garreaud, R.D., 2005. Moisture variability over the South American Altiplano during the South American Low Level Jet Experiment (SALLJEX) observing season. *J. Geophys. Res.* 110, D22105. doi:10.1029/2005JD006152
- Farhangfar, S., Bannayan, M., Khazaei, H.R., Baygi, M.M., 2015. Vulnerability

- assessment of wheat and maize production affected by drought and climate change. *Int. J. Disaster Risk Reduct.* 13, 37–51. doi:10.1016/j.ijdr.2015.03.006
- Feng, L., Nowak, G., O'Neill, T.J., Welsh, A.H., 2014a. CUTOFF: A spatio-temporal imputation method. *J. Hydrol.* 519, 3591–3605. doi:10.1016/j.jhydrol.2014.11.012
- Feng, L., Nowak, G., Welsh, A.H., O'Neill, T.J., 2014b. cutoffR: CUTOFF: A Spatio-temporal Imputation Method.
- Fernández, B., 1997. Identificación y Caracterización de Sequías Hidrológicas en Chile Central. *Ing. del Agua* 4, 37–46.
- Garreaud, R., 1999. Multiscale analysis of the summertime precipitation over the central Andes. *Mon. Weather Rev.* 127, 901–921.
- GCCIP, 1997. Global Climate Change Information Programme.
- Ge, Y., Apurv, T., Cai, X., 2016. Spatial and Temporal Patterns of Drought in the Continental U.S. during the Past Century. *Geophys. Res. Lett.*
doi:10.1002/2016GL069660
- Guttman, N.B., 1999. Accepting the Standardized Precipitation Index: a Calculation Algorithm1. *JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc.* 35, 311–322.
doi:10.1111/j.1752-1688.1999.tb03592.x
- Harding, B.L., Sangoyomi, T.B., Payton, E.A., 1995. Impacts of a severe sustained drought on colorado river water resources.
- Hayes, M., 2006. Drought Indices. *Van Nostrand's Sci. Encycl.* 13 pp.
doi:10.1002/0471743984.vse8593
- Hayes, M., Svoboda, M., Wall, N., Widhalm, M., 2011. The lincoln declaration on drought indices: Universal meteorological drought index recommended. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 92, 485–488. doi:10.1175/2010BAMS3103.1
- Hunt, E.D., Svoboda, M., Wardlow, B., Hubbard, K., Hayes, M., Arkebauer, T., 2014. Monitoring the effects of rapid onset of drought on non-irrigated maize with agronomic data and climate-based drought indices. *Agric. For. Meteorol.* 191, 1–11. doi:10.1016/j.agrformet.2014.02.001
- Iglewicz, B., Hoaglin, D.C., 1993. How to detect and handle outliers. Milwaukee, Wis. : ASQC Quality Press.
- IGP, 2005a. Atlas Climático de precipitación y temperatura del aire de la Cuenca del Río Mantaro.
- IGP, 2005b. Vulnerabilidad actual y futura ante el cambio climático y medidas de adaptación en la cuenca del río Mantaro.

- IPCC, 2013. Climate Change 2013.
- IPCC, 2007. Climate Change 2007 - The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC (Climate Change 2007), Cambridge University Press Cambridge United Kingdom and New York NY USA.
- Jungclaus, J.H., Lorenz, S.J., Timmreck, C., Reick, C.H., Brovkin, V., Six, K., Segschneider, J., Giorgetta, M.A., Crowley, T.J., Pongratz, J., Krivova, N.A., Vieira, L.E., Solanki, S.K., Klocke, D., Botzet, M., Esch, M., Gayler, V., Haak, H., Raddatz, T.J., Roeckner, E., Schnur, R., Widmann, H., Claussen, M., Stevens, B., Marotzke, J., 2010. Climate and carbon-cycle variability over the last millennium. *Clim. Past* 6, 723–737. doi:10.5194/cp-6-723-2010
- Kane, R.P., 2000. El Nino/La Nina relationship with rainfall at Huancayo, in the Peruvian Andes. *Int. J. Climatol.* 20, 63–72. doi:10.1002/(SICI)1097-0088(200001)20:1<63::AID-JOC447>3.0.CO;2-J
- Kane, R.P., 1999. Rainfall extremes in some selected parts of Central and South America: ENSO and other relationships reexamined. *Int. J. Climatol.* 19, 423–455. doi:10.1002/(SICI)1097-0088(19990330)19:4<423::AID-JOC368>3.0.CO;2-O
- Kendall, M.G., 1975. Rank Correlation Methods.
- Komuscu, A.U., 1999. Using the SPI to Analyze Spatial and Temporal Patterns of Drought in Turkey Using the SPI to Analyze Spatial and Temporal Patterns of Drought in Turkey. *Drought Netw. News* 11, 6–13.
- Lana, X., Serra, C., Burgueño, A., 2001. Patterns of monthly rainfall shortage and excess in terms of the standardized precipitation index for Catalonia (NE Spain). *Int. J. Climatol.* 21, 1669–1691. doi:10.1002/joc.697
- Lavado Casimiro, W.S., Labat, D., Ronchail, J., Espinoza, J.C., Guyot, J.L., 2013. Trends in rainfall and temperature in the Peruvian Amazon-Andes basin over the last 40years (1965-2007). *Hydrol. Process.* 27, 2944–2957. doi:10.1002/hyp.9418
- Lavado Casimiro, W.S., Ronchail, J., Labat, D., Espinoza, J.C., Guyot, J.L., 2012. Basin-scale analysis of rainfall and runoff in Peru (1969–2004): Pacific, Titicaca and Amazonas drainages. *Hydrol. Sci. J.* 57, 625–642. doi:10.1080/02626667.2012.672985
- Leng, G., Tang, Q., Rayburg, S., 2015. Climate change impacts on meteorological, agricultural and hydrological droughts in China. *Glob. Planet. Change* 126, 23–34. doi:10.1016/j.gloplacha.2015.01.003
- León-Altuna, K.B., 2014. Análisis espacio-temporal de las precipitaciones y caudales

- durante los eventos El Niño (1982-83 y 1997-98) en la costa norte peruana. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Lloyd-Hughes, B., Saunders, M.A., 2002. A drought climatology for Europe. *Int. J. Climatol.* 22, 1571–1592. doi:10.1002/joc.846
- Lorenzo, J., 2012. Las sequías hidrológicas en la Península Ibérica: Análisis y caracterización espacio temporal, influencias climáticas y el efecto de la gestión hidrológica en un contexto de cambio global. Universidad de Zaragoza.
- Malhi, Y., Aragão, L.E.O.C., Galbraith, D., Huntingford, C., Fisher, R., Zelazowski, P., Sitch, S., McSweeney, C., Meir, P., 2009. Exploring the likelihood and mechanism of a climate-change-induced dieback of the Amazon rainforest. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 106, 20610–5. doi:10.1073/pnas.0804619106
- Mann, H.B., 1945. Nonparametric tests against trend. *Econom. J. Econom. Soc.* 245–259.
- Marengo, J.A., Jones, R., Alves, L.M., Valverde, M.C., 2009. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. *Int. J. Climatol.* 29, 2241–2255. doi:10.1002/joc
- Marengo, J.A., Pabón, J.D., Díaz, A., Rosas, G., Ávalos, G., Montealegre, E., Rojas, M., 2011. Climate change: evidence and future scenarios for the Andean region. *Clim. Chang. Biodivers. Trop. Andes* 110–127.
- Masud, M.B., Khaliq, M.N., Wheeler, H.S., 2015. Analysis of meteorological droughts for the Saskatchewan River Basin using univariate and bivariate approaches. *J. Hydrol.* 522, 452–466. doi:10.1016/j.jhydrol.2014.12.058
- Mckee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *AMS 8th Conf. Appl. Climatol.* 179–184. doi:citeulike-article-id:10490403
- Min, S.K., Kwon, W.T., Park, E.H., Choi, Y., 2003. Spatial and temporal comparisons of droughts over Korea with East Asia. *Int. J. Climatol.* 23, 223–233. doi:10.1002/joc.872
- Mishra, A.K., Singh, V.P., 2011. Drought modeling - A review. *J. Hydrol.* 403, 157–175. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.03.049
- Nalbantis, I., Tsakiris, G., 2009. Assessment of hydrological drought revisited. *Water Resour. Manag.* 23, 881–897. doi:10.1007/s11269-008-9305-1
- Niemeyer, S., 2008. New drought indices. *Options Méditerranéennes* 80, 267–274. doi:10.1017/CBO9781107415324.004

- OMM, 2012. SPI user guide. Geneva. doi:10.1175/2007JCLI1348.1
- OMM, 2006. Vigilancia y alerta temprana de la sequía, Información meteorológica y climática para el desarrollo agrícola sostenible.
- Palmer, W.C., 1965. Meteorological Drought. U.S. Weather Bur. Res. Pap. No. 45.
- Paulo, A.A., Pereira, L.S., 2007. Prediction of SPI drought class transitions using Markov chains. *Water Resour. Manag.* 21, 1813–1827. doi:10.1007/s11269-006-9129-9
- Phillips, O., Aragao, L., Lewis, S., Fisher, J., Lloyd, J., Lopez-Gonzalez, G., Malhi, Y., Monteagudo, A., Peacock, J., Quesada, C., Heijden, G. Van Der, Almeida, S., 2009. Drought sensitivity of the Amazon carbon sink. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 6, 42004. doi:10.1088/1755-1307/6/4/042004
- Pohlert, T., 2016. trend: Non-Parametric Trend Tests and Change-Point Detection.
- Qin, Y., Yang, D., Lei, H., Xu, K., Xu, X., 2015. Comparative analysis of drought based on precipitation and soil moisture indices in Haihe basin of North China during the period of 1960 – 2010 *526*, 55–67.
- R Core Team, 2017. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Found. Stat. Comput. Vienna, Austria. doi:http://www.R-project.org/
- Raddatz, T.J., Reick, C.H., Knorr, W., Kattge, J., Roeckner, E., Schnur, R., Schnitzler, K.-G., Wetzel, P., Jungclaus, J., 2007. Will the tropical land biosphere dominate the climate–carbon cycle feedback during the twenty-first century? *Clim. Dyn.* 29, 565–574. doi:10.1007/s00382-007-0247-8
- Rau, P., Bourrel, L., Labat, D., Melo, P., Dewitte, B., Frappart, F., Lavado, W., Felipe, O., 2017. Regionalization of rainfall over the Peruvian Pacific slope and coast. *Int. J. Climatol.* 37, 143–158. doi:10.1002/joc.4693
- Raziei, T., Saghafian, B., Paulo, A.A., Pereira, L.S., Bordi, I., 2009. Spatial patterns and temporal variability of drought in Western Iran. *Water Resour. Manag.* 23, 439–455. doi:10.1007/s11269-008-9282-4
- Rouault, M., Richard, Y., 2003. Intensity and spatial extension of drought in South Africa at different time scales. *Water SA* 29, 489–500. doi:10.4314/wsa.v29i4.5057
- Sánchez, E., Solman, S., Remedio, A.R.C., Berbery, H., Samuelsson, P., Da Rocha, R.P., Mourão, C., Li, L., Marengo, J., de Castro, M., Jacob, D., 2015. Regional climate modelling in CLARIS-LPB: a concerted approach towards twentyfirst century projections of regional temperature and precipitation over South America. *Clim. Dyn.* 45, 2193–2212. doi:10.1007/s00382-014-2466-0
- Santos, J.F., Portela, M.M., Pulido-Calvo, I., 2011. Regional Frequency Analysis of

- Droughts in Portugal. *Water Resour. Manag.* 25, 3537–3558. doi:10.1007/s11269-011-9869-z
- Seager, R., Naik, N., Vecchi, G.A., 2010. Thermodynamic and dynamic mechanisms for large-scale changes in the hydrological cycle in response to global warming. *J. Clim.* 23, 4651–4668. doi:10.1175/2010JCLI3655.1
- Seiler, R.A., Hayes, M., Bressan, L., 2002. Using the standardized precipitation index for flood risk monitoring. *Int. J. Climatol.* 22, 1365–1376. doi:10.1002/joc.799
- SENAMHI, 2014. Regionalización Estadística de Escenarios Climáticos en Perú, 1ra ed. Lima, Perú.
- SENAMHI, 2012a. Atlas climático en la cuenca del Río Urubamba. Lima, Peru.
- SENAMHI, 2012b. Caracterización climática de las regiones Apurímac y Cusco. Ser. Investig. Reg. - Programa Adapt. al Cambio Climático 1.
- Shanahan, T.M., Overpeck, J.T., Anchukaitis, K.J., Beck, J.W., Cole, J.E., Dettman, D.L., Peck, J.A., Scholz, C.A., King, J.W., 2009. Atlantic Forcing of Persistent Drought in West Africa. *Science* (80-.). 324, 377–380. doi:10.1126/science.1166352
- Sheffield, J., Wood, E.F., Roderick, M.L., 2012. Little change in global drought over the past 60 years. *Nature* 491, 435–438. doi:10.1038/nature11575
- Shiau, J.T., 2006. Fitting drought duration and severity with two-dimensional copulas. *Water Resour. Manag.* 20, 795–815. doi:10.1007/s11269-005-9008-9
- Sönmez, F.K., Kömüscü, A.Ü., Erkan, A., Turgu, E., 2005. An analysis of spatial and temporal dimension of drought vulnerability in Turkey using the standardized precipitation index. *Nat. Hazards* 35, 243–264. doi:10.1007/s11069-004-5704-7
- Tallaksen, L., Lanen, H.A.J. van, 2004. Hydrological drought. Processes and estimation methods for streamflow and groundwater, *Developments in Water Science* : 48. Elsevier, 73, ..
- Tebaldi, C., Hayhoe, K., Arblaster, J.M., Meehl, G.A., 2006. Going to the extremes: An intercomparison of model-simulated historical and future changes in extreme events. *Clim. Change* 79, 185–211. doi:10.1007/s10584-006-9051-4
- Thornthwaite, C.W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.* 38, 55–94.
- Trenberth, K.E., Dai, A., van der Schrier, G., Jones, P.D., Barichivich, J., Briffa, K.R., Sheffield, J., 2014. Global warming and changes in drought. *Nat. Clim. Chang.* 4, 17–22.
- Tsakiris, G., Pangalou, D., Vangelis, H., 2007. Regional drought assessment based on the

- Reconnaissance Drought Index (RDI). *Water Resour. Manag.* 21, 821–833.
doi:10.1007/s11269-006-9105-4
- Tsakiris, G., Vangelis, H., 2005. Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *Eur. Water* 9, 3–11.
- Vasiliades, L., Loukas, A., Liberis, N., 2011. A Water Balance Derived Drought Index for Pinios River Basin, Greece. *Water Resour. Manag.* 25, 1087–1101.
doi:10.1007/s11269-010-9665-1
- Vicente-Serrano, S.M., Aguilar, E., Martínez, R., Martín-Hernández, N., Azorin-Molina, C., Sanchez-Lorenzo, A., El Kenawy, A., Tomás-Burguera, M., Moran-Tejeda, E., López-Moreno, J.I., Revuelto, J., Beguería, S., Nieto, J.J., Drumond, A., Gimeno, L., Nieto, R., 2016. The complex influence of ENSO on droughts in Ecuador. *Clim. Dyn.* 1–23. doi:10.1007/s00382-016-3082-y
- Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., López-Moreno, J.I., 2010. A multiscale drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *J. Clim.* 23, 1696–1718. doi:10.1175/2009JCLI2909.1
- Vicente-Serrano, S.M., Chura, O., López-Moreno, J.I., Azorin-Molina, C., Sanchez-Lorenzo, A., Aguilar, E., Moran-Tejeda, E., Trujillo, F., Martínez, R., Nieto, J.J., 2015. Spatio-temporal variability of droughts in Bolivia: 1955–2012. *Int. J. Climatol.* 35, 3024–3040. doi:10.1002/joc.4190
- Vicente-Serrano, S.M., López-Moreno, J.-I., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Sanchez-Lorenzo, A., García-Ruiz, J.M., Azorin-Molina, C., Morán-Tejeda, E., Revuelto, J., Trigo, R., Coelho, F., Espejo, F., 2014. Evidence of increasing drought severity caused by temperature rise in southern Europe. *Environ. Res. Lett.* 9, 44001.
doi:10.1088/1748-9326/9/4/044001
- Vicente-Serrano, S.M., López-Moreno, J.I., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Azorin-Molina, C., Morán-Tejeda, E., 2012. Accurate Computation of a Streamflow Drought Index. *J. Hydrol. Eng.* 17, 318–332. doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000433
- Vidal, J.-P., Wade, S., 2009. A multimodel assessment of future climatological droughts in the United Kingdom. *Int. J. Climatol.* 29, 2056–2071. doi:10.1002/joc
- Voldoire, A., Sanchez-Gomez, E., y Méliá, D., Decharme, B., Cassou, C., Sénési, S., Valcke, S., Beau, I., Alias, A., Chevallier, M., Déqué, M., Deshayes, J., Douville, H., Fernandez, E., Madec, G., Maisonnave, E., Moine, M.-P., Planton, S., Saint-Martin, D., Szopa, S., Tyteca, S., Alkama, R., Belamari, S., Braun, A., Coquart, L.,

- Chauvin, F., 2013. The CNRM-CM5.1 global climate model: description and basic evaluation. *Clim. Dyn.* 40, 2091–2121. doi:10.1007/s00382-011-1259-y
- Wells, N., Goddard, S., Hayes, M.J., 2004. A self-calibrating Palmer Drought Severity Index. *J. Clim.* 17, 2335–2351. doi:10.1175/1520-0442(2004)017<2335:ASPDSI>2.0.CO;2
- Wilhite, D.A., Glantz, M.H., 1985. Understanding: the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Water Int.* 10, 111–120. doi:10.1080/02508068508686328
- World Meteorological Organization-WMO, 2012. Standardized precipitation index user guide., WMO. WMO.
- Wu, H., Hayes, M.J., Weiss, A., Hu, Q., 2001. An evolution of the standardized precipitation index, the China-Z index and the statistical Z-score. *Int. J. Climatol.* 21, 745–758. doi:10.1002/joc.658
- Xu, K., Yang, D., Yang, H., Li, Z., Qin, Y., Shen, Y., 2014. Spatio-temporal variation of drought in China during 1961–2012: A climatic perspective. *J. Hydrol.* 526, 253–264. doi:10.1016/j.jhydrol.2014.09.047
- Zuluaga-López, J., 2009. Análisis de la Variabilidad espacio-temporal de la sequía en Colombia. Universidad Nacional de Colombia.

VIII. ANEXOS

8.1 Series de tiempo de precipitación mensual completada para cada estación

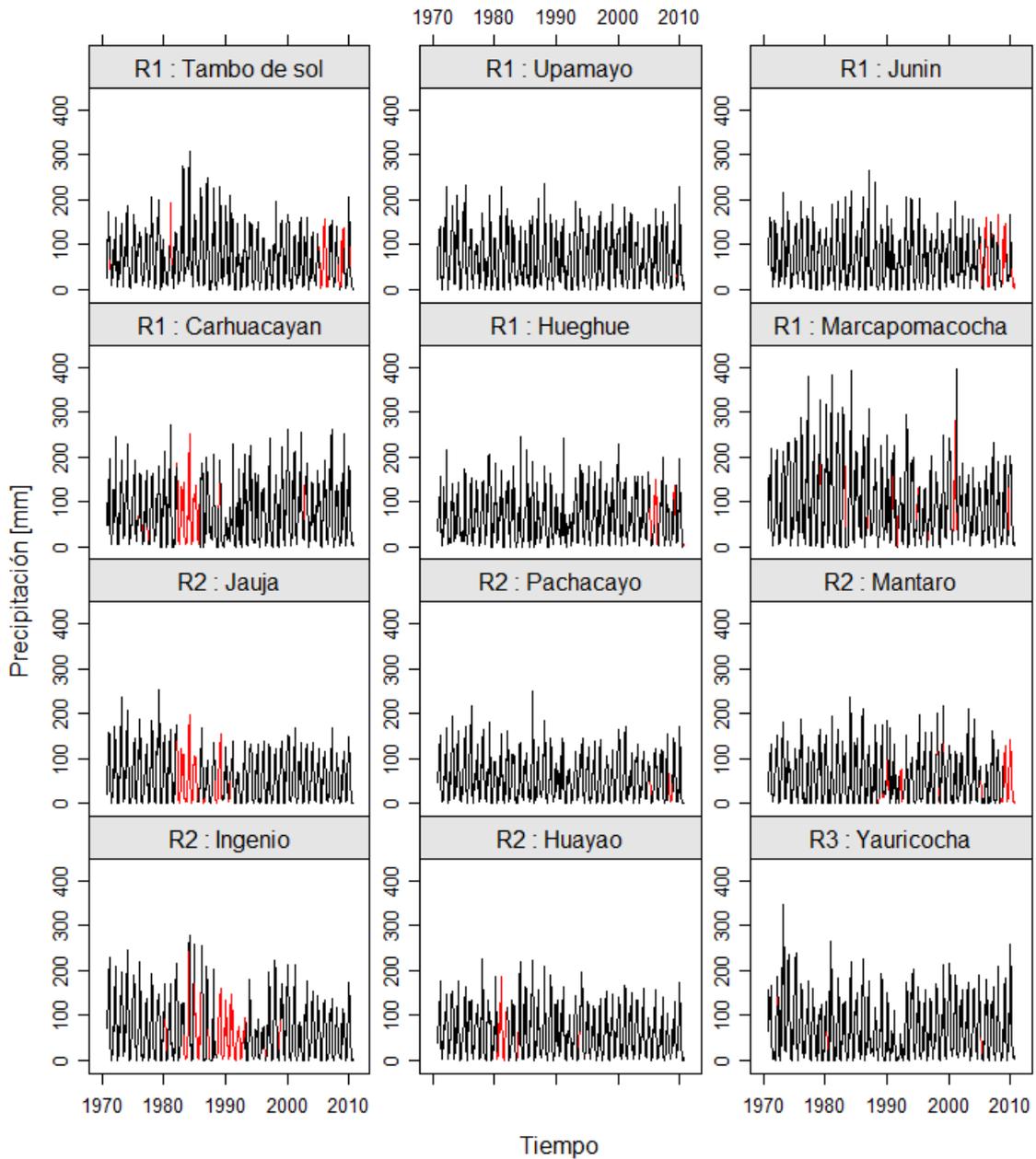
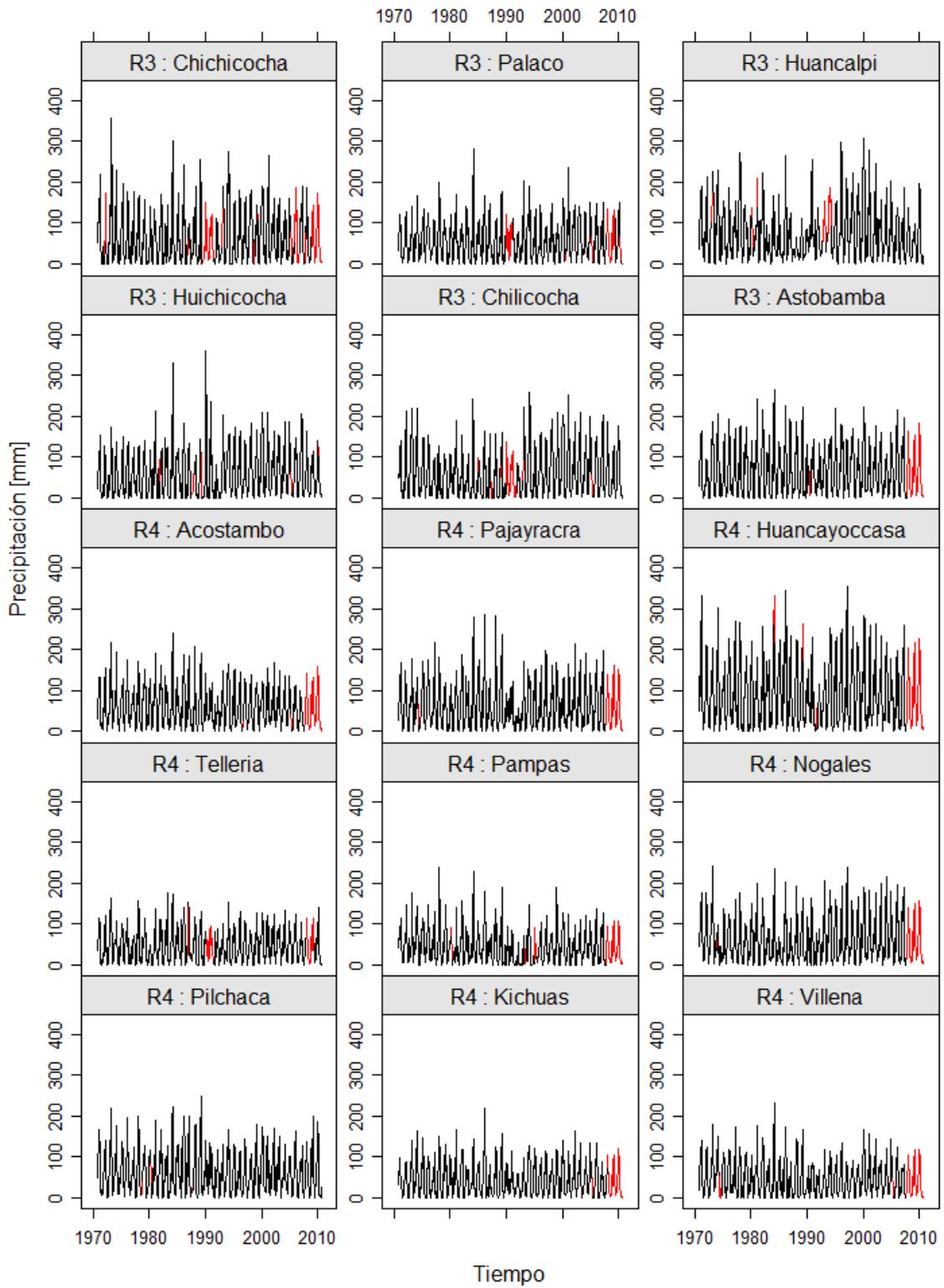
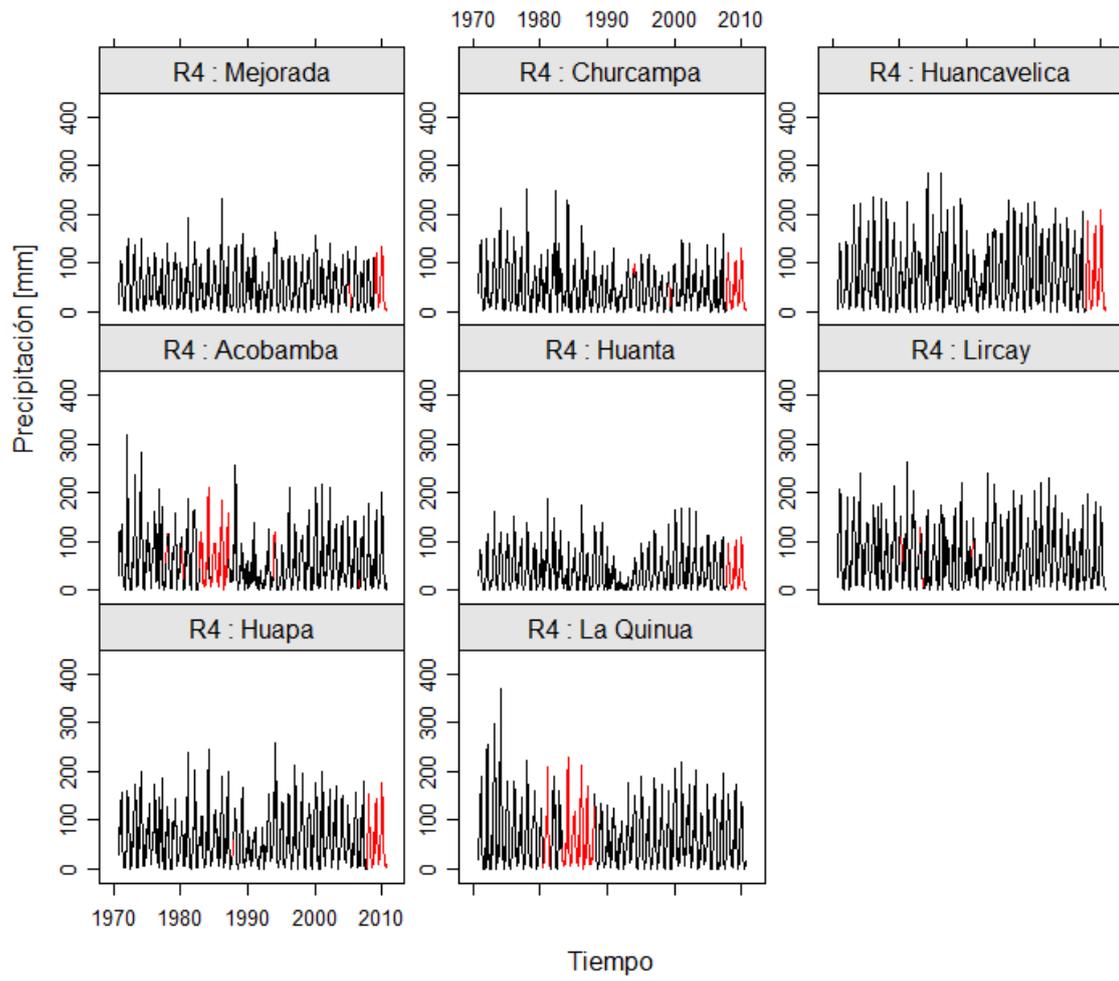


Figura 8.1: Serie de tiempo de precipitación mensual (periodo 1970-2010) por estación pluviométrica y por región homogénea (región 1 – R1, región2 – R2, región 3 – R3 y región 4 – R4). Datos observados (completados) en línea negra (roja).

Continuación



Continuación



8.2 Serie de tiempo de precipitación mensual para cada región

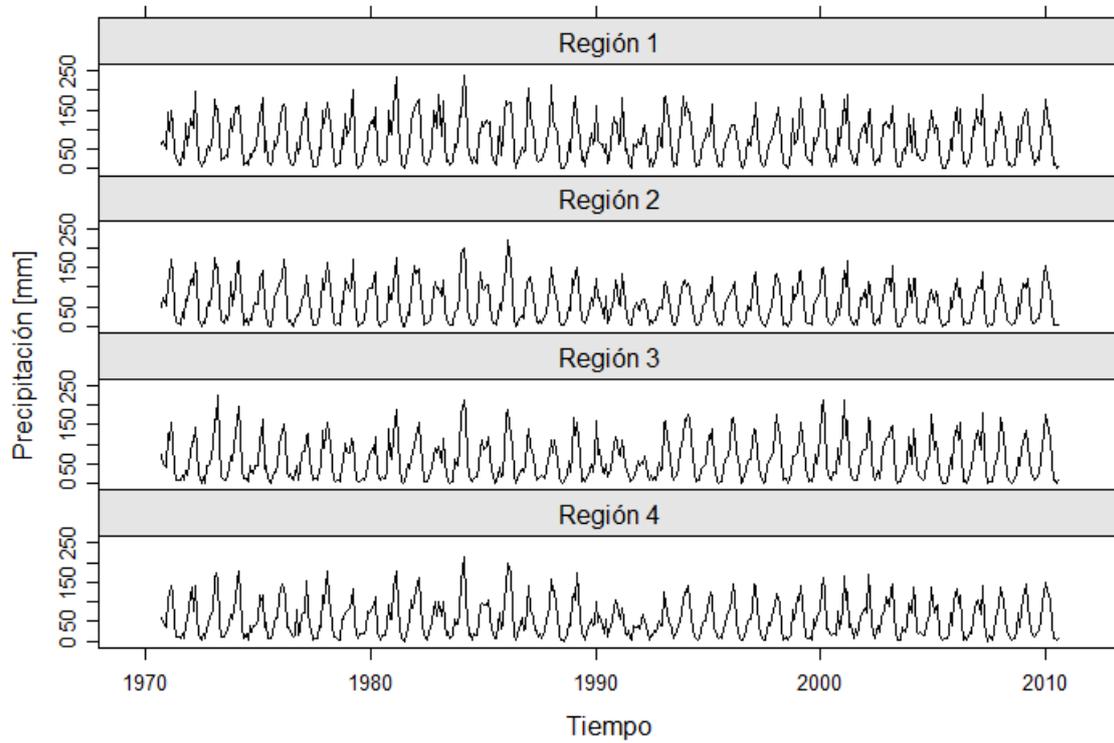


Figura 8.2: Serie de tiempo de precipitación promedio mensual (periodo 1970-2010) por cada región homogénea.

8.3 Inventario de eventos de sequías para cada región homogénea

Tabla 8.1: Inventario de eventos de sequías a corto plazo (IPE-3) para cada región homogénea en el periodo 2070-2010

Región 1						Región 2					
E	D	I	S	Inicio (año mes)	Fin (año mes)	E	D	I	S	Inicio (año mes)	Fin (año mes)
1	1	-1.06	1.06	1971 06	1971 06	1	1	-1.42	1.42	1974 12	1974 12
2	2	-1.61	2.93	1972 11	1972 12	2	4	-2.45	7.75	1976 10	1977 01
3	4	-1.93	5.78	1974 10	1975 01	3	1	-1.26	1.26	1977 08	1977 08
4	2	-1.37	2.48	1976 11	1976 12	4	3	-1.33	3.79	1979 08	1979 10
5	1	-1.06	1.06	1977 08	1977 08	5	2	-2.42	4.1	1980 06	1980 07
6	1	-1.09	1.09	1977 10	1977 10	6	1	-1.02	1.02	1981 06	1981 06
7	1	-1.55	1.55	1979 07	1979 07	7	1	-1.1	1.1	1982 07	1982 07
8	1	-1.55	1.55	1980 06	1980 06	8	2	-1.35	2.38	1983 11	1983 12
9	2	-1.75	3	1981 06	1981 07	9	1	-1.2	1.2	1984 09	1984 09
10	1	-1.16	1.16	1982 05	1982 05	10	1	-1.39	1.39	1986 10	1986 10
11	1	-1	1	1984 09	1984 09	11	1	-1.13	1.13	1987 05	1987 05
12	1	-1.35	1.35	1986 11	1986 11	12	1	-1.44	1.44	1987 10	1987 10
13	5	-3.24	11.38	1988 08	1988 12	13	4	-1.56	5.25	1988 08	1988 11
14	1	-1.01	1.01	1989 12	1989 12	14	3	-1.92	4.1	1990 03	1990 05
15	4	-2.54	6.73	1990 02	1990 05	15	2	-1.96	3.49	1991 02	1991 03
16	2	-2.2	3.49	1991 02	1991 03	16	6	-2.82	14.08	1991 12	1992 05
17	7	-2.85	13.15	1991 12	1992 06	17	4	-2.02	6.27	1992 11	1993 02
18	1	-1.25	1.25	1992 09	1992 09	18	2	-1.56	2.64	1994 08	1994 09
19	1	-1.09	1.09	1992 12	1992 12	19	1	-1.02	1.02	1995 02	1995 02
20	1	-1.15	1.15	1994 10	1994 10	20	3	-1.76	4.19	1996 07	1996 09
21	2	-1.5	2.59	1995 01	1995 02	21	1	-1.16	1.16	1996 11	1996 11
22	3	-1.28	3.63	1995 08	1995 10	22	1	-1.22	1.22	1997 05	1997 05
23	2	-1.06	2.09	1996 02	1996 03	23	1	-1.1	1.1	1997 08	1997 08
24	2	-1.51	2.99	1996 08	1996 09	24	1	-1.35	1.35	1997 10	1997 10
25	2	-1.27	2.39	1997 05	1997 06	25	1	-1.58	1.58	1998 07	1998 07
26	2	-1.65	2.99	1998 07	1998 08	26	1	-1.48	1.48	1998 09	1998 09
27	1	-1.16	1.16	1999 01	1999 01	27	1	-1.34	1.34	2000 06	2000 06
28	5	-2.67	9.08	2004 01	2004 05	28	1	-1.32	1.32	2000 11	2000 11
29	5	-1.68	7.2	2005 03	2005 07	29	3	-1.36	3.54	2002 01	2002 03
30	1	-1.42	1.42	2005 09	2005 09	30	2	-1.42	2.73	2003 10	2003 11
31	1	-1.39	1.39	2005 11	2005 11	31	6	-1.85	9.08	2005 02	2005 07
32	2	-1.19	2.28	2007 08	2007 09	32	1	-1.46	1.46	2005 09	2005 09
33	5	-2.5	9.8	2008 03	2008 07	33	1	-1.24	1.24	2006 04	2006 04
34	1	-1.18	1.18	2009 01	2009 01	34	2	-2.03	3.53	2007 08	2007 09
35	2	-1.48	2.58	2010 07	2010 08	35	4	-2.94	8.83	2008 03	2008 06
						36	1	-1.07	1.07	2009 01	2009 01
						37	4	-2.11	5.81	2010 05	2010 08

Continuación...

Región 3						Región 4					
E	D	I	S	Inicio (año mes)	Fin (año mes)	E	D	I	S	Inicio (año mes)	Fin (año mes)
1	1	-1.19	1.19	1971 06	1971 06	1	3	-1.59	4.37	1971 09	1971 11
2	5	-2.2	7.54	1971 09	1972 01	2	3	-1.75	4.51	1974 11	1975 01
3	3	-1.89	4.47	1974 11	1975 01	3	2	-2.26	4.32	1976 12	1977 01
4	3	-1.78	4.91	1976 11	1977 01	4	1	-1.21	1.21	1977 08	1977 08
5	1	-1	1	1979 02	1979 02	5	1	-1.73	1.73	1979 10	1979 10
6	8	-2.27	12.24	1979 09	1980 04	6	1	-1.09	1.09	1980 02	1980 02
7	1	-1.31	1.31	1980 06	1980 06	7	1	-1.94	1.94	1980 06	1980 06
8	2	-1.98	3.38	1981 06	1981 07	8	2	-1.91	3.17	1981 06	1981 07
9	1	-1.63	1.63	1982 07	1982 07	9	2	-1.61	2.76	1983 02	1983 03
10	3	-1.76	4.31	1983 02	1983 04	10	1	-1.22	1.22	1986 12	1986 12
11	1	-1.38	1.38	1983 08	1983 08	11	2	-1.82	3.28	1987 04	1987 05
12	1	-1.15	1.15	1984 09	1984 09	12	4	-3.39	9.24	1988 08	1988 11
13	3	-1.61	4.6	1985 10	1985 12	13	6	-2.26	10.86	1989 12	1990 05
14	3	-1.84	4.71	1987 04	1987 06	14	4	-2.22	7.19	1991 02	1991 05
15	2	-1.62	2.67	1987 10	1987 11	15	9	-3.30	20.56	1991 10	1992 06
16	1	-1.13	1.13	1988 02	1988 02	16	3	-1.73	4.25	1992 11	1993 01
17	2	-1.57	2.88	1988 08	1988 09	17	4	-1.73	5.72	1994 07	1994 10
18	2	-1.24	2.34	1989 11	1989 12	18	1	-1.11	1.11	1995 10	1995 10
19	2	-1.8	2.97	1990 04	1990 05	19	2	-2.24	3.24	1996 07	1996 08
20	3	-1.59	4.1	1991 02	1991 04	20	2	-1.59	3	1998 06	1998 07
21	2	-1.62	3.12	1991 09	1991 10	21	1	-1.92	1.92	1998 09	1998 09
22	7	-3.13	15.73	1991 12	1992 06	22	1	-1.89	1.89	2003 11	2003 11
23	1	-1.28	1.28	1992 09	1992 09	23	1	-1.05	1.05	2004 01	2004 01
24	3	-1.7	3.97	1992 11	1993 01	24	7	-2.84	10.76	2005 03	2005 09
25	2	-1.94	3.48	1995 07	1995 08	25	1	-1.15	1.15	2006 07	2006 07
26	1	-1.21	1.21	1997 05	1997 05	26	2	-1.2	2.31	2007 08	2007 09
27	1	-1.2	1.2	1998 09	1998 09	27	3	-1.81	4.3	2008 04	2008 06
28	2	-1.16	2.17	1999 08	1999 09	28	1	-1.06	1.06	2008 09	2008 09
29	1	-1.16	1.16	2004 01	2004 01	29	2	-1.33	2.43	2010 07	2010 08
30	1	-1.13	1.13	2004 03	2004 03						
31	7	-2.18	11.24	2005 03	2005 09						
32	1	-1.39	1.39	2006 07	2006 07						
33	1	-1.91	1.91	2007 08	2007 08						
34	4	-2.11	6.83	2008 04	2008 07						
35	1	-1.23	1.23	2008 09	2008 09						
36	2	-1.24	2.34	2010 07	2010 08						

Tabla 8.2: Inventario de eventos de sequías a largo plazo (IPE-12) para cada región homogénea en el periodo 2070-2010

Región 1						Región 2					
E	D	I	S	Inicio (año mes)	Fin (año mes)	E	D	I	S	Inicio (año mes)	Fin (año mes)
1	2	-1.25	2.29	1975 01	1975 02	1	3	-1.64	4.17	1977 02	1977 04
2	1	-1.06	1.06	1980 04	1980 04	2	4	-1.28	4.79	1977 06	1977 09
3	1	-1.06	1.06	1980 09	1980 09	3	2	-1.17	2.25	1983 11	1983 12
4	1	-1.07	1.07	1989 01	1989 01	4	22	-3.06	44.2	1991 12	1993 09
5	3	-1.52	4.18	1990 03	1990 05	5	1	-1.18	1.18	1995 02	1995 02
6	1	-1.14	1.14	1990 08	1990 08	6	2	-1.01	2.03	1995 05	1995 06
7	15	-2.95	33.67	1991 11	1993 01	7	1	-1.18	1.18	1996 11	1996 11
8	1	-1.07	1.07	1995 02	1995 02	8	18	-1.96	26.34	2005 03	2006 08
9	9	-1.36	10.87	1995 04	1995 12	9	1	-1.29	1.29	2006 10	2006 10
10	12	-1.51	15.11	1996 02	1997 01	10	1	-1.05	1.05	2007 01	2007 01
11	5	-1.4	6.45	1997 04	1997 08	11	12	-2.01	19.96	2008 03	2009 02
12	1	-1.03	1.03	1997 10	1997 10						
13	9	-2.26	16.35	2004 03	2004 11						
14	7	-2.05	11.4	2005 09	2006 03						
15	11	-2.12	18.59	2008 04	2009 02						

Región 3						Región 4					
E	D	I	S	Inicio (año mes)	Fin (año mes)	E	D	I	S	Inicio (año mes)	Fin (año mes)
1	3	-1.56	3.96	1972 01	1972 03	1	3	-1.43	3.76	1977 08	1977 10
2	3	-1.25	3.42	1977 01	1977 03	2	6	-1.3	7	1980 04	1980 09
3	2	-1.07	2.08	1977 08	1977 09	3	2	-1.22	2.25	1983 11	1983 12
4	12	-2.01	20.9	1979 10	1980 09	4	1	-1.04	1.04	1987 04	1987 04
5	2	-1.22	2.22	1983 11	1983 12	5	3	-1.39	3.66	1987 08	1987 10
6	1	-1.06	1.06	1987 05	1987 05	6	8	-2.13	13.85	1990 03	1990 10
7	16	-1.75	20.86	1987 09	1988 12	7	19	-3.63	54.32	1991 10	1993 04
8	5	-1.53	6.09	1990 03	1990 07	8	3	-1.06	3.14	1993 06	1993 08
9	16	-3.22	40.19	1991 11	1993 02	9	7	-1.68	8.38	2005 08	2006 02
10	1	-1.35	1.35	2005 12	2005 12	10	3	-1.46	3.55	2008 12	2009 02
11	2	-1.4	2.66	2009 01	2009 02						