

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**“ANÁLISIS DE LA PRECIPITACIÓN FUTURA EN LA CUENCA
CHANCAY-HUARAL MEDIANTE EL MODELO GCM-MRI”**

Presentado por:

Diana Beatriz Córdova Ahuanari

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE:

INGENIERO AGRÍCOLA

Lima – Perú

2015

Dedicatoria

A mis padres, Lauro y Guillermina, por la educación y valores que aprendí de ellos, y a su incondicional apoyo, a mis hermanos por su motivación y enseñanzas que cada día me brindan.

A mi pareja e hijo por su esfuerzo y comprensión, que me acompañaron en todo este tiempo para esta investigación.

Agradecimientos

Mis agradecimientos a la Dra. Lía Ramos, quien me proporciono con paciencia desde el principio hasta el final sus conocimientos y aportes para la realización de la presente tesis.

Agradezco de la misma manera al Ing. MSc. Ricardo Apacla por sus contribuciones en esta investigación.

La presente investigación se realizó gracias al convenio entre la Universidad Agraria La Molina - UNALM y a la Agencia de Cooperación Internacional de Japón – JICA, por proporcionar los datos del modelo de alta resolución MRI – AGCM.

A mis compañeros y amigos de la Universidad que siempre estuvieron conmigo durante toda la carrera, y apoyándome para culminar la tesis. Gracias a todos los que me apoyaron.

RESUMEN

En la presente investigación se ha desarrollado el análisis de la precipitación en la cuenca Chancay Huaral en el tiempo presente (1980 a 1999) y futuro (2020 a 2039 y 2080 a 2099) con el modelo de circulación global de alta resolución MRI – AGCM las dos versiones, para evaluar las proyecciones y anomalías de la precipitación que podrían afectar a la agricultura de la cuenca. Para ello se efectuó el downscaling del modelo MRI – AGCM a la estación pluviométrica, con dos métodos estadísticos, el primero es la corrección paramétrica del sesgo (PBC) y el segundo es la función de distribución acumulada (CDF). Se caracterizaron las estaciones pluviométricas en cuatro zonas, con ayuda del Vector Regional. Se comparó la precipitación proyectada del modelo MRI – AGCM y la precipitación de los pluviómetros con el coeficiente de correlación de Pearson, a nivel puntual y espacial a una escala mensual y estacional a un nivel de significancia del cinco por ciento, resultando una correlación optima positiva significativa en los cuatro productos del modelo MRI – AGCM. Asimismo, se proyectó las anomalías de la precipitación a nivel espacial de la cuenca, determinando un aumento en los meses de enero a marzo y un déficit en los meses de julio a diciembre; y se evaluó los índices de sequías meteorológicas consiguiendo resultados similares, en los periodos húmedos y secos. Además, predominó en toda la cuenca la magnitud de la sequía ligera con una frecuencia mayor del 50% para las proyecciones de las precipitaciones proyectadas del modelo MRI – AGCM coincidiendo en varios años. Precisamente, las proyecciones de las precipitaciones en la cuenca podrán prevenir ciertas inundaciones por aumento de la precipitación y controlar las posibles sequías; mejorando la eficiencia del recurso del agua en la cuenca mediante sus estructuras de captación y construyendo reservorios.

Palabras claves: Precipitación, modelo MRI – AGCM, correlación de Pearson, proyección, anomalías e índices de sequía.

ABSTRACT

In the present study we have developed an analysis of precipitation in the basin Chancay Huaral at the present time (1980-1999) and future (2020-2039 and 2080-2099) in global circulation model of high resolution MRI - the AGCM two versions, to evaluate projections and precipitation anomalies that could affect agriculture in the basin. For this, the downscaling model was performed MRI - AGCM to the rainfall station with two statistical methods, the first is the parametric bias correction (PBC) and the second is the cumulative distribution function (CDF). Rainfall stations were characterized in four areas, with the help of the Regional Vector. The estimated model was compared MRI precipitation - AGCM and precipitation gauges with the Pearson correlation coefficient, to timely and space to a monthly and seasonal significance level of five percent level scale, resulting in an optimal positive correlation significant in the four products Model MRI - AGCM. Also, precipitation anomalies spatially projected basin, causing an increase in the months of January to March and a deficit in the months from July to December; weather and drought indexes were evaluated getting similar results, in wet and dry periods. Also, it dominates the entire basin the size of the light drought more frequently 50% for projections of rainfall model projected MRI - AGCM agreeing years. Indeed, projections of rainfall in the basin may prevent some flooding increased precipitation and drought control possible; improving the efficiency of water resources in the basin by their intake structures and building reservoirs.

Keywords: Precipitation, model MRI - AGCM, Pearson correlation, projection, anomalies and drought indices.

ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN.....	17
1.1.	OBJETIVO GENERAL.....	18
1.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
II.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	19
2.1.	SISTEMA CLIMÁTICO.....	19
2.1.	MODELOS DE CIRCULACIÓN GENERAL (GCM).....	20
2.1.1.	Modelos de circulación general de la atmósfera (AGCM).....	22
2.2.	DOWNSCALING (REDUCCIÓN DE ESCALA).....	23
2.2.1.	Downscaling estadístico (Reducción de escala estadístico).....	24
2.2.2.	Downscaling dinámico (Reducción de escala dinámica).....	25
2.3.	MODELO MRI – AGCM.....	27
2.4.	ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICOS DEL IPCC.....	33
2.5.	SEQUÍAS.....	37
2.5.1.	Tipos de Sequías.....	38
2.5.2.	Caracterización de la sequía.....	38
2.5.3.	Índices de sequía meteorológica.....	39
III.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	43
3.1.	MATERIALES.....	43
3.1.1.	Descripción de la zona de estudio.....	43
3.1.2.	Información de precipitación.....	44
3.1.2.	Software y equipos.....	47
3.2.	MÉTODOS.....	48
3.2.1.	Análisis preliminar de las estaciones pluviométricas.....	48
3.2.2.	Extracción de la información MRI – AGCM y cambio de formato.....	51
3.2.3.	Downscaling estadístico con corrección paramétrica del sesgo (PBC).....	53
3.2.4.	Downscaling estadístico con la función de distribución acumulada (CDF).....	53
3.2.4.	Proyección futura del modelo MRI-AGCM.....	55
3.2.6.	Comparación de la precipitación proyectada del modelo MRI-AGCM y la precipitación de pluviómetros a nivel puntual.....	55
3.2.7.	Comparación de la precipitación proyectada del modelo MRI-AGCM y la precipitación de pluviómetros a nivel espacial.....	58

3.2.8 Anomalía mensual de la precipitación	59
3.2.9. Índices de sequía meteorológica.....	59
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	62
4.1. ANÁLISIS PRELIMINAR: CONSISTENCIA Y REGIONALIZACIÓN.....	62
4.2 COMPARACIÓN ENTRE LA PRECIPITACIÓN PROYECTADA DEL MOLDEO MRI-AGCM E INFORMACIÓN DE ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS.	63
4.2.1. Coeficiente de correlación de Pearson.....	66
4.2.2. Tabla de contingencia.....	67
4.2.3. Correlación espacial de Pearson	72
4.3. PROYECCIÓN FUTURA DE LA PRECIPITACIÓN ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO	77
4.3.1. Proyección para un futuro cercano y lejano de la precipitación.....	77
4.3.2. Anomalías de la precipitación	80
4.3.3. Índices de sequía.....	83
V. CONCLUSIONES.....	123
VI. RECOMENDACIONES	126
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	127
VIII. ANEXOS	132

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1:Detalle del modelo AGCM-MRI 3.1 S y 3.2 S. Fuente: Mizuta et al. (2012)	30
Tabla 2. Escenarios de emisión con sus respectivas características. Fuente: IPCC, 2013..	36
Tabla 3. Clasificación de Deciles de Precipitación. Fuente: Gibbs & Maher. 1967	42
Tabla 4: Estaciones pluviométricas en la zona de estudio para el periodo 1980 a1999.....	45
Tabla 5. Formato por extracción de las estaciones pluviométricas del modelo MRI-AGCM para la zona de estudio.	52
Tabla 6. Downscaling estadístico de las proyecciones futuro del modelo MRI-AGCM. ...	55
Tabla 7. Categorías en la anomalía estandarizada. Fuente: DGA y DMC (2014).	60
Tabla 8. Categorías en el índice de precipitación estandarizada. Fuente: McKee et al. (1993).....	61
Tabla 9. Notación de los experimentos MRI – AGCM empleado en el estudio.	62
Tabla 10. Frecuencia de ocurrencia de sequias según su magnitud periodo presente y futuro en la primera zona representada por la estación de Huayan en SPI 3 meses....	115
Tabla 11. Frecuencia de ocurrencia de sequias según su magnitud periodo presente y futuro en la primera zona representada por la estación de Huayan en SPI 6 meses....	115
Tabla 12. Frecuencia de ocurrencia de sequias según su magnitud periodo presente y futuro en la primera zona representada por la estación de Huayan en SPI 12 meses..	115
Tabla 13. Frecuencia de ocurrencia de sequias según su magnitud periodo presente y futuro en la segunda zona representada por la estación de Pallac en SPI 3 meses.	116
Tabla 14. Frecuencia de ocurrencia de sequias según su magnitud periodo presente y futuro en la segunda zona representada por la estación de Pallac en SPI 6 meses....	116
Tabla 15. Frecuencia de ocurrencia de sequias según su magnitud periodo presente y futuro en la segunda zona representada por la estación de Pallac en SPI 12 meses....	116
Tabla 16. Frecuencia de ocurrencia de sequias según su magnitud periodo presente y futuro en la tercera zona representada por la estación de Santa Cruz en SPI 3 meses.	117
Tabla 17. Frecuencia de ocurrencia de sequias según su magnitud periodo presente y futuro en la tercera zona representada por la estación de Santa Cruz en SPI 6 meses.	117
Tabla 18. Frecuencia de ocurrencia de sequias según su magnitud periodo presente y futuro en la tercera zona representada por la estación de Santa Cruz en SPI 12 meses.	117

Tabla 19. Frecuencia de ocurrencia de sequias según su magnitud periodo presente y futuro en la cuarta zona representada por la estación de Yantac en SPI 3 meses.....	118
Tabla 20. Frecuencia de ocurrencia de sequias según su magnitud periodo presente y futuro en la cuarta zona representada por la estación de Yantac en SPI 6 meses.....	118
Tabla 21. Frecuencia de ocurrencia de sequias según su magnitud periodo presente y futuro en la cuarta zona representada por la estación de Yantac en SPI 12 meses.....	118
Tabla 22. Índice anual del vector regional por cada estación pluviométrica de la zona de estudio.....	141
Tabla 23. Índice anual del vector regional por cada estación pluviométrica de la zona de estudio.....	143
Tabla 24. Diferencia porcentual de la proyección de la precipitación del futuro cercano (2020 - 2039) y lejano (2080 - 2099) con el presente de la estación pluviométrica Huayan (1980 - 1999).....	144
Tabla 25. Diferencia porcentual de la proyección de la precipitación del futuro cercano (2020 - 2039) y lejano (2080 - 2099) con el presente de la estación pluviométrica Santa Rosa.....	144
Tabla 26. Diferencia porcentual de la proyección de la precipitación del futuro cercano (2020 - 2039) y lejano (2080 - 2099) con el presente de la estación pluviométrica Alcantarilla.....	144
Tabla 27. Diferencia porcentual de la proyección de la precipitación del futuro cercano (2020 - 2039) y lejano (2080 - 2099) con el presente de la estación pluviométrica Pallac.....	145
Tabla 28. Diferencia porcentual de la proyección de la precipitación del futuro cercano (2020 - 2039) y lejano (2080 - 2099) con el presente de la estación pluviométrica Carac.....	145
Tabla 29. Diferencia porcentual de la proyección de la precipitación del futuro cercano (2020 - 2039) y lejano (2080 - 2099) con el presente de la estación pluviométrica Matucana.....	145
Tabla 30. Diferencia porcentual de la proyección de la precipitación del futuro cercano (2020 - 2039) y lejano (2080 - 2099) con el presente de la estación pluviométrica Autisha.....	146

Tabla 31. Diferencia porcentual de la proyección de la precipitación del futuro cercano (2020 - 2039) y lejano (2080 - 2099) con el presente de la estación pluviométrica Santa Cruz.....	146
Tabla 32. Diferencia porcentual de la proyección de la precipitación del futuro cercano (2020 - 2039) y lejano (2080 - 2099) con el presente de la estación pluviométrica Pirca	146
Tabla 33. Diferencia porcentual de la proyección de la precipitación del futuro cercano (2020 - 2039) y lejano (2080 - 2099) con el presente de la estación pluviométrica Huamantanga	147
Tabla 34. Diferencia porcentual de la proyección de la precipitación del futuro cercano (2020 - 2039) y lejano (2080 - 2099) con el presente de la estación pluviométrica Huaros	147
Tabla 35. Diferencia porcentual de la proyección de la precipitación del futuro cercano (2020 - 2039) y lejano (2080 - 2099) con el presente de la estación pluviométrica Pariacancha	147
Tabla 36. Diferencia porcentual de la proyección de la precipitación del futuro cercano (2020 - 2039) y lejano (2080 - 2099) con el presente de la estación pluviométrica Parquín	148
Tabla 37. Diferencia porcentual de la proyección de la precipitación del futuro cercano (2020 - 2039) y lejano (2080 - 2099) con el presente de la estación pluviométrica Carampoma (1980 - 1999).	148
Tabla 38. Diferencia porcentual de la proyección de la precipitación del futuro cercano (2020 - 2039) y lejano (2080 - 2099) con el presente de la estación pluviométrica Picoy (1980 - 1999).	148
Tabla 39. Diferencia porcentual de la proyección de la precipitación del futuro cercano (2020 - 2039) y lejano (2080 - 2099) con el presente de la estación pluviométrica Paccho (1980 - 1999).	149
Tabla 40. Diferencia porcentual de la proyección de la precipitación del futuro cercano (2020 - 2039) y lejano (2080 - 2099) con el presente de la estación pluviométrica Yantac	149
Tabla 41. Diferencia porcentual de la proyección de la precipitación del futuro cercano (2020 - 2039) y lejano (2080 - 2099) con el presente de la estación pluviométrica Marcapomacocha	149

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de los componentes del sistema climático mundial sus procesos e interacciones. Fuente: IPCC, 2007.	20
Figura 2. Esquema del modelo de circulación general y de los procesos físicos del modelo atmosférico. Fuente: NOAA, 2011.	22
Figura 3. Adaptación de los modelos climáticos globales y regionales. Fuente: SENAMHI, 2014.	25
Figura 4. Regionalización dinámica a partir de un modelo climático global ECHAM5, en el que se anida el modelo WRF que fue validado considerando las variables de temperatura, altitud, humedad relativa y específica, presión a nivel del mar, presión en la superficie, humedad del suelo, hielo marino, entre otros. SENAMHI, 2014.	27
Figura 5. Esquema de Arakawa-Shubert (a), esquema de Tiedtke (b) y el esquema Yoshimura (c). Fuente: Mizuta et al., 2012.	29
Figura 6. Cambios de la precipitación relativos (en valores porcentuales) para el período 2090-2099, respecto del período 1980-1999. Los valores son promedios multimodelo basados en el escenario A1B (IEEE) para los períodos diciembre-febrero (izquierda) y junio-agosto (derecha). Las áreas en blanco representan los lugares en que más de un 66% de los modelos coinciden en el signo del cambio, y las áreas punteadas representan los lugares en que más de un 90% de los modelos concuerdan en el signo del cambio. Fuente: IPCC, 2007.	33
Figura 7. Lado izquierdo: Escenarios de emisiones de gases del efecto invernadero hasta el año 2100 (en ausencia de políticas climáticas adicionales). Lado derecho: Proyección de las temperaturas en superficie hasta el año 2100. Fuente: IPCC 2007.	35
Figura 8. Mapas de resultados medios de modelos múltiples de la quinta fase del proyecto de comparación de modelos acoplados (CMIP5) de los escenarios RCP2,6 y RCP8,5, correspondientes al período 2081-2100, relativos a: el cambio anual en la temperatura media en superficie (parte superior); y el cambio de la media porcentual de la precipitación media anual (parte inferior).	36
Figura 9. Distribución de estaciones pluviométricas empleadas en el estudio y sistema hidrográfico de la cuenca Chancay– Huaral. Elaborada a partir del modelo de elevación digital ASTERGDEM con resolución espacial de 250 m.	44

Figura 10. Parte superior: Resolución espacial de los modelos AOGCM's, el Modelo MRI y el modelo climático regional NHM. Parte Inferior: Línea de tiempo de la temperatura de la superficie del mar (SST), se presenta el periodo presente, y los futuros cercano y lejano que se proyectan para el cambio de la temperatura de la superficie del mar (SST). Fuente: IPCC, 2013.	47
Figura 11. Esquema de la metodología de la investigación para alcanzar el objetivo general.....	48
Figura 12. Ejemplo de extracción de datos binarios del modelo MRI – AGCM de la estación pluviométrica Huayan. Los datos extraídos son los cinco puntos más cercanos a la estación con información horaria.	52
Figura 13. Distribución normal de los datos del modelo MRI – AGCM y los datos observados de las estaciones pluviométricas que se emplean en las ecuaciones de la corrección paramétrica del sesgo.	53
Figura 14. Función de distribución acumulada.	54
Figura 15. Precipitación del modelo MRI – AGCM en la estación pluviométrica Pallac. Periodo de análisis de enero de 1980 a diciembre de 1999.	54
Figura 16. Parte superior: Tabla de contingencia. Parte inferior: Estadísticos que caracterizan la precipitación con tabla de Contingencia. Fuente: Ramos L. (2013).....	58
Figura 17. Regionalización de las estaciones pluviométricas empleando el método de vector regional (MVR) y el mapa de clasificación climático de la zona obtenido por SENAMHI. Zona climática E (d) B'1 H3 es árido, semicálido y húmedo con deficiencias de precipitación en todo el año; C (o, i, p) B'2 H3 es semiseco, templado y húmedo, con otoño y primavera seco; C (o, i, p) B'3 es semiseco, semifrío y húmedo con otoño y primavera seco y H3 B (i) D'H3 es lluvioso, semifrío y húmedo con invierno seco.....	64
Figura 18. Variabilidad altitudinal y distribución de estaciones pluviométricas según regionalización.....	65
Figura 19. Coeficiente de correlación de Pearson entre la precipitación de pluviómetros y la precipitación proyectada por el modelo MRI – AGCM (cuatro productos), en las dieciocho estaciones pluviométricas empleadas en el estudio. Periodo de análisis: a escala mensual de Enero de 1980 a Diciembre de 1999.....	66

Figura 20. Estadísticos de la estación pluviométrica Huayan obtenidos a partir de la tabla de contingencia. Periodo de análisis a escala diaria de 1980 a 1999.....	68
Figura 21. Estadísticos de la de la estación pluviométrica Pallac obtenidos a partir de la tabla de contingencia. Periodo de análisis a escala diaria de 1980 a 1999.	69
Figura 22. Estadísticos de la estación pluviométrica Santa Cruz obtenidos a partir de la tabla de contingencia. Periodo de análisis a escala diaria de 1980 a 1999.	70
Figura 23. Estadísticos de la estación pluviométrica Yantac obtenidos a partir de la tabla de contingencia. Periodo de análisis a escala diaria de 1980 a 1999.	71
Figura 24. Correlación entre la precipitación de estaciones pluviométricas y de la precipitación proyectada por el modelo MRI – AGCM. Se utilizaron 1224728 celdas en la cuenca. Periodo de análisis: Enero de 1980 a Diciembre de 1999.	73
Figura 25. “Box plot” de la correlación mensual para las comparaciones T1, T2, T3 y T4. Con la mediana (línea roja), los cuartiles a 25% y 75% (caja), el valor máximo y mínimo (líneas de color negro) y los valores “outliers” (cruces rojas). Periodo de análisis: Enero de 1980 a Diciembre de 1999.....	74
Figura 26. Mapas de precipitación mensual de pluviómetro (Po) y productos MRI (P1, P2, P3, P4), de la mejor correlación espacial Pearson. Periodo de análisis: Enero 1980 a Diciembre 1999.....	74
Figura 27. Correlación promediada entre la precipitación mensual de pluviómetros (Po) y productos MRI-AGCM (P1, P2, P3, y P4) para las comparaciones T1, T2, T3 y T4. Periodo de análisis: Enero de 1980 a Diciembre de 1999.....	75
Figura 28. Mapa de precipitación media mensual para la estación de verano, otoño, primavera e invierno (mm/mes) con pluviómetros y modelo MRI- AGCM (P1, P2, P3 y P4). Periodo de análisis: Enero de 1980 a Diciembre de 1999.	76
Figura 29. Mapas de precipitación observada, precipitación presente MRI (P1, P2, P3, P4) y mapas de precipitación futura cercana MRI (P1, P2, P3, P4). Periodo de análisis: Meses de Enero a.....	78
Figura 30. Mapas de precipitación observada, precipitación presente MRI (P1, P2, P3, P4) y mapas de precipitación futura lejana MRI (P1, P2, P3, P4).Periodo de análisis: Meses de Enero a Diciembre.	79

Figura 31. Mapas de las anomalías de precipitación mensual con los productos MRI (P1, P2, P3, P4) para el futuro cercano. Periodo de análisis del año 2020 a 2039 de los meses de Enero a Diciembre.....	81
Figura 32-Mapas de las anomalías de precipitación mensual con los productos MRI (P1, P2, P3, P4) para el futuro lejano. Periodo de análisis del año 2080 a 2099 de los meses de Enero a Diciembre.....	82
Figura 33. Diagrama de cajas para las anomalías del porcentaje de precipitación normal (PPN) en la estación pluviométrica Huayan.....	86
Figura 34. Diagrama de cajas para las anomalías del porcentaje de precipitación normal (PPN) en la estación pluviométrica Pallac.....	87
Figura 35. Diagrama de cajas para las anomalías del porcentaje de precipitación normal (PPN) en la estación pluviométrica Santa Cruz.....	88
Figura 36. Diagrama de cajas para las anomalías del porcentaje de precipitación normal (PPN) en la estación pluviométrica Yantac.....	89
Figura 37. Diagrama de barras de la precipitación de tendencia anual (PTA) en la estación pluviométrica Huayan.....	91
Figura 38. Diagrama de barras de la precipitación de tendencia anual (PTA) estación pluviométrica Pallac.	93
Figura 39. Diagrama de barras de la precipitación de tendencia anual (PTA) en la estación pluviométrica Santa Cruz.	94
Figura 40 Diagrama de barras de la precipitación de tendencia anual (PTA) en la estación pluviométrica Yantac. Periodo de análisis: Año de 1980 a 1999.....	95
Figura 41. Evolución del índice de precipitación estandarizada (SPI) de 3, 6 y 12 meses en la estación pluviométrica Huayan. Periodo presente: 1980-1999 y futuro cercano (2020-2039).....	107
Figura 42. Evolución del índice de precipitación estandarizada (SPI) de 3, 6 y 12 meses en la estación pluviométrica Huayan. Periodo presente: 1980-1999 y futuro cercano (2080-2099).....	108
Figura 43. Evolución del índice de precipitación estandarizada (SPI) de 3, 6 y 12 meses en la estación pluviométrica Pallac. Periodo presente: 1980-1999 y futuro cercano (2020-2039).	109

Figura 44. Evolución del índice de precipitación estandarizada (SPI) de 3, 6 y 12 meses en la estación pluviométrica Pallac. Periodo presente: 1980-1999 y futuro cercano (2020-2099).	110
Figura 45. Evolución del índice de precipitación estandarizada (SPI) de 3, 6 y 12 meses en la estación pluviométrica Santa Cruz. Periodo presente: 1980-1999 y futuro cercano (2020-2039).....	111
Figura 46. Evolución del índice de precipitación estandarizada (SPI) de 3, 6 y 12 meses en la estación pluviométrica Santa Cruz. Periodo presente: 1980-1999 y futuro cercano (2020-2099).....	112
Figura 47. Evolución del índice de precipitación estandarizada (SPI) de 3, 6 y 12 meses en la estación pluviométrica Yantac. Periodo presente: 1980-1999 y futuro cercano (2020-2039).....	113
Figura 48. Evolución del índice de precipitación estandarizada (SPI) de 3, 6 y 12 meses en la estación pluviométrica Yantac. Periodo presente: 1980-1999 y futuro cercano (2020-2099).....	114
Figura 49. Gráfico de la precipitación a escala mensual de la estación pluviométrica Huayan para el periodo de análisis presente: 1980 a 1999. Y gráficos de la precipitación a escala mensual de los productos del modelo MRI – AGCM (P1, P2, P3, P4) para el futuro cercano y lejano para los periodos de análisis de 2020 a 2039 y 2080 a 2099, respectivamente.....	120
Figura 50. Gráfico de la precipitación a escala mensual de la estación pluviométrica Pallac para el periodo de análisis presente: 1980 a 1999. Y gráficos de la precipitación a escala mensual de los productos del modelo MRI – AGCM (P1, P2, P3, P4) para el futuro cercano y lejano para los periodos de análisis de 2020 a 2039 y 2080 a 2099, respectivamente.....	121
Figura 51. Gráfico de la precipitación a escala mensual de la estación pluviométrica Santa Cruz para el periodo de análisis presente: 1980 a 1999. Y gráficos de la precipitación a escala anual de los productos del modelo MRI – AGCM (P1, P2, P3, P4) para el futuro cercano y lejano para los periodos de análisis de 2020 a 2039 y 2080 a 2099, respectivamente.....	121
Figura 52. Gráfico de la precipitación a escala mensual de la estación pluviométrica Yantac para el periodo de análisis presente: 1980 a 1999. Y gráficos de la precipitación a escala anual de los productos del modelo MRI – AGCM (P1, P2, P3, P4) para	

el futuro cercano y lejano para los periodos de análisis de 2020 a 2039 y 2080 a 2099, respectivamente.	121
Figura 53. Histogramas de Precipitación Total Mensual para el periodo de análisis de 1980 a 1999 – Primera zona	132
Figura 54. Histogramas de Precipitación Total Mensual para el periodo de análisis de 1980 a 1999 – Segunda zona	133
Figura 55. Histogramas de Precipitación Total Mensual para el periodo de análisis de 1980 a 1999 – Tercera zona.....	135
Figura 56. Histogramas de Precipitación Total Mensual para el periodo de análisis de 1980 a 1999 – Cuarta zona	139
Figura 57. Variación anual del índice del vector regional con las estaciones pluviométricas de la zona de estudio por el método de BrunetMoret	140
Figura 58. Variación anual del índice del vector regional en las estaciones pluviométricas de la zona de estudio.....	141
Figura 59. Variación anual del índice del vector regional con las quince estaciones pluviométricas de la zona de estudio por el método de BrunetMoret	142
Figura 60. Variación anual del índice del vector regional en las quince estaciones pluviométricas de la zona de estudio.....	143

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Histogramas de la precipitación total mensual de las estaciones pluviométricas para el periodo de análisis de 1980 a 1999.	132
Anexo 2: Regionalización de las estaciones con el método del vector regional	140
Anexo 3: Variabilidad de la precipitación en la cuenca Chancay Huaral por zonas.....	144

I. INTRODUCCIÓN

En el Perú, el agua es un factor limitante para el desarrollo de la agricultura; el riego utiliza cerca del 80% del agua fresca disponible. Adicionalmente muchos de los valles en la costa presentan una población creciente que también demandan agua fresca, presentándose conflictos sociales entre la agricultura y la población. Por esta razón el análisis del impacto del cambio climático sobre una escala global comienzan a ser extremadamente importantes para formular políticas y estrategias nacionales para el uso sustentable del agua.

Existe una gran variedad de métodos para generar futuros escenarios climáticos. La forma más común involucra el uso de modelos de circulación global (GCM's) para simular el clima del presente y de un futuro posible bajo las condiciones impuestas por cada uno de los escenarios de cambio climático.

Para el estudio, se dispone del modelo Japonés GCM-MRI (*Meteorological Research Institute*) que es un modelo atmosférico global de alta resolución (pixel de 20 km) representando mejor los fenómenos, se obtiene una mejor representación de los efectos topográficos y procesos físicos que permita evaluar las características climáticas, fenómenos y eventos extremos en detalle. La evaluación de posibles efectos del calentamiento global sobre fenómenos meteorológicos en el tiempo y espacio es importante no solo para los científicos sino también desde un punto de vista socio económico (Mizuta et al 2006). La aplicación de estos modelos en diversos estudios de proyección del calentamiento global se han desarrollado sobre América del Sur (Kitoh et al. 2011; Blazquez et al. 2012) y el Caribe (Hall et al. 2012; Nakaegawa et al. 2013; Nakaegawa et al. 2014).

Las estaciones meteorológicas en la Cuenca Chancay Huaral son muy escasas y estas son importantes para determinar el clima, los periodos húmedos y secos en la zona; entonces es necesario contar con otro recurso para poder pronosticar en el futuro la variación de la precipitación y las consecuencias que pueda tener. El modelo MRI nos va permitir tener esta información y desarrollar la evaluación de la precipitación futura y los cambios en el clima que puedan causar estragos en las zonas de agricultura y el área socioeconómica; porque la población en su mayoría depende del sector agrícola, tanto urbano como rural,

porque las actividades del sector urbano están asociadas de forma directa o indirecta interviniendo en la producción agrícola. Además sus recursos hídricos dependen de la precipitación estacional, así como, los aportes de deshielo de los nevados situados principalmente sobre la divisoria continental y los de la derivación transandina de una pequeña parte de la vecina cuenca del río Mantaro.

Teniendo en cuenta los resultados de la evaluación de la precipitación presente obtenida del modelo MRI, se procederá a obtener la precipitación futura en la cuenca; y con ello, conocer los periodos húmedos y secos en el futuro cercano (2020 – 2039) y lejano (2080 – 2099) de la zona de estudio.

En el presente trabajo se investigó las propiedades y ajustes del modelo, en la Cuenca Chancay-Huaral en diferentes, regímenes pluviales, condiciones superficiales, estaciones del año y altitud que permita tener una visión futura del cambio climático en esa zona.

1.1. Objetivo general

a. Comparar la precipitación del modelo de circulación global atmosférico de alta resolución MRI con información pluviométrica y analizar la precipitación futura ante el cambio climático, en la cuenca del río Chancay-Huaral.

1.2. Objetivos específicos

a. Obtener y caracterizar la precipitación del modelo de circulación global atmosférico de alta resolución MRI

b. Comparar la precipitación MRI y la precipitación obtenida de pluviómetros a través de estadísticos

c. Proyectar la precipitación futura ante cambio climático al siglo XXI y analizar el comportamiento de la precipitación a través de indicadores e índices de sequía.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Sistema climático

El sistema climático es un sistema complejo, interactivo que consiste en la atmósfera, la superficie terrestre, la criosfera (hielo marino, cubierta de nieve estacional, glaciares de montaña y capas de hielo a escala continental), los océanos y los seres vivos (biosfera). Las interacciones del sistema climático se producen a través de flujos de energía de diversas formas, de intercambios de agua, de flujos de otros gases en trazas radiactivamente importantes, entre los que figura el dióxido de carbono (CO₂) y el metano (CH₄), y del ciclo de nutrientes. La dinámica del sistema climático se basa en la entrada de energía solar, equilibrada por la emisión de energía infrarroja (“calor”) hacia el espacio. La energía solar es la fuerza conductora más importante de los movimientos de la atmósfera y el océano, de los flujos de calor y agua y de la actividad biológica. También, los componentes del sistema climático inciden en el clima regional y mundial de varias maneras diferentes: a) influyen en la composición de la atmósfera de la Tierra, por lo que modulan la absorción y transmisión de la energía solar y la emisión de energía infrarroja que se devuelve al espacio; b) alteran las propiedades de la superficie y la cantidad y naturaleza de la nubosidad, lo que repercute sobre el clima a nivel regional y mundial; y c) distribuyen el calor horizontal y verticalmente, desde una región hacia otra mediante los movimientos atmosféricos y las corrientes oceánicas. (IPCC, 1997).

La Figura 1 es una representación esquemática del sistema climático y muestra algunas interacciones clave entre los diversos componentes y las propiedades de los componentes que pueden cambiar.

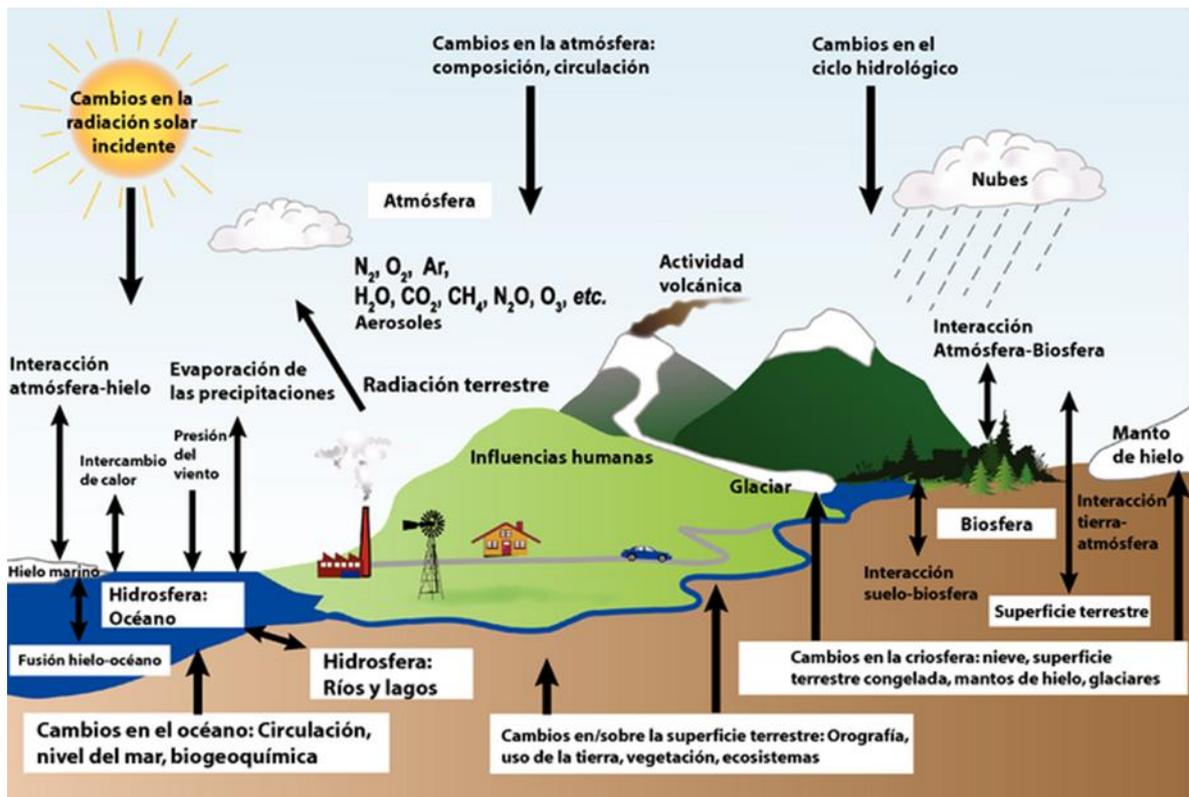


Figura 1. Esquema de los componentes del sistema climático mundial sus procesos e interacciones. Fuente: IPCC, 2007.

El comportamiento del sistema climático, sus componentes y sus interacciones son simulados utilizando los modelos climáticos.

El núcleo de los modelos más complejos lo constituye los llamados “Modelos de Circulación General (MCG) tanto atmosféricos (MCGA) como oceánicos (MCGO)

2.1. Modelos de circulación general (GCM)

Los modelos de circulación general (*General Circulation Model* - GCM, por sus siglas en inglés) son la principal herramienta para la prospección del clima de las próximas décadas, simulan flujos de energía, masa y cantidad de movimiento entre los puntos de una red tridimensional que se extiende por la atmósfera, océanos y las capas superiores de la litosfera y criosfera. Sin embargo la resolución espacial de la mayoría de estos modelos es todavía limitada (~200km), por lo que los escenarios globales no permiten analizar la magnitud de los posibles impactos locales, por lo que la tarea de regionalizar los escenarios globales de cambio climático es importante para poder llevar a cabo de la mejor manera forma de estudios de impacto y adaptación, teniendo en cuenta la variabilidad regional o local de la zona de estudio (SENAMHI, 2014).

Los primeros modelos de circulación de la atmósfera fueron dirigidos por Joseph Smagorinsky en 1953. Los primeros resultados del modelo acoplado océano-atmósfera, es en el que se han basado todos los modelos posteriores, y se deben a Syukuro Manabe y Kirk Bryan, miembros del grupo creado por Smagorinsky, en el Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos en Princeton, Nueva Jersey; en la década de 1960 y principios de 1970. Estos modelos han abierto la posibilidad de explorar escenarios climáticos transitorios, y que constituye un paso hacia el desarrollo de modelos integrales 'Tierra-sistema' que incluyen representaciones explícitas de los ciclos químicos y bioquímicos (IPCC, 2007).

En la actualidad hay unos 15 centros importantes de modelos mundiales, si bien los laboratorios de investigación clave se encuentran en Estados Unidos (National Center for Atmospheric Research- NCAR, Goddard Institute for Space Studies- GISS y Geophysical Fluid Dynamics Laboratory - GFDL) y en Europa (Max Planck de Alemania y Centro Hadley de Reino Unido), también son muy importantes los centros de modelización de Japón, Canadá, Australia, Francia y China.

Es un modelo matemático de la circulación general de una atmósfera planetaria o el océano en una esfera en rotación con términos termodinámicos para diversas fuentes de energía. Estas ecuaciones son la base de complejos programas informáticos utilizados para la simulación de la atmósfera o el océano de la Tierra. GCM atmosféricas y oceánicas son componentes clave de los modelos climáticos globales junto con el hielo marino y los componentes de la superficie terrestre. GCM y los modelos climáticos globales se aplican ampliamente para la predicción del tiempo, entender el clima y proyectar el cambio climático.

Se tiene que los modelos de circulación global tridimensionales se aplican a la atmósfera o a la hidrosfera, simplificando las interacciones con los demás elementos del modelo.

Los modelos atmosféricos de circulación general (MCGA) simulan directamente los vientos y la interacción con la superficie sólida y líquida del planeta, pero los datos de estas dos están prescritos y no se simula su evolución. Los modelos oceánicos de circulación general (MCGO) simulan, entre otros, las corrientes oceánicas, los cambios de salinidad, los flujos de calor y la interacción con la litosfera y la atmósfera, donde los datos de estas dos están prescritos y no se simula su evolución. Y los modelos atmosféricos y oceánicos de circulación general (MCGAO) consisten en el acoplamiento de dos modelos

del tipo anterior, a los que se añaden módulos que simulan las interacciones entre ellos, como los intercambios de humedad, calor y momento entre ellos.

En la Figura 2 se aprecia las variables que se consideran para determinar un modelo GCM y la resolución que se puede tener en cada grilla, calculando los vientos, transferencia de calor, radiación, humedad relativa e hidrología superficial en cada grilla y evalúan las interacciones entre puntos contiguos.

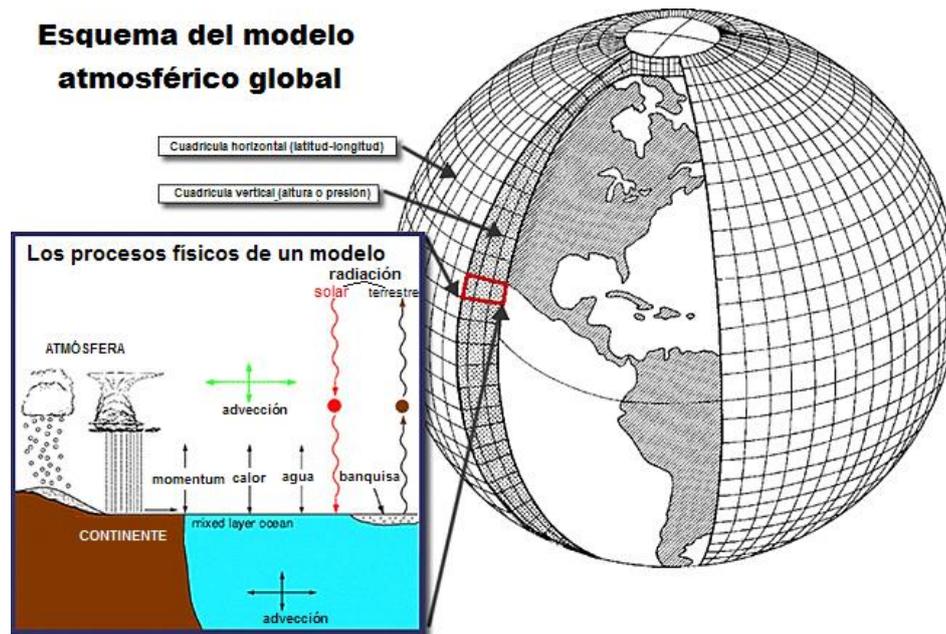


Figura 2. Esquema del modelo de circulación general y de los procesos físicos del modelo atmosférico. Fuente: NOAA, 2011.

2.1.1. Modelos de circulación general de la atmósfera (AGCM)

Los modelos de circulación general de la atmósfera (GCM) son algoritmos matemáticos que intentan simular el sistema climático de la tierra. Estos modelos se encuentran en el extremo superior de la jerarquía de modelos del clima, son acoplados (atmósfera-océano y suelo) y predicen cambios de las variables en un mayor tiempo. Las expresiones matemáticas que configuran un GCM se pueden analizar por separado dentro de las tres principales partes de que constan estos modelos: (1) la dinámica del sistema del clima que describe el movimiento a gran escala de las masas de aire y el transporte de la energía y momentum; (2) la física del sistema climático tal como transmisión de la radiación a través de la atmósfera, la termodinámica, y la evaporación; y (3) otros factores tales como la interacción océano-atmósfera, topografía, y parámetros de la vegetación. Estas expresiones son basadas en las leyes físicas tales como la conservación de energía y masa así como las

relaciones empíricas basadas en características y tendencias observadas, tales como fórmulas que relacionen temperatura y humedad con la formación de la nube.

Los GCM utilizan las mismas ecuaciones de movimiento que un modelo de predicción numérica del tiempo (PNT), siendo su propósito simular numéricamente cambios en el clima como resultado de cambios lentos en algunas condiciones de frontera (tales como la constante solar) o parámetros físicos (tal como la concentración de los gases de efecto invernadero). Los modelos PNT se utilizan para predecir el tiempo futuro a corto plazo (1-3 días) y medio plazo (de 4-10 días). Los modelos GCM corren para mayor tiempo, años; tiempo suficiente para aprender sobre el clima en un sentido estadístico (es decir la media y la variabilidad).

2.2. Downscaling (Reducción de escala)

Para la generación de proyecciones futuras del clima se tiene a los Modelos de Circulación General – GCM, aunque la gran mayoría de modelos tengan una baja resolución de aproximadamente 200 km. Para que se pueda simular el futuro adecuadamente y tomar decisiones políticas de adaptaciones; se debe realizar una reducción de escala, estas estrategias se denominan técnicas de downscaling (reducción de escala) o de regionalización. Este ajuste de escala es particularmente importante en regiones de topografía compleja: montañas, zonas costeras, lagos, etc. Específicamente se tiene dos reducciones de escala: downscaling estadístico y dinámico.

La regionalización climática son técnicas las cuales permiten derivar información a escala más fina desde las salidas de los GCM para estudios de impacto real. Pero existe una incertidumbre con respecto a las magnitudes de estos cambios a escalas regionales, pero esta incertidumbre es cada vez menor. Debido que los investigadores actualmente realizan simulaciones de dicho clima futuro a escala local. Estas simulaciones, denominadas escenarios climáticos locales, mantienen una considerable incertidumbre (existen varias fuentes de incertidumbre: la evolución futura de la sociedad, población, distribución de riqueza, las emisiones de GEI, las modelizaciones utilizadas, las técnicas de regionalización, etc.), pero son lo suficientemente robustas como para ser utilizadas en planificación y definición de políticas relativas a cualquier actividad humana que se proyecte hacia el futuro más de una década (gestión forestal, planificación hidrológica, urbanística, agrícola, turística, etc.) (SENAMHI, 2014).

2.2.1. Downscaling estadístico (Reducción de escala estadístico)

Los métodos de downscaling estadístico son aquellos que se utilizan los parámetros del modelo y se ajustan a los datos observados para simular el clima presente y estos son posteriormente aplicados para proyectar localmente las predicciones futuras suponiendo su estacionariedad de los GCM's. La ventaja de estas técnicas es que utilizan la climatología real observada de la variable local de interés durante el período de referencia y, por lo tanto, calibran/corrigen estadísticamente las posibles deficiencias y desajustes sistemáticos de los modelos globales (debidos, por ejemplo, a la grosera representación de la orografía), es decir, estos relacionan las ocurrencias locales con las simulaciones globales. Otra ventaja de estos métodos es que permiten incluir como predictores del método estadístico sólo aquellas variables de circulación que sean reproducidas con mayor fiabilidad por los modelos numéricos y que dependan en menor medida de parametrizaciones.

Se ha desarrollado una variedad de métodos de reducción de escala estadística para simulaciones climáticas y del tiempo, en escalas locales que oscilan de estacionales y mensuales hasta diarias y horarias.

Normalmente, las diferentes metodologías de regionalización estadística están ampliamente categorizadas en tres clases: a) Tipificación Tiempo (análogos), basado en los vecinos o cercanos en una pre-clasificación del re análisis en un número finito de tipos de tiempo obtenida de acuerdo con su sinóptica similitud; estos métodos son generalmente no-generativa, ya que consisten en un procedimiento algorítmico para obtener la predicción, tales como el método de análogos; b) Las funciones de transferencia (regresión), basado en la regresión lineal o modelos no lineales (por ejemplo, redes neuronales) para inferir las relaciones entre predictandos (Típicamente precipitación y temperatura) y a gran escala predictores (Topografía, humedad, presión atmosférica, temperatura de la superficie, etc.); estos métodos son "generativa" en el sentido de que las proyecciones se derivan de un modelo obtenido a partir de datos; c) Generadores meteorológicas, que simulan estocásticamente diaria valores climáticos basados en el promedio mensual disponible proyecciones o en los procedimientos de re muestreo o simulación aplicada a los datos diarios. Estas técnicas son temporal métodos de desagregación. (Gutiérrez et al., 2012).

En la Figura 3 se observa el modelo climático global de resolución baja y el modelo regional de regional con una alta resolución y la adaptación del modelo que se cumple en cada grilla.

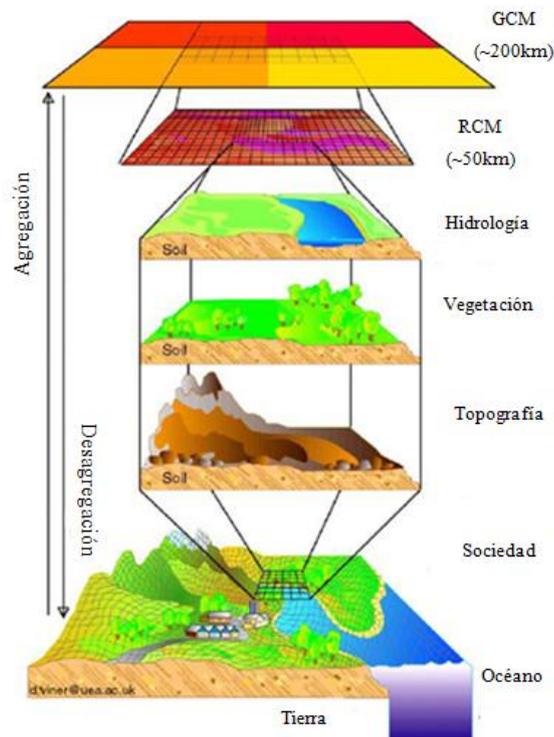


Figura 3. Adaptación de los modelos climáticos globales y regionales. Fuente: SENAMHI, 2014.

2.2.2. Downscaling dinámico (Reducción de escala dinámica)

Las técnicas de regionalización dinámica se basan en el uso de modelos climáticos regionales (MCR). Para aumentar la resolución de los modelos climáticos globales se “anida” un modelo regional de mayor resolución en el interior del modelo global, únicamente en la zona de interés. El modelo regional toma como condiciones de contorno los valores del modelo global a lo largo de toda la integración. Las técnicas dinámicas tienen la ventaja de ser físicamente consistentes y la desventaja de necesitar una gran capacidad de cálculo, lo que limita actualmente las simulaciones a resoluciones de 25 km.

Los resultados de los MCR dependen críticamente de decisiones sobre: espacial y temporal resolución, tamaño y posición del dominio, parametrizaciones de procesos físicos, condiciones de frontera y variabilidad inicial Condiciones internas.

El downscaling dinámico se basa en procesos físicos, éste resuelve ecuaciones diferenciales que representan tales procesos a partir de un GCM que aporta condiciones iniciales y de contorno. Existen tres tipos de downscaling dinámico: 1) Modelos regionales de clima (RCM) o modelos de área limitada (LAM); 2) Modelos uniformemente alta resolución atmosférica GCM o modelos Time-slice; y 3) Modelos Stretched-grid. Los modelos de alta resolución uniforme y los modelos Stretched-grid son computacionalmente muy demandantes pues se desarrollan en todo el dominio global. Las diferencias del uno y del otro consisten en que los de alta resolución uniforme resuelven en alta definición todo el planeta, mientras que los Stretched-grid mejoran la resolución en zonas de interés y el resto del planeta es resuelto a baja resolución. Los RCMs se desarrollan para áreas específicas empleando las salidas de los GCMs como condiciones de contorno. Son computacionalmente menos demandantes que las otras dos técnicas.

Los RCMs poseen algunas limitaciones, entre ellas el alto costo computacional que requiere comparado con los GCMs y el downscaling estadístico. Pero también hay que considerar las ventajas como la de proporcionar información espacial tomando en consideración procesos físicos, lo cual no sucede con el método estadístico (Guanuchi et al., 2015).

En la Figura 4, el modelo Weather Research and Forecasting (WRF) se tiene como ejemplo del desarrollo de downscaling dinámico. El modelo WRF es mantenido y actualizado por Mesoscale and Microscale Meteorology Division de NCAR (National Center for Atmospheric Research) y es de uso público. Además se combina simulaciones con el modelo ECHAM5 que ha sido largamente empleado en modelos regionales de clima, este pertenece al Instituto Max Planck de Alemania. (Guanuchi et al., 2015).

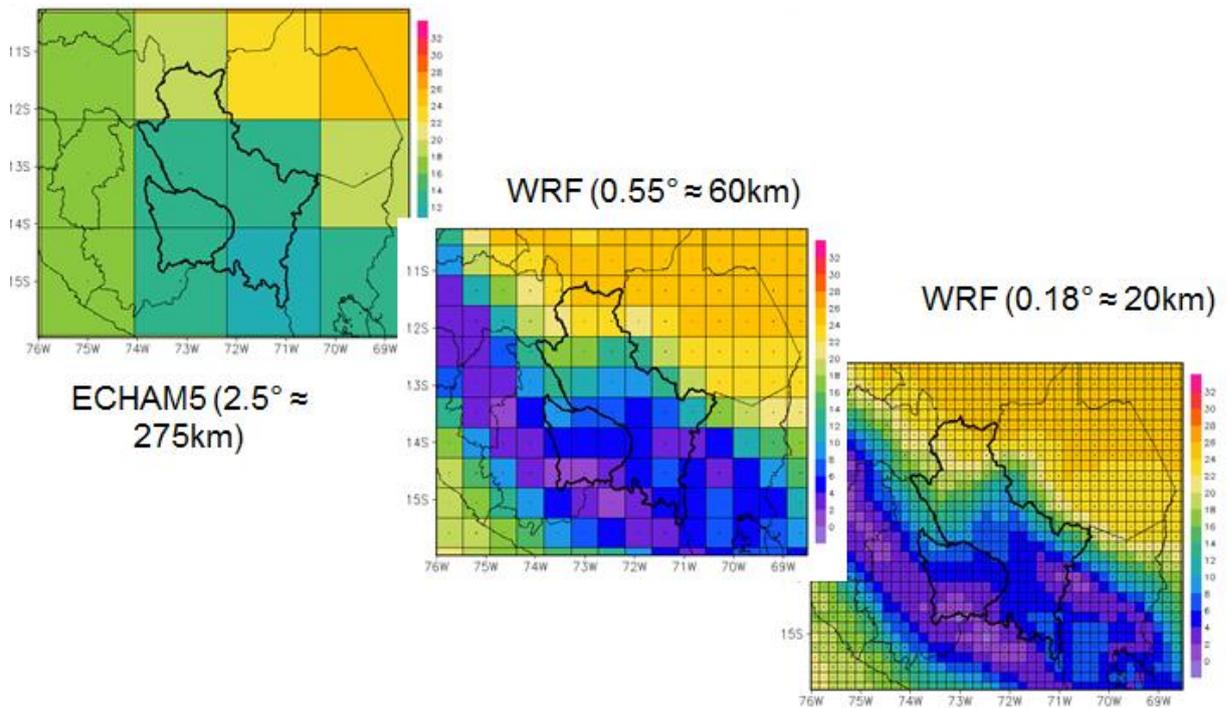


Figura 4. Regionalización dinámica a partir de un modelo climático global ECHAM5, en el que se anida el modelo WRF que fue validado considerando las variables de temperatura, altitud, humedad relativa y específica, presión a nivel del mar, presión en la superficie, humedad del suelo, hielo marino, entre otros. SENAMHI, 2014.

2.3. Modelo MRI – AGCM

El modelo de circulación general atmosférica global de alta resolución (AGCM) fue elaborado conjuntamente por la Agencia Meteorológica de Japón (JMA) y el Instituto de Investigación Meteorológica (Meteorological Research Institute, por sus siglas en inglés MRI) para poder simular el clima y proporcionar predicciones del clima. El modelo se basa en la predicción numérica del tiempo global (PNT) del modelo JMA (JMA-GSM0103), sobre la que se han aplicado modificaciones y mejoras.

La simulación del modelo de circulación general de la atmósfera fue haciendo uso del Earth Simulator (ES), el cual es un supercomputador en vector-paralelo consistente de 512 procesadores, el cual estuvo posicionado como el computador más rápido del mundo en 2004 para realizar cálculos. El modelo como tal fue desarrollado para simular el clima real con alta exactitud a través de mejoras en los esquemas de parametrización y procesos físicos. (Mizuta et al., 2006).

Actualmente existen dos modelos MRI-AGCM. Ambos modelos con 20 km de resolución y se refieren como MRI-AGCM3.1S y la MRI-AGCM3.2S (donde 'S' se refiere a súper-

alta resolución) en el caso de que necesitemos para distinguirlos de los modelos de baja resolución. (Mizuta et al., 2012).

Primero se desarrolló el modelo MRI-AGCM3.1S y posteriormente el modelo MRI-AGCM3.2S. Este último presenta muchos esquemas de parametrización para diversos procesos físicos que son introducidos en el modelo por parte de JMA y MRI. Los esquemas se implementan para ser cambiados fácilmente de los esquemas convencionales. Es así que se especificaran estos cambios.

Primero se tiene el esquema de convección de cúmulos (la definición meteorológica de cúmulos es un conjunto de nubes con apariencia algodonoso con base plana, esta se puede formar solo, en filas o grupos), un nuevo esquema de parametrización de cúmulos, basado en un esquema por Tiedtke, se ha desarrollado y se introdujo en el modelo MRI-AGCM3.2S, reemplazando el pronóstico Esquema de Arakawa-Schubert del el modelo MRI-AGCM3.1S. Ambos esquemas se clasifican como tipo de flujo masivo de cúmulos. En el esquema de tipo Arakawa - Schubert, son múltiples corrientes convectivas ascendentes con alturas diferente (dependiendo del arrastre de tasa) se calculan de forma explícita dentro de un solo celda de la cuadrícula), aunque cada corriente ascendente es un penacho de arrastre simplificado (penacho es una columna de un fluido en movimiento a través de otro, varios efectos controlan el movimiento del fluido, incluyendo impulso, la difusión y la flotabilidad que son diferencias de densidad). En el esquema de tipo Tiedtke, por otra parte, sólo tiene un único convectivo de corriente ascendente, se calcula dentro de una sola celda de la cuadrícula, pero se representa como más detallado arrastre y desarrastre de penacho.). En el nuevo esquema, detallado de arrastre y des arrastre de penacho (como con la Esquema de tipo Tiedtke), se calculan para dos con corrientes ascendentes convectivas dentro de una sola celda de la cuadrícula. Las dos corrientes ascendentes representan la corriente ascendente más alta con un mínimo tasa de arrastre turbulento, y la más corta corriente ascendente con un arrastre máximo turbulento de tasa. Se tiene múltiples corrientes convectivas ascendentes con diferentes alturas (como con la de tipo Schubert Arakawa) se supone que existe, donde la temperatura, la relación de vapor de agua de mezcla, la tasa de arrastre, y otras variables se obtienen por interpolación lineal entre las dos corrientes ascendentes extremas (Mizuta et al., 2012). En la Figura 5 se explica estos tres tipos de esquema de cúmulos.

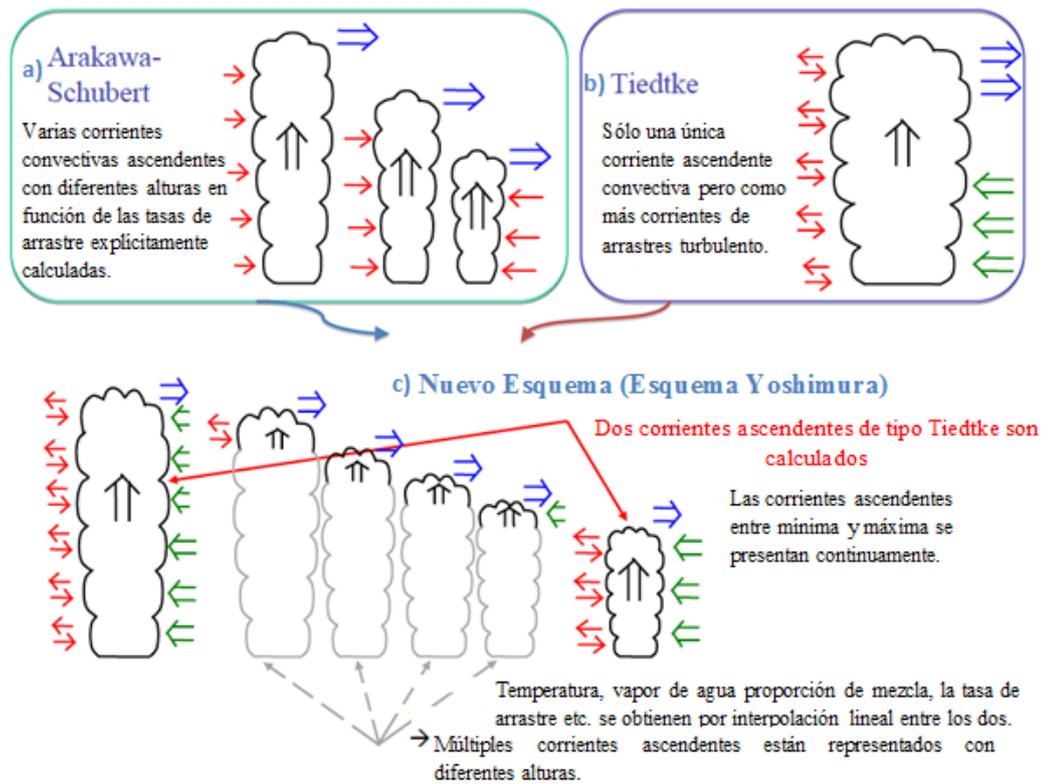


Figura 5. Esquema de Arakawa-Schubert (a), esquema de Tiedtke (b) y el esquema Yoshimura (c).
 Fuente: Mizuta et al., 2012.

En el modelo MRI-AGCM3.1S, para las nubes pronosticadas utilizaron un método similar al de Smith, y para calcular la cantidad de nube y su contenido de agua utilizaron una aproximación estadística propuesta por Sommeria y Deardorff. La fase de nube se supone líquido por encima de 0°C y el hielo por debajo de -15°C . La parametrización de Sundqvist se usó para determinar la tasa de cambio, de contenido de agua a precipitación. Se utilizó un esquema cerrado de turbulencia de nivel 2 de Mellor y Yamada que fue implementado para representar la difusión vertical de momento, calor y humedad (Mizuta et al., 2006).

Para el modelo MRI-AGCM3.2S, se utilizó el esquema de nubes Tiedtke. El agua de la nube y la cantidad de nubes se tratan como variables pronósticos en el esquema. Las nubes se forman a través de enfriamiento adiabático y diabático, ya través de desembarco desde el esquema de convección de cúmulos. Y utiliza también el nivel 2 de turbulencia, esquema de cierre por Mellor y Yamada (Mizuta et al., 2012).

El esquema de la superficie terrestre por Hirai, es la mejora del modelo simple de la Biosfera, utilizado en ambos modelos. Para representar las variaciones de temperaturas diurnas en la interfaz aire-mar debido a las variaciones a corto plazo en el viento y la

radiación solar. Los modelos utilizan la onda de gravedad de esquema de arrastre orográfica por Iwasaki, en el que las ondas de gravedad se dividen en ondas largas (longitud de onda ≥ 100 km) y las ondas cortas (longitud de onda ~ 10 km). Las ondas largas se propagan hacia arriba y se depositan en niveles medios de la atmósfera, mientras que el corto las ondas se encuentran atrapadas en la troposfera y ejercen arrastre en esta región. Los coeficientes de arrastre del Consejo de Europa en MRI-AGCM3.2S son los mismos que aquellos en el modelo operativo (JMA 2007), que son menores que los valores en MRI-AGCM3.1S. Un término de fricción Rayleigh se introduce por encima de 50 hPa (Mizuta et al., 2012).

Un modelo aleatorio multiparámetro de Shibata y Aoki fue usado para radiación terrestre en el modelo MRI-AGCM3.1S, y la absorción debido a metano (CH₄) y óxido de nitrógeno (N₂O) fue tratada en esta versión además el agua (H₂O), dióxido de carbono (CO₂) y el ozono (O₃). El modelo calcula la radiación solar formulada por Shibata y Uchiyama. Un tratamiento del efecto directo de aerosoles sulfatados es considerado en dicho esquema. El tratamiento del suelo ha sido mejorado del modelo simple de biosfera (SIB), especialmente en esquemas de suelo y nieve (Mizuta et al., 2006). En cambio el modelo MRI-AGCM3.2S, el esquema de radiación se ha cambiado al mismo esquema utilizado en el modelo operativo JMA (JMA 2007), excepto para la interacción con aerosoles. Es la representación del efecto directo del aerosol, los parámetros ópticos están configurados para cinco tipos de especies de aerosol: sulfato, negro de carbono, carbono orgánico, polvo mineral, y de sal marina. (Mizuta et al., 2012).

En la Tabla 1 se realiza un breve resumen de las similitudes y diferencias de los dos modelos MRI-AGCM.

Tabla 1: Detalle del modelo AGCM-MRI 3.1 S y 3.2 S. Fuente: Mizuta et al. (2012)

Descripción	MRI-AGCM3.1S	MRI-AGCM3.2S
Resolución Horizontal	TL959 (20 km, 920 x 960)	TL959 (20 km, 920 x 960)
Niveles Verticales	60 (superior a 0.1hpa)	64 (superior a 0.01hpa)
Paso de Tiempo	6 minutos	10 minutos
Convección de cúmulos	Pronóstico Arakawa - Schubert	Yoshimura
Nubes	Smith (1990)	Tiedtke (1993)
Radiación	Shibata y Aoki (1989); Shibata y Uchiyama (1992)	JMA (2007)

Descripción	MRI-AGCM3.1S	MRI-AGCM3.2S
Gravedad de Ola de Arrastre	Iwasaki et al. (1989)	Iwasaki et al. (1989)
Superficie de la Tierra	Hirai et al. (2007)	Hirai et al. (2007)
Capa Límite	MellorYamada (nivel 2)	MellorYamada (nivel 2)
Aerosol (Directo)	Sulfato de Aerosol	Cinco Especies

2.4. Escenarios de cambio climático

Por “Cambio Climático” se entiende un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmosfera mundial y que se suma de la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables. (Convención Marco de la Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, 1992.Art. 1 Inciso 2.)

La variación del clima siempre ha sido cambiante, como consecuencia de procesos naturales desde etapas cálidas a frías y viceversa, en periodos de tiempo cortos como largos. Sin embargo, desde el siglo pasado el ritmo de estas variaciones se ha acelerado de manera anómala, a tal grado que afecta ya la vida en el planeta, y que a diferencia de los cambios naturales parece estar relacionado a procesos de origen antropogénicas. Al buscar la causa de esta aceleración, algunos científicos encontraron que existe una relación directa entre el calentamiento global o cambio climático y el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), provocado principalmente por las sociedades industrializadas (SENAMHI, 2007).

Según el cuarto reporte de síntesis del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), realizado en el año 2000, la actividad humana, en particular el consumo de combustibles fósiles, ha hecho que la capa de GEI que rodea a la tierra sea más densa. Este documento indica que como resultado del cambio de densidad en la capa GEI, la temperatura promedio mundial se ha incrementado significativamente a partir de la década de 1960 y en consecuencia está alterando diferentes sistemas como por ejemplo, la cubierta de nubes, las precipitaciones, las pautas de los vientos, el comportamiento de las corrientes oceánicas y la distribución de las especies vegetales y animales, estos cambios son los que los modelos climáticos globales simulan para el futuro.

Los “escenarios” son descripciones coherentes y consistentes de cómo el sistema climático de la Tierra puede cambiar en el futuro. La metodología empleada para la construcción de escenarios varía de acuerdo al propósito de la evaluación. Por muchos años, los escenarios han sido utilizados por los gobiernos en los ámbitos empresariales y militares como base para el planeamiento estratégico. Estos escenarios socioeconómicos proporcionan un marco para el pensamiento estructurado de cómo el futuro se puede revelar. Por ejemplo, los escenarios pueden requerirse para: Ilustrar el cambio climático (en términos del presente clima), proyección de las consecuencias potenciales del cambio climático, como por ejemplo, estimar el cambio futuro de la vegetación natural e identificar especies en riesgo, planeamiento estratégico ante riesgos de incrementos de nivel del mar y de inundaciones, y políticas de control de las emisiones, etc. (IPCC 2007)

Mediante el uso de escenarios de emisión de gases de efecto invernadero es posible generar “futuros escenarios climáticos”. Los escenarios climáticos son simplemente representaciones posibles y físicamente consistentes del clima del futuro basado en escenarios de emisión de gases de efecto invernadero. Existe una gran variedad de métodos para generar escenarios climáticos. La forma más común involucra el uso de modelos circulación general de la atmósfera (GCM's) para simular el clima del presente y de un futuro posible bajo las condiciones impuestas por cada uno de los escenarios de efecto invernadero. Escenarios climáticos basados en la salida de los GCM's son la mayor fuente de información para la investigación climática hoy en día. De hecho son la mejor herramienta científica disponible actualmente para simular la respuesta del sistema climático global a un cambio climático en la composición de la atmósfera (PRECIS Caribe en Taylor et al., 2007).

En la Figura 6 se visualiza las proyecciones de los cambios de la precipitación a nivel mundial por los promedios multimodelo basados en el escenario A1B para el periodo de 2090 a 2099.

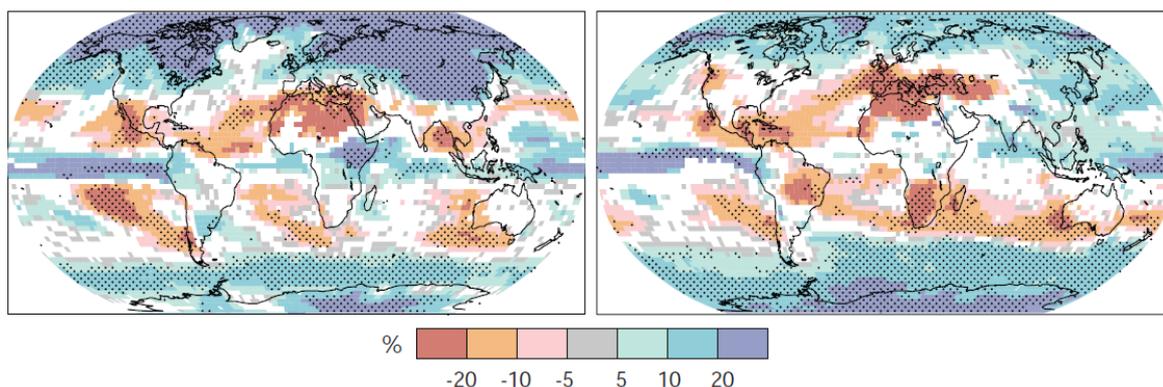


Figura 6. Cambios de la precipitación relativos (en valores porcentuales) para el período 2090-2099, respecto del período 1980-1999. Los valores son promedios multimodelo basados en el escenario A1B (IEEE) para los períodos diciembre-febrero (izquierda) y junio-agosto (derecha). Las áreas en blanco representan los lugares en que más de un 66% de los modelos coinciden en el signo del cambio, y las áreas punteadas representan los lugares en que más de un 90% de los modelos concuerdan en el signo del cambio. Fuente: IPCC, 2007.

2.4. Escenarios de cambio climáticos del IPCC

Los escenarios comprenden una línea evolutiva similar en lo que respecta a sus características demográficas, sociales, económicas y de cambio tecnológico y está constituido de cuatro familias de escenarios: A1, A2, B1 y B2.

A1. La familia de escenarios y línea evolutiva A1 describe un mundo futuro de crecimiento económico muy rápido; la población mundial alcanza su nivel más alto a mitad de siglo y disminuye posteriormente, produciéndose una rápida introducción de nuevas tecnologías más eficientes. Las cuestiones más importantes son la interacción cultural y social entre las regiones y la capacitación, con una importante reducción de las diferencias regionales en los ingresos per cápita. La familia de los escenarios A1 se divide en tres grupos que describen las distintas direcciones del cambio tecnológico en el sistema energético. Los tres grupos A1 se distinguen por su énfasis tecnológico: fuentes de energía intensivas de origen fósil A1F1, de origen no fósil (A1T) o un equilibrio entre todas las fuentes A1B (el equilibrio se define como la no dependencia excesiva de una fuente de energía concreta, suponiendo que se apliquen ritmos similares de mejoras en todas las formas de aprovisionamiento energético y en las tecnologías de uso final).

A2. La familia de escenarios y línea evolutiva A2 describe un mundo muy heterogéneo. La cuestión subyacente es la autosuficiencia y preservación de las identidades locales. Los perfiles de fertilidad en las distintas regiones tienden a converger muy lentamente, lo cual

acarrea un aumento continuo constante de la población. El desarrollo económico tiene una orientación principalmente regional y el crecimiento económico per cápita y el cambio tecnológico están fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas.

B1. La familia de escenarios y línea evolutiva B1 describe un mundo convergente, con la misma población mundial, que alcanza su nivel más alto a mediados del siglo para disminuir posteriormente, como línea evolutiva A1 pero con cambios rápidos en las estructuras económicas hacia una economía de la información y de los servicios, con reducciones en el consumo de materiales e introducción de tecnologías limpias y de recursos eficaces. En esta línea evolutiva se hace hincapié en las soluciones mundiales a la sostenibilidad económica social y ambiental, lo que comprende una mejora de la equidad.

B2. La familia de escenarios y línea evolutiva B2 describe un mundo en el que se hace hincapié en las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y ambiental. Se trata de un mundo cuya población mundial crece continuamente, a un ritmo menor al de la línea evolutiva A2, con niveles medios de desarrollo económico y cambios tecnológicos menos rápidos y más variados¹² que en las líneas evolutivas B1 Y A1. Aunque el escenario también está orientado hacia la protección ambiental y a la equidad social, se centra en las escalas: local y regional.

En el Informe Especial del IPCC sobre escenarios de emisiones proyecta un aumento de las emisiones mundiales de GEI entre 25% y 90% (CO₂-eq) entre el 2000 y 2030. En la Figura 7, se aprecia las Emisiones mundiales de GEI (CO₂-eq) en ausencia de políticas climáticas (Figura 2a) y se ilustra 6 escenarios de IEEE (Informe Especial de Escenarios Emisiones) junto con escenarios recientes desde el IEEE (área sombreada de gris). En la Figura 2b se observa las líneas continuas que representan promedios mundiales multimodelo del calentamiento en superficie para los escenarios A2, A1B y B1, representados como continuación de las simulaciones del siglo XX. Las barras de la derecha indican la estimación óptima (línea continua dentro de cada barra) y el intervalo probable evaluado para los seis escenarios testimoniales IEEE en el período 2090-2099. Esto suponiendo que los combustibles de origen fósil mantengan su posición dominante en el conjunto mundial de fuentes de energía hasta 2030 como mínimo. (IPCC 2007).

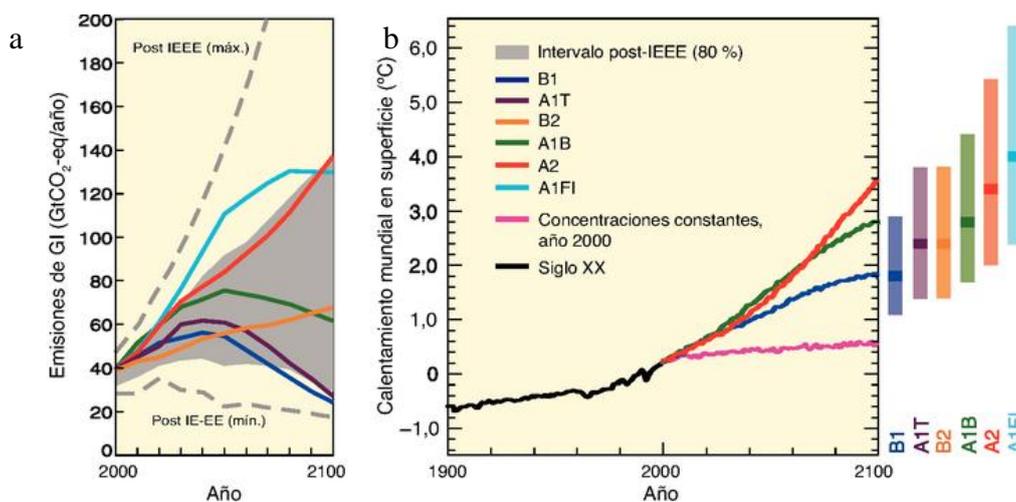


Figura 7. Lado izquierdo: Escenarios de emisiones de gases del efecto invernadero hasta el año 2100 (en ausencia de políticas climáticas adicionales). Lado derecho: Proyección de las temperaturas en superficie hasta el año 2100. Fuente: IPCC 2007.

Para el 2013, las proyecciones de los cambios en el sistema climático se elaboran empleando una jerarquía de modelos climáticos. Esos modelos simulan cambios basados en un conjunto de escenarios de forzamientos antropógenos. Para las nuevas simulaciones de modelos climáticos, realizados en el marco de la quinta fase del proyecto de comparación de modelos acoplados (CMIP5) del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas, se ha utilizado un nuevo conjunto de escenarios que son las trayectorias de concentración representativas (Representative Concentration Pathways, por sus siglas en inglés RCP). En todas las RCP, las concentraciones atmosféricas de CO₂ son más elevadas en 2100 respecto de hoy en día, como resultado de un mayor aumento de las emisiones de CO₂ acumuladas en la atmósfera durante el siglo XXI. (IPCC, 2013). Las características principales de estos RCP son el forzamiento radiativo, siendo una perturbación externa impuesta al balance radiativo del sistema climático de la Tierra, que puede conducir a cambios en los parámetros climáticos; y las concentraciones de CO₂. Además, los nuevos RCP pueden contemplar los efectos de las políticas orientadas a limitar el cambio climático del siglo XXI.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) ha utilizado 4 tipos de escenarios: RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, y RCP8.5. El primero asume que vamos a emitir menos gases de efecto invernadero muy pronto. Que antes de 2030 se habrán reducido todas las emisiones (unas en 2020, otras en 2025 dependiendo del gas). El escenario RCP4.5 asume que es posible que no seamos tan buenos, pero que aun así empezaremos la reducción de gases de efecto invernadero antes de 2050. El escenario

RCP6.5 asume no reduciremos tan rápidamente los gases de efecto invernadero, y que solo dentro de dos generaciones, los nacidos en torno al año 2030, empezarán a tomar decisiones viendo la que se les viene encima con el clima, reduciendo nuestras emisiones de manera efectiva y de forma apresurada. El último escenario, el RCP8.5 considera que no, que la humanidad no tiene enmienda, y que ni aunque las cosas estén mal de verdad no cambiaremos. Que seguiremos emitiendo muchos gases de efecto invernadero.

En la Tabla 2 se especifica las características de cada escenario de emisión RCP. Y en la Figura 8 se observa las variaciones de la temperatura y la precipitación para los escenarios de emisiones RCP2.6 y RCP 8.5.

Tabla 2. Escenarios de emisión con sus respectivas características. Fuente: IPCC, 2013.

Nombre	Forzamiento Radiativo	Concentración de CO ₂	Forma del itinerario
RCP 8.5	>8.5 W/m ² en 2100	>~1370 CO ₂ -eq en 2100	En aumento
RCP 6	Estabilización en ~6 W/m ² a partir de 2100	~850 CO ₂ -eq (estabilización a partir de 2100)	Estabilización sin translimitaciones
RCP 4.5	Estabilización en ~4.5 W/m ² a partir de 2100	~650 CO ₂ -eq (estabilización a partir de 2100)	Estabilización sin translimitaciones
RCP2.6	Máximo a ~2.6 W/m ² antes de 2100; disminución posterior.	Máximo a ~490 CO ₂ -eq antes de 2100; disminución posterior.	Culminación seguida de disminución

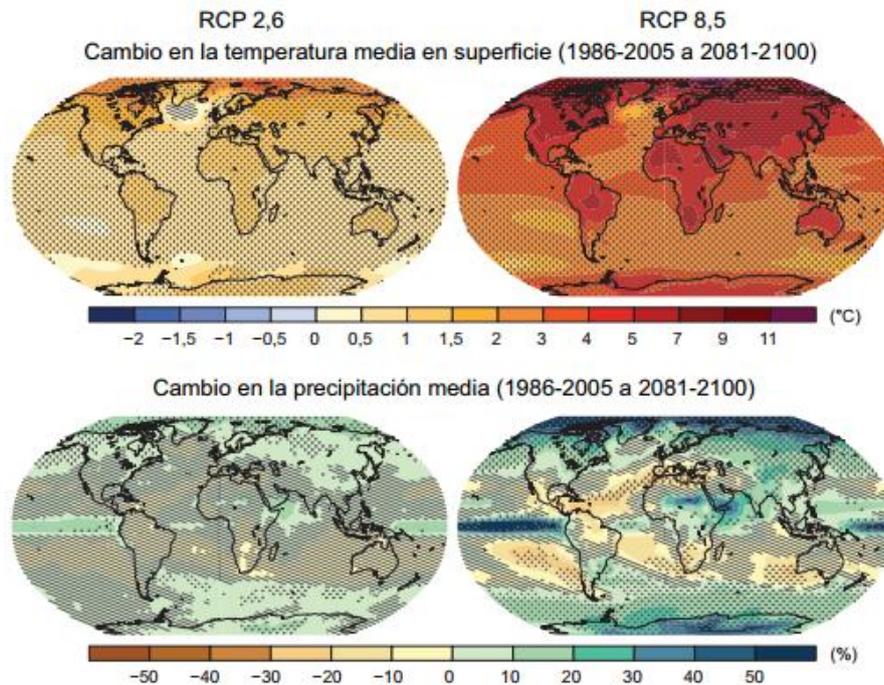


Figura 8. Mapas de resultados medios de modelos múltiples de la quinta fase del proyecto de comparación de modelos acoplados (CMIP5) de los escenarios RCP2,6 y RCP8,5, correspondientes al período 2081-2100, relativos a: el cambio anual en la temperatura media en superficie (parte superior); y el cambio de la media porcentual de la precipitación media anual (parte inferior).

2.5. Sequías

La sequía es un fenómeno perjudicial que se produce a raíz de niveles de precipitación inferiores a los esperados o normal y que, cuando se prolonga, los recursos hídricos son insuficientes para responder a las demandas de la sociedad y el medio ambiente. Este déficit de precipitación se manifiesta a través de la disminución del caudal de los ríos, de los niveles de embalse o de la altura de las aguas subterráneas. (OMM, 2006).

Las sequías que se presentan con frecuencia e intensidad irregular, configuran el panorama de riesgos que enfrenta la actividad agropecuaria de las zonas alto andinas, el transporte y comercio en la cuenca amazónica; la industria de generación de energía, entre otros. La posibilidad de que dicho riesgo desemboque en un desastre, está en relación directa a la poca capacidad de la sociedad para adoptar políticas de desarrollo y acciones de prevención que absorban socialmente las pérdidas económicas. Recientemente en el diagnóstico realizado para el Plan de riesgos y adaptación al cambio climático en el sector agrario – Periodo 2012 a 2021 - PLANGRACC – realizado por el MINAGRI, identifica como zonas de alto y muy alto riesgo a las sequías a la mayoría de distritos de los Andes peruanos.

El problema para la detección de las sequías radica, entre otros factores, en que la información (datos e indicadores) se encuentra dispersa en diferentes instituciones y organizaciones públicas y privadas, además no existe una visión holística de las condiciones actuales de sequía en sus diferentes tipos, ni la propuesta de un sistema de información actualizado y automatizado.

Se puede definir a la sequía que es uno de los fenómenos naturales que afecta a más personas, se extiende de manera irregular a través del tiempo y el espacio, los efectos son acumulativos y pueden permanecer aún después de la culminación del evento; siendo este detalle lo que la distingue de otros fenómenos naturales. (Núñez et al., 2007). Además, el conocimiento del comportamiento de las sequías ha sido un importante aspecto del planeamiento y manejo de los sistemas de recursos hídricos. Generalmente los embalses cumplen una importante función supliendo los requerimientos de la demanda durante el episodio de las sequías de una determinada magnitud y duración, (Hyun-SukShin et al., 2000).

2.5.1. Tipos de Sequías

Por ser sequía un fenómeno complejo muchos investigadores han definido este fenómeno de acuerdo al caso específico del estudio, lo cual varía con el espacio (afectando a zonas más o menos amplias) y en el tiempo (ausencia de precipitación en el periodo de precipitación).

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 (Brass, 1990). Normalmente las variables más empleadas, solas o combinadas que intervienen en este tipo de fenómeno son: Precipitación, temperatura del aire, humedad del aire, evaporación en superficies libres, humedad del suelo, vientos, escorrentía.

Con relación al clima podríamos hablar de tres tipos:

- Sequía permanente, propia de climas áridos (desierto o tundra)
- Sequía estacional, climas que tiene bien definidos la estación lluviosa y seca (India, África Ecuatorial, Regiones del Monzón)
- Sequía aleatoria, provocada por una distribución muy irregular y variable de la precipitación.

Con relación a la disponibilidad de agua.

- Sequía agrícola, no empieza al cesar la precipitación sino cuando las raíces de las plantas no tiene suficiente humedad del suelo, para compensar las pérdidas de agua coaccionadas por la evapotranspiración.
- Sequía hidrológica, indica falta de humedad en los suelos y capas freáticas, con disminución del agua embalsada y estiaje en los ríos por ausencia de precipitaciones pluviales normales.

2.5.2 Caracterización de la sequía

Se base en tres características principales como son: magnitud, duración y área afectada, (Lorenzo, 2012). La primera es la extensión de la sequía, que es la caracterización espacial de un evento de sequía, ayuda a entender la evolución, el inicio y el fin de este fenómeno, e identificar las zonas con mayor riesgo a sufrir temporadas secas, lo suficientemente severas

como para ocasionar un grave desequilibrio hidrológico en un área extensa. El segundo es la duración de un evento de sequía, se define como el número de sucesiones temporales consecutivas e ininterrumpidas (uno o más meses) con un caudal inferior al nivel promedio registrado en un periodo de tiempo relativamente largo. Y por último, es la magnitud de la sequía, haciendo referencia al déficit del volumen acumulado de caudal en una secuencia ininterrumpida de meses que delimita un evento de sequía, el cual se cuantifica mediante la sucesión negativa acumulada.

Hay un parámetro muy usual que se utiliza en la caracterización de sequías que viene ser la *intensidad*. La cual es una medida de severidad del evento, 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, conocido como intensidad máxima.

2.5.3. Índices de sequía meteorológica

Los indicadores de sequía están relacionados con cientos de datos de precipitación, nieve, caudales de los ríos e indicadores de suministro de agua. En general, no se utiliza un único indicador para caracterizar la sequía en una zona.

A continuación se presenta algunos indicadores de sequía:

a. Porcentaje de precipitación normal (PPN)

Es una de las simples medidas de precipitación y son efectivos para una estación o sitio en estudio (región). Este índice es calculado para distintos periodos de discretización. De esta manera, se puede estudiar la precipitación mensual, o agrupando precipitaciones por trimestre, se tendrá un índice estacional y por años, anual.

Una de las desventajas de este método es que el promedio de la precipitación no es igual a la mediana, puesto que la precipitación mensual o estacional generalmente no tiene una distribución normal.

Pese a sus limitaciones es uno de los índices más utilizados debido a su simplicidad y puede ser calculado incluso en zonas con poca disponibilidad de información meteorológica.

b. Precipitación tendencia anual

Con este método se puede calcular las anomalías con respecto a lo normal y en segundo lugar el valor de las precipitaciones anuales.

La anomalía permite identificar tendencias de déficit y superávit de precipitación anual en la cuenca. El indicador compara la precipitación observada con la precipitación normalmente observada en la cuenca. Valores positivos de la anomalía indican una precipitación mayor a lo normal, es decir un superávit. Valores negativos de la anomalía indican una precipitación menor que lo normal, es decir un déficit en la pluviometría.

c. Índice de precipitación estandarizado (SPI)

El Índice Estandarizado de Precipitación (SPI, por sus siglas en inglés o IPE en español) es un índice de normalización de la precipitación histórica que permite identificar condiciones de déficit y exceso de precipitación a corto y largo plazo. El índice es calculado en base a la suposición de que la distribución probabilística de la precipitación es Gamma, por lo que al utilizar estos índices para ajustarlos a una distribución de probabilidad normal se le nombra como estandarización o normalización de la precipitación. Los valores son representativos de la variabilidad de la precipitación con respecto a su historial, en donde los valores negativos indican déficit y los positivos superávit (McKee et. al., 1993).

Las sequías de importancia para la agricultura resultan en déficits de la humedad del suelo y las sequías de tres a seis meses pueden causar un gran impacto. Las sequías más prolongadas (de meses a años) pueden tener impactos significativos sobre las reservas de agua superficial y subterránea.

El Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) es una herramienta que fue desarrollada principalmente para definición y seguimiento de la sequía. Permite al analista determinar la rareza de una sequía a una escala dada de tiempo (resolución temporal) de interés para cualquier estación de la precipitación con histórico datos.

En forma operacional los valores de SPI se calculan a través de un programa de cómputo, el cual requiere como datos de entrada, las precipitaciones mensuales del registro histórico de interés, obteniéndose datos de salida en un archivo con extensión, siendo necesario tal vez cambiar el formato. El SPI indica que valores por debajo de un valor -1 indican

condiciones de déficit significativos, mientras que valores mayores que +1 indican condiciones más húmedas que lo normal, y los valores entre -1 y +1 caracterizan un periodo como normal. El rango de los valores de SPI se encuentra comprendidos entre +3 y -3.

El SPI está disponible para diferentes periodos de acumulación: 1, 3, 6, 9 o 12 meses, lo cual permite evaluar la duración de las condiciones de sequía y superávit para diferentes escalas de tiempo.

El SPI se calcula a partir de una serie de datos de precipitaciones mensuales para un periodo seleccionado de por lo menos 30 años, ordenando meses y precipitaciones mensuales correspondientes, a partir del primer mes en forma continua. Hay que seleccionar las escalas temporales de 1, 3, 6, 12, 24 ó 48 meses, para comparar los valores de precipitaciones de los meses correspondientes con el promedio de periodos idénticos de toda la serie.

El cálculo del SPI tiene su fundamento en el ajuste de una serie de registros históricos de precipitación total mensual, a la función de distribución tipo Gamma para definir la relación de probabilidad a precipitación, si bien ésta distribución ofrece algunas dificultades en las zonas de muy poca precipitación, debido a que no se encuentra definida para valores de la variable iguales a 0. La función es luego transformada a una distribución normal estandarizada (con media igual a 0 y varianza igual a 1), siendo el SPI el valor resultante de esta transformación. Es decir, el SPI representa el número de desviaciones estándar que cada registro de precipitación se desvía del promedio histórico, siendo, además, independiente de la localización de la estación meteorológica y del rango de valores de tal manera que diferentes estaciones y áreas climáticas se representan a través de una misma base.

d. Índices de deciles de precipitación

Desarrollado por (Gibbs&Maher, 1967) para obtener la distribución espacial de las sequías en Australia, se determina a partir de la agrupación de las precipitaciones mensuales en función a su magnitud en diez intervalos, permitiendo realizar una evaluación de las desviaciones con respecto a un comportamiento normal. Cada intervalo está compuesto por un 10% de la población de acuerdo a su distribución estadística.

El primer décimo corresponde a la cantidad de precipitación que no es excedida por el 10% de la precipitación ocurrida. El segundo décimo corresponde a la precipitación que no excede al 20% más bajo de las ocurrencias. Los décimos continúan hasta el décimo 10 que corresponde a la precipitación de mayor magnitud registrada. Por definición el quinto décimo coincide con la mediana.

Los límites de cada décimo se establecen ordenando la muestra de tamaño n y asignando a la variable $P_{(10)}$ el valor de mayor magnitud y a la variable $P_{(1)}$ al menor. Luego el valor de cada décimo se obtiene de la siguiente forma: $D_{(1)} = P_{(1)} + C$, $D_{(i)} = P_{(i)} + C$, para $i= 2$ a 10 y $C = (P_{(10)} - P_{(1)}) / 10$.

La clasificación de la precipitación de acuerdo a este criterio se indica en la

Tabla 3. Clasificación de Deciles de Precipitación. Fuente: Gibbs & Maher. 1967

Clasificación	Límite de Frecuencia	Décimo
Muy muy arriba del Promedio	90-100	1
Muy arriba del Promedio	80-90	2
Arriba del Promedio	70-80	3
Ligeramente arriba del promedio	60-70	4
Normal	50-60	5
Normal	40-50	6
Ligeramente abajo del Promedio	30-40	7
Abajo del promedio	20-30	8
Muy abajo del promedio	10-20	9
Muy muy abajo del promedio	0-10	10

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Materiales

3.1.1. Descripción de la zona de estudio

El estudio se realizó en la cuenca alto andina del río Chancay – Huaral, este se halla ubicada en la parte media de la costa central del Perú, al norte del departamento de Lima, abarcando las provincias de Huaral y parte de la provincia de Lima. Tiene un área de 3094.28 km², altitud media de 2656.60 msnm, pendiente media de 48%, la pendiente media del río es de 4.16%, la longitud del cauce principal es de 102.7 km y densidad de drenaje de 0.59 km/km².

El clima de la Cuenca Chancay – Huaral desde el litoral hasta la divisoria se han identificado cinco tipos climáticos predominantes que varía desde árido y semi – cálido, semi- árido y templado, húmedo, frígido, a pluvial y gélido, con una precipitación pluvial de escasos milímetros en la costa árida y desértica, hasta un promedio estimado de 900mm en el sector de Puna (4800m.s.n.m.); sobre esta altura se presentan precipitaciones en forma de granizo y nevada. Las temperaturas son variables con promedios que van desde los 21°C en la costa, hasta 0°C en las altas cumbres, y una humedad relativa de 78% en la Costa a 65% en la sierra.

Hidrográficamente, la cuenca pertenece a la vertiente del Pacífico. Tiene su origen en tres sistemas de lagunas y los glaciares de la vertiente occidental de los Andes. Los sistemas de lagunas que originan al río Vichaycocha, río Chicrín y río Quiles-Ragrampi, que originan al río Chancay, se alimentan de los deshielos permanentes de los nevados de Puajanca, Alcoy y Tuyun; y el aporte de las precipitaciones que ocurren en la zona.

En la cuenca existe la estación hidrométrica Santo Domingo que se ubica a 564 m.s.n.m. en el distrito de Huaral. Los caudales registrados en la estación, no obedecen a un régimen natural propiamente dicho, debido a que existe la regulación de algunas lagunas en las nacientes de las Subcuencas de Vichaycocha y Baños. Se cuenta con los caudales regularizados en esta estación, y no se tiene el aporte de estas regulaciones.

La información de la precipitación de pluviómetros, ha sido obtenida a partir de las estaciones meteorológicas administradas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). Se seleccionaron dieciocho estaciones pluviométricas con información diaria para ver Tabla 4 y Figura 9 la zona de estudio.

Tabla 4: Estaciones pluviométricas en la zona de estudio para el periodo 1980 a1999.
Fuente: SENAMHI.

N°	Estación	Dpto.	Provincia	Distrito	Cuenca	Longitud (°W)	Latitud (°S)	Altitud msnm
1	Huayan	Lima	Huaral	Huaral	Chancay - Huaral	77° 07'1	11° 27'1	350
2	Pallac	Lima	Huaral	Atavillos - Bajo	Chancay - Huaral	76° 48'1	11° 21'1	2570
3	Carac	Lima	Huaral	Veintisiete de Noviembre	Chancay - Huaral	76° 47'1	11° 11'1	2600
4	Pirca	Lima	Huaral	Atavillos - Alto	Chancay - Huaral	76° 39'1	11° 14'1	3300
5	Santa Cruz	Lima	Huaral	Sta. Cruz de Andamarca	Chancay - Huaral	76° 38'1	11° 12'1	3590
6	Huamantanga	Lima	Canta	Huamantanga	Chillón	76° 45'1	11° 30'1	3368
7	Huaros	Lima	Canta	Huaros	Chillón	76° 34'1	11° 24'1	4500
8	Pariacancha	Lima	Canta	Huaros	Chillón	76° 30'1	11° 23'1	3800
9	Parquin	Lima	Huara	Sta. Leonor	Huara	76° 43'1	10° 58'1	3590
10	Alcantarilla	Lima	Huara	Huara	Huara	77° 33'1	11° 03'1	120
11	Paccho	Lima	Huara	Paccho	Huara	76° 56'1	10° 57'1	3110
12	Picoy	Lima	Oyon	Sta. Leonor	Huara	76° 44'1	10° 55'1	3995
13	Santa Rosa	Lima	Huara	Sayan	Intercuenc a Pacifico	77° 23'1	11° 13'1	380
14	Marcapomacocha	Junín	Yauli	Marcapomacocha	Mantaro	76° 19'31.1	11° 24'17	4479
15	Yantac	Junín	Yauli	Marcapomacocha	Mantaro	76° 24'1	11° 20'1	4684
16	Carampoma	Lima	Huachochiri	Carampoma	Rimac	76° 30'56	11° 39'19.1	3426
17	Autisha	Lima	Huachochiri	San Antonia	Rimac	76° 36'41	11° 44'18.2	2237
18	Matucana	Lima	Huachochiri	Matucana	Rimac	76° 22'41.8	11° 50'21.8	2431

b. Precipitación global del modelo MRI - AGCM

La precipitación global del modelo climático atmosférico MRI – AGCM, se obtiene de las variables físicas atmosféricas, también llamadas predictores y a partir de estos se obtiene un resultado de variables atmosféricas, llamadas predictandos, en el estudio la variable atmosférica obtenida es la precipitación, y el método utilizado para la reducción de escala es estadístico.

Para obtener la precipitación, se dispone de la base de datos del modelo MRI – AGCM a 20 km de resolución en datos binarios.

El modelo MRI-AGCM es un modelo de alta resolución, aplicado al futuro de la temperatura de la superficie del mar (SST, por sus siglas en inglés) dado al tipo de proyecciones climáticas, siendo el tipo de intercomparación de modelos atmosféricos proyectados (AMIP, por sus siglas en inglés), para climas extremos como ciclones tropicales y fuertes precipitaciones, además para las proyecciones regionales, obteniendo fenómenos de menor escala como nevados, ciclones tropicales y precipitaciones intensas. Los tipos de proyecciones AMIP son aquellos que tienen presente la temperatura de la superficie del mar en común y se puede comparar los cambios del futuro en eventos extremos, ciclones tropicales y climatología regional.

En la Figura 10 se muestra inicialmente un esquema de los modelos climáticos globales CMPI3 y AOGCM's (modelo acoplado océano – atmósfera) de baja resolución, la parte atmosférica (AGCM) tiene una resolución de 180 km de grilla, mientras que la parte oceánica (OGCM) está entre 100 – 50 km de grilla; el modelo de alta resolución MRI – AGCM (resolución 20 km) usa como parámetro para su desarrollo la temperatura de la superficie del mar (SST) principalmente, además de otras variables. Este modelo nos permitirá evaluar los impactos (desastres, la vulnerabilidad de la agricultura, los recursos hídricos), estudios de los cambios futuros en los eventos extremos y el cambio climático regional. El modelo MRI de 20 Km se adecua para las condiciones de entrada para un modelo regional no hidrostático (NHM) de una resolución espacial de 5 km a 1km de grilla horizontal, para estudio de eventos a menor escala. Además en la Figura 10 se presenta el cambio de la temperatura de la superficie del mar, el tiempo presente 1979 a 2003 con las observaciones del tipo de intercomparación de modelos atmosféricos proyectados (AMIP), y se presenta un futuro del periodo de 2015 a 2039 y de 2075 a 2099, señalando el cambio que se tendrá de la observación y la proyección para la superficie de la temperatura del mar.

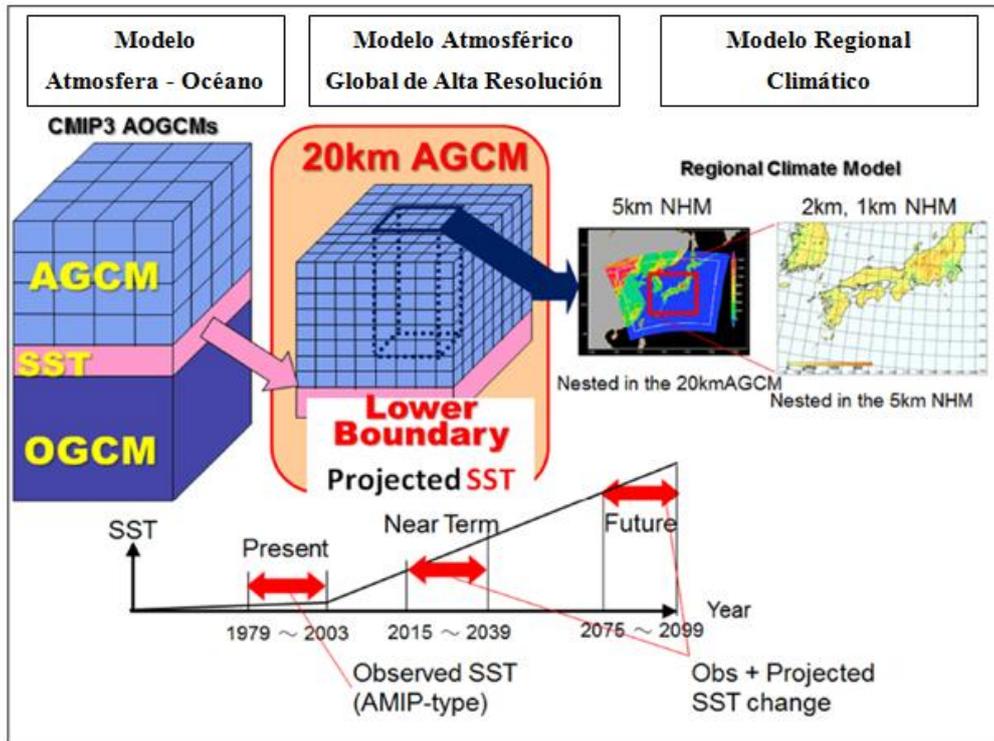


Figura 10. Parte superior: Resolución espacial de los modelos AOGCM's, el Modelo MRI y el modelo climático regional NHM. Parte Inferior: Línea de tiempo de la temperatura de la superficie del mar (SST), se presenta el periodo presente, y los futuros cercano y lejano que se proyectan para el cambio de la temperatura de la superficie del mar (SST). Fuente: IPCC, 2013.

3.1.2. Software y equipos

- MATLAB R2010a, se procedió a realizar el downscaling estadístico para los datos del modelo MRI – AGCM. Para el periodo presente y futuro.
- Hydraccess v4.2, permitió la regionalización con la base de datos de estaciones pluviométricas en Microsoft Access, además de identificar la ubicación de los cuatro grupos de las estaciones en las cuatro zonas climáticas. Está disponible en: www.mpl.ird.fr/hybam/outils/hydraccess_sp
- ArcGis 10, con el ArcMap, ArcCatalog y ArcToolbox, con las extensiones analysis tools, conversiontools, spatial analysis tools, modelbuilder, raster calculator y editor. Se elaboró las presentaciones de mapas y otros gráficos que representen el objetivo de la investigación a un nivel espacial.
- SPI SL 6, permitió generar los resultados del indicador de índice de sequía estandarizada (SPI) para las cuatro zonas climáticas. Está disponible en: <http://drought.unl.edu/MonitoringTools/DownloadableSPIProgram.aspx>

- Microsoft Office, se realizó la automatización de cálculos y digitalización de textos mediante Microsoft Excel (tablas dinámicas, funciones de cálculo y gráficos) y Microsoft Word.

3.2. Métodos

La metodología que se realizó para el procesamiento de datos globales para el periodo presente y el futuro de la precipitación del modelo MRI - AGCM, y obtener la anomalía de la precipitación en la cuenca Chancay Huaral de manera puntual y espacial, se detalla en la Figura 11, que representa un esquema de lo que se ejecutó para obtener el objetivo general.

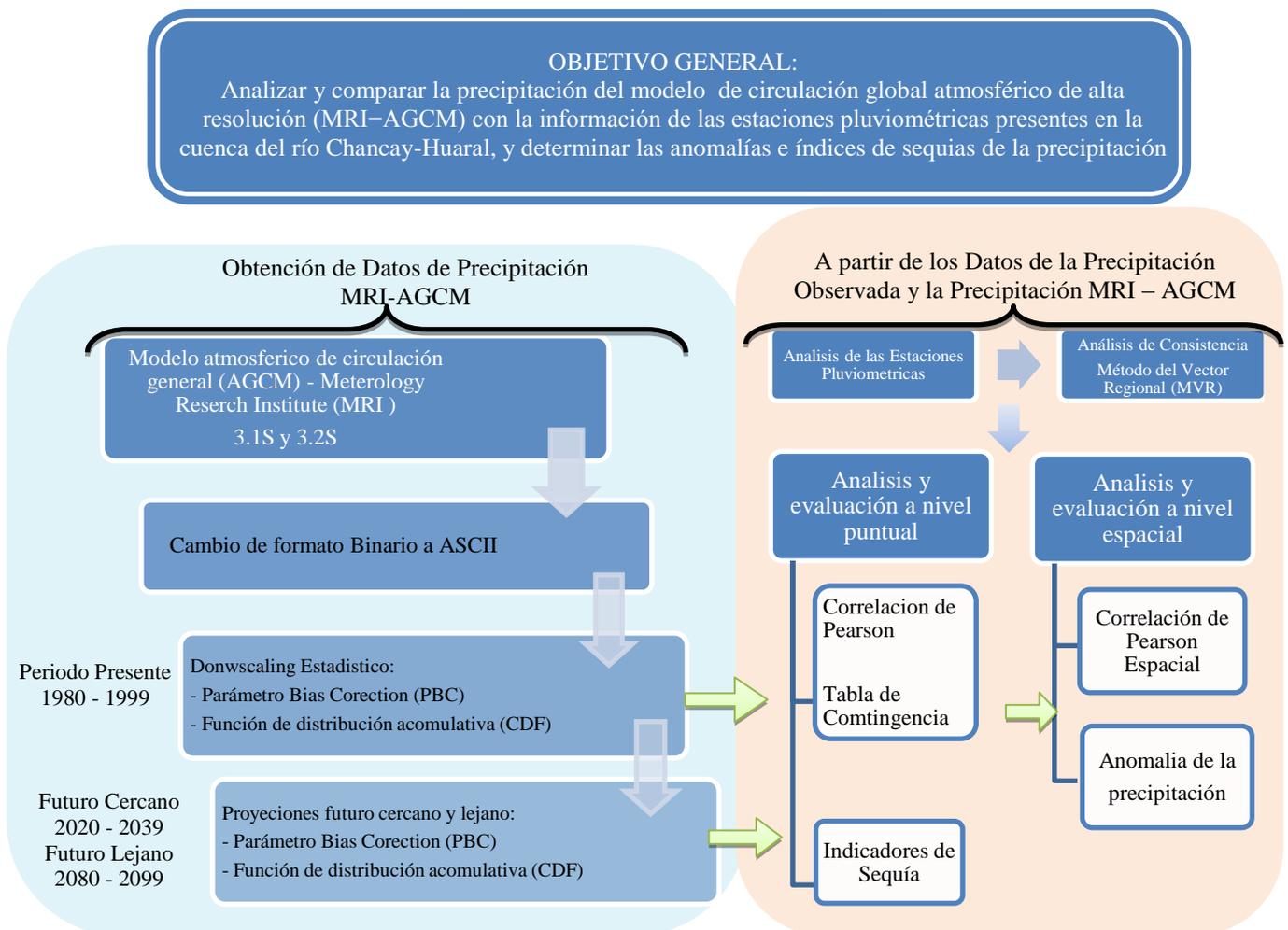


Figura 11. Esquema de la metodología de la investigación para alcanzar el objetivo general.

3.2.1 Análisis preliminar de las estaciones pluviométricas

Se realiza el siguiente análisis para la información de precipitación de las estaciones pluviométricas de las dieciocho estaciones. Para posteriormente trabajar en la cuenca Chancay Huaral en zonas con ayuda del vector regional.

a. Análisis de consistencia

La inconsistencia y homogeneidad de registros hidrológicos, representa uno de los aspectos más importantes del estudio en la hidrología contemporánea. Inconsistencia es sinónimo de error sistemático y se presenta como saltos y tendencias, y no homogeneidad es definido como los cambios de los datos vírgenes con el tiempo debido a la acción del hombre o causas naturales como: a) Movimiento de las estaciones en una distancia horizontal, b) movimiento en una distancia vertical, c) cambios en el medio ambiente de una estación.

El tratamiento a datos hidrológicos se refiere a la identificación, cuantificación y corrección de estas series donde existen errores sistemáticos. La prueba estadística permite concluir si la serie es homogénea o no. Estas pruebas pueden ser paramétricas (la prueba estadística de T de Student, la prueba estadística de Cramer y la prueba estadística F de Fisher) y no paramétricas (la prueba estadística de Helmert, la prueba estadística de secuencia, entre otros). En los casos en que los parámetros de media y desviación estándar resultan ser estadísticamente iguales, la información original no se corrige por ser consistente con 95% de probabilidades, aun cuando en el doble masa se observa pequeños quiebres.

Muchas estaciones de precipitación o descargas tienen periodos faltantes en sus registros, debido a la ausencia del observador o fallas instrumentales. A menudo es necesario estimar algunos de estos valores faltantes para lo cual existen muchas formas de suplir estas deficiencias y el grado de aceptación de uno de estos métodos va a depender de la cantidad de observaciones faltantes en el registro de datos. Entre estos métodos podemos mencionar los siguientes: completación de datos mediante un promedio de datos existentes, completación de datos mediante el método de razones normales, completación de datos por correlación entre dos estaciones y la completación de datos mediante métodos numéricos (generación aleatoria).

b. Método de vector regional

El método de vector regional (MVR) es un modelo simple orientado al análisis de la información pluviométrica de una región y a la síntesis de esa información. La hipótesis fundamental en la que se basa, consiste en asumir que para una misma zona climática sometida a un mismo régimen de precipitaciones, los totales pluviométricos anuales son pseudo-proporcionales, con una pequeña variación aleatoria cada año debido a la repartición de las precipitaciones dentro de la zona.

El principal fundamento del MVR, es elaborar una estación ficticia que sea una “especie de promedio de todas las estaciones de la zona, con la cual se comparan cada una de las estaciones. Para calcular esta “estación vector”, el MVR aplica el concepto de promedio extendido de precipitación al período de trabajo, que es una estimación del posible valor medio que se hubiera obtenido por medio de observaciones continuas durante el periodo de estudio.

Bajo estos conceptos, se emplea el método de Mínimos Cuadrados para encontrar los Índices Pluviométricos Regionales Anuales “Zi” y la Precipitación Promedio Extendida “Pj”. Esto se logra al minimizar la sumatoria de la siguiente expresión:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \left(\frac{P_{ij}}{P_j} - Z_i \right)^2$$

Donde i es el índice del año, j el índice de la estación, N el número de años, y M el número de estaciones. Pij representa la precipitación anual en la estación j en el año i, Pj es el promedio de precipitaciones en N años y, por último, Zi es el índice regional pluviométrico del año i. La serie de índices cronológicos Zi se llama “vector regional de índices pluviométricos anuales”.

Dos métodos han sido desarrollados en paralelo por Brunet-Moret (1979) y Hiez (1977), siendo la principal diferencia la forma en que el cálculo de promedio extendido de precipitación Pj se lleva a cabo. El primero, considera que el promedio extendido de una estación se calcula utilizando los valores observados, después de eliminar valores extremos; es decir, datos diferentes de los de la mayoría de las estaciones cercanas durante un año determinado.

El segundo considera que el promedio extendido de una estación se calcula sobre la base de los valores más frecuentes (la moda), en conformidad con las estaciones vecinas. Por lo tanto, no hay necesidad de eliminar los datos que difieren considerablemente del promedio, como se hace en el primer método. En base a estos conceptos, es posible analizar los datos mediante un proceso iterativo de selección de la estación dentro de una región climática específica. La selección se sustenta con mapas climatológicos y la descripción de los regímenes de precipitaciones. El proceso iterativo calcula el vector, revisa los resultados, separa estaciones inconsistentes, calcula el vector una vez más, etc. Las estaciones rechazadas cerca de la frontera de una región puede presentar el comportamiento de una

región vecina. Estas estaciones se toman en cuenta para calcular el vector de una nueva región climática. Cada región resultante se asocia con un «vector regional» que representa la variabilidad interanual pluviométrica en la región, y también es similar al comportamiento de todas las estaciones que forman parte de esta región.

Para el presente estudio se empleara el paquete computacional HYDRACCESS, el cual tiene incluido un módulo para el cálculo del vector regional por el método de Brunet Moret o Hiez. El software Hydraccess nos permite calcular el Vector Regional en tiempo anual, buscar las zonas climáticas homogéneas (fase de regionalización) para las cuales se genera una serie cronológica representativa de índices anuales.

Para determinar la evaluación de la calidad de una estación, es función de diferentes parámetros calculados; los parámetros más importantes, que dan una buena idea del comportamiento de una estación son: (a) La Desviación Standard de los Desvíos (D.E.D), compara la desviación de una estación respecto al vector, un valor fuerte indica desviaciones fuertes. (b) Correlación entre la estación y el vector, si la zona es homogénea climáticamente, los valores serán cercanos entre sí, si un valor es sensiblemente más bajo que el promedio de la zona, entonces la estación tiene fuerte probabilidad de tener errores o que se encuentre en el margen de la zona.

Para la obtención del Vector regional en el estudio, se aplicó el método de Brunet – Moret para las precipitaciones anuales de las 18 estaciones durante el año hidrológico (septiembre - agosto) en el periodo de 1980 a 1999.

3.2.2. Extracción de la información MRI – AGCM y cambio de formato.

La información del modelo MRI – AGCM se encuentra en formato binario, el cual se tiene que extraer, este modelo se encuentra en el Escenario A1B. El procedimiento de extracción de los datos de la base del modelo MRI – AGCM son alrededor de la estación de destino, la estación de destino es aquella que se elige estando dentro de la cuenca y/o alrededor de esta. El periodo de tiempo presente es del año 1980 a 1999. Las estaciones a evaluar se muestran en la Tabla 5 tal cual es ingresado para la extracción de datos del modelo MRI. En la Figura 12, se demuestra que puntos son extraídos del modelo MRI – AGCM a partir de una estación pluviométrica.

Tabla 5. Formato por extracción de las estaciones pluviométricas del modelo MRI-AGCM para la zona de estudio.

Comando	Estaciones	360°-Longitud	Latitud	Año Inicio	Año Final	Ubicación del Modelo																																																																																																	
extract.exe	HUAYAN	282.8831	-11.4502	1980	1999	F:/SPA_2																																																																																																	
extract.exe	PALLAC	283.1997	-11.3502	1980	1999	F:/SPA_2																																																																																																	
extract.exe	CARAC	283.2164	-11.1836	1980	1999	F:/SPA_2																																																																																																	
extract.exe	PIRCA	283.3497	-11.2336	1980 <td 1999	F:/SPA_2	extract.exe	SANTA CRUZ	283.3664	-11.2002	1980	1999	F:/SPA_2	extract.exe	HUAMANTANGA	283.2497	-11.5002	1980	1999	F:/SPA_2	extract.exe	HUAROS	283.4331	-11.4002	1980	1999	F:/SPA_2	extract.exe	PARIACANCHA	283.4997	-11.3836	1980	1999	F:/SPA_2	extract.exe	PARQUIN	283.2831	-10.9669	1980	1999	F:/SPA_2	extract.exe	ALCANTARILLA	283.4497	-11.0502	1980	1999	F:/SPA_2	extract.exe	PACCHO	283.0664	-10.9502	1980	1999	F:/SPA_2	extract.exe	PICOY	283.2664	-10.9169	1980	1999	F:/SPA_2	extract.exe	SANTA ROSA	282.6164	-11.2169	1980	1999	F:/SPA_2	extract.exe	YANTAC	283.5997	-11.3336	1980	1999	F:/SPA_2	extract.exe	MARCAPOMACOCHA	283.6747	-11.4047	1980	1999	F:/SPA_2	extract.exe	CARAMPOMA	283.4844	-11.6553	1980	1999	F:/SPA_2	extract.exe	AUTISHA	283.3886	-11.7383	1980	1999	F:/SPA_2	extract.exe	MATUCANA	283.6217	-11.8393	1980	1999	F:/SPA_2
extract.exe	SANTA CRUZ	283.3664	-11.2002	1980	1999	F:/SPA_2																																																																																																	
extract.exe	HUAMANTANGA	283.2497	-11.5002	1980	1999	F:/SPA_2																																																																																																	
extract.exe	HUAROS	283.4331	-11.4002	1980	1999	F:/SPA_2																																																																																																	
extract.exe	PARIACANCHA	283.4997	-11.3836	1980	1999	F:/SPA_2																																																																																																	
extract.exe	PARQUIN	283.2831	-10.9669	1980	1999	F:/SPA_2																																																																																																	
extract.exe	ALCANTARILLA	283.4497	-11.0502	1980	1999	F:/SPA_2																																																																																																	
extract.exe	PACCHO	283.0664	-10.9502	1980	1999	F:/SPA_2																																																																																																	
extract.exe	PICOY	283.2664	-10.9169	1980	1999	F:/SPA_2																																																																																																	
extract.exe	SANTA ROSA	282.6164	-11.2169	1980	1999	F:/SPA_2																																																																																																	
extract.exe	YANTAC	283.5997	-11.3336	1980	1999	F:/SPA_2																																																																																																	
extract.exe	MARCAPOMACOCHA	283.6747	-11.4047	1980	1999	F:/SPA_2																																																																																																	
extract.exe	CARAMPOMA	283.4844	-11.6553	1980	1999	F:/SPA_2																																																																																																	
extract.exe	AUTISHA	283.3886	-11.7383	1980	1999	F:/SPA_2																																																																																																	
extract.exe	MATUCANA	283.6217	-11.8393	1980	1999	F:/SPA_2																																																																																																	

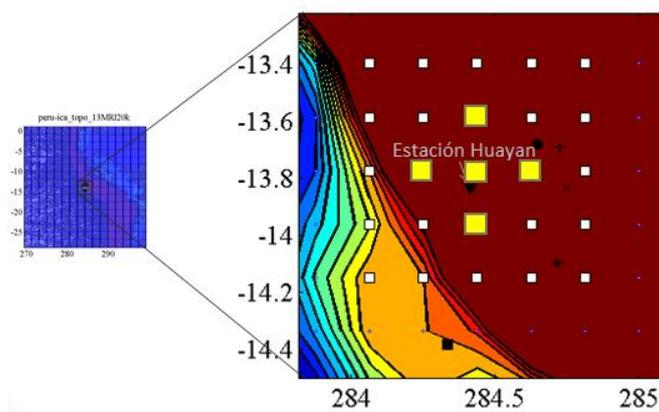


Figura 12. Ejemplo de extracción de datos binarios del modelo MRI – AGCM de la estación pluviométrica Huayan. Los datos extraídos son los cinco puntos más cercanos a la estación con información horaria.

Posteriormente, se transforma la información de precipitación, del formato binario a ASCII. Para finalmente realizar la reducción de escala o downscaling estadístico.

El procedimiento anteriormente descrito se realizó con los dos productos MRI – AGCM: MRI – AGCM 3.1S y MRI – AGCM 3.2S.

3.2.3. Downscaling estadístico con corrección paramétrica del sesgo (PBC)

La corrección paramétrica del sesgo (*Parametric Bias Correction – por sus siglas en ingles PBC*), es la corrección del sesgo o error, con la distribución normal o gaussiana que tiene en cuenta dos parámetros a analizar, la media y la desviación estándar, este método se aplicó de la siguiente manera, descrito gráficamente con sus respectivas ecuaciones.

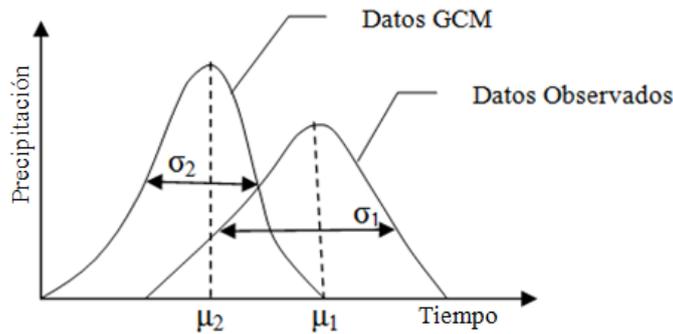


Figura 13. Distribución normal de los datos del modelo MRI – AGCM y los datos observados de las estaciones pluviométricas que se emplean en las ecuaciones de la corrección paramétrica del sesgo.

$$rain_{mod} = amp_2 \times (rain_{mod}' - \mu_{observ}) + \mu_{observ} \quad amp_1 = \frac{\mu_{observ}}{\mu_{GCM}}$$

$$rain_{mod}' = amp_1 \times rain_{GCM} \quad amp_2 = \frac{\sigma_{observ}}{amp_1 \sigma_{GCM}}$$

Donde, $rain_{mod}$ son los datos de precipitación modificado, $rain_{GCM}$ son los datos de precipitación GCM, amp_1 es el coeficiente de corrección del promedio, amp_2 es el coeficiente de corrección de la desviación estándar; μ_{observ} y μ_{GCM} es el promedio de observación de campo y la salida GCM, respectivamente; finalmente σ_{FO} y σ_{GCM} son la desviación estándar de la observación de campo y GCM, respectivamente.

3.2.4. Downscaling estadístico con la función de distribución acumulada (CDF)

Esta reducción de escala se realiza con la función de distribución acumulada (*Cumulative Distribution Function Mapping – por sus siglas en ingles CDF*). Esta función representa el comportamiento de la variable aleatoria (una *v.a.* es un mapping), que asigna un número real $X(\omega)$ a cada resultado ω ; es decir, la función de distribución acumulada F_X de una variable aleatoria X es definida para cada número real x como $F_x(x) = P(X \leq x)$. Es así que

se efectúa una aproximación de los datos del modelo MRI – AGCM con la información observada de las estaciones pluviométricas dato por dato.

$$amp = \frac{rain_{PNE_observ}}{rain_{PNE_GCM}}$$

$$rain_{mod} = amp \times rain_{GCM}$$

Donde, PNE significa Probability of Non-Exceedance, es decir, probabilidad de no excedencia, $rain_{PNE_observ}$ y $rain_{PNE_GCM}$ es PNE de datos de observación de campo y PNE de datos GCM, respectivamente.

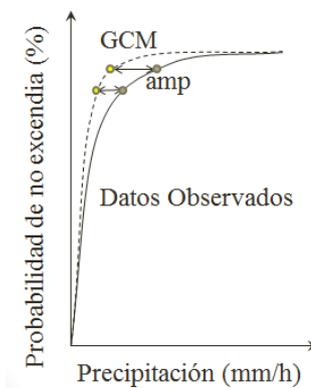


Figura 14. Función de distribución acumulada.

Estas dos técnicas de downscaling estadístico se realizan con el programa MATLAB, el código que fue ajustado y modificado para el estudio. Consiguiendo los datos presentes de precipitación del modelo climático para el periodo del 01 de Enero de 1980 al 31 de Diciembre de 1999. En la Figura 15 se muestra un ejemplo de la precipitación resultante de la reducción de escala estadística del modelo MRI – AGCM.

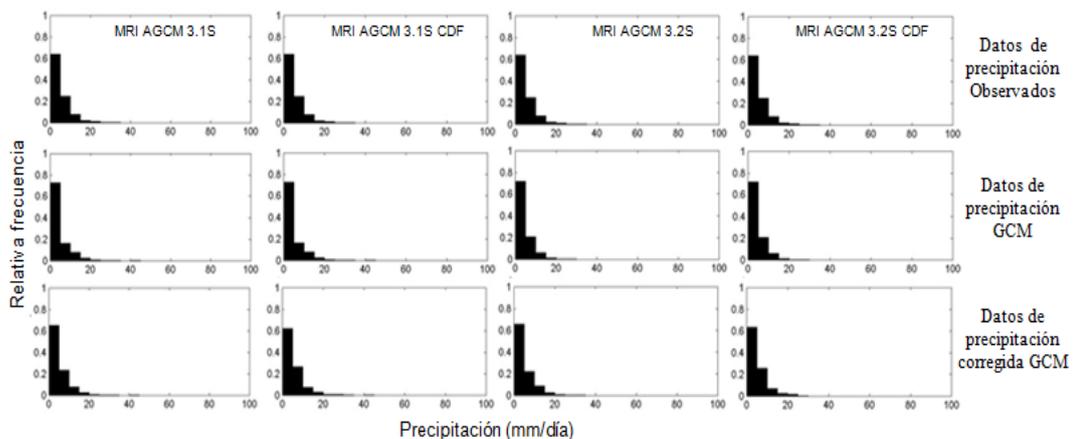


Figura 15. Precipitación del modelo MRI – AGCM en la estación pluviométrica Pallac. Periodo de análisis de enero de 1980 a diciembre de 1999.

3.2.4. Proyección futura del modelo MRI-AGCM

Para la obtención de los datos futuros del modelo MRI – AGCM se realizó el procedimiento de los ítems 3.2.1, 3.2.2 y 3.2.3. Así, se obtendrá la proyección de los datos futuro de la precipitación para el futuro cercano (2020-2039) y el futuro lejano (2080-2099). Seguidamente, se obtiene cuatro productos para cada futuro, como se encuentran presentados en la Tabla 6. Las proyecciones están ubicadas en el escenario A1B del cambio climático según la IPCC del 2007.

Tabla 6. Downscaling estadístico de las proyecciones futuro del modelo MRI-AGCM.

Downscaling Producto	Modelo MRI - AGCM			
	PBC		CDF	
	3.1S	3.2S	3.1S	3.2S
Futuro cercano (2020 - 2039)	Si se realizó	Si se realizó	Si se realizó	Si se realizó
Futuro lejano (2080 - 2099)	Si se realizó	Si se realizó	Si se realizó	Si se realizó

La proyección de la precipitación futura obtenida del modelo MRI-AGCM a nivel puntual será aplicada para proyectar los periodos húmedos y secos en la cuenca. Para esto se usará los indicadores de sequías: porcentaje de precipitación normal (PPN), tendencia de precipitación anual e índice de precipitación estandarizado (SPI). Y a nivel espacial se obtendrá las anomalías de la precipitación en la cuenca.

3.2.6. Comparación de la precipitación proyectada del modelo MRI-AGCM y la precipitación de pluviómetros a nivel puntual

Para realizar la comparación se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson y los estadísticos de la tabla de contingencia, que nos permitirá conocer el grado de dependencia entre estas dos variables.

a. Coeficiente de correlación de Pearson

El coeficiente de correlación de Pearson (r) es una medida que indica el grado de relación entre dos variables aleatorias cuantitativas y en qué medida se relacionan. La correlación es independiente de las unidades de medida de las variables, es decir, es adimensional.

La correlación siempre toma valores entre -1 y 1. Valores de r cercanos a 0 indican una relación lineal muy débil. La fuerza de la relación lineal aumenta a medida que r se aleja de 0 y se acerca a 1 o a -1. Si $r = 1$, existe una correlación positiva perfecta, denominada relación directa. Si es $0 < r < 1$, existe una correlación positiva. Si $r = 0$, no existe relación

lineal. Pero esto no necesariamente implica que las variables son independientes: pueden existir todavía relaciones no lineales entre las dos variables. Si $-1 < r < 0$, existe una correlación negativa. Si $r = -1$, existe una correlación negativa perfecta, llamada relación inversa.

Se calcula con la siguiente ecuación:

$$r = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}$$

Donde, σ_{xy} es la covarianza de x, y, σ_x es la desviación estándar de x y σ_y es la desviación estándar de y.

De la ecuación anterior se puede expresar con las medias y desviaciones típicas de las dos variables x e y, resultando de la siguiente manera:

$$r = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{S_x} \right) \left(\frac{y_i - \bar{y}}{S_y} \right)$$

Donde, \bar{x} y \bar{y} es el promedio de x e y, respectivamente, S_x y S_y es la desviación estándar de x e y, respectivamente y n es el tamaño de muestra o datos.

Para evaluar la significancia y los intervalos de confianza del coeficiente de correlación r, se ha empleado un nivel de significancia (α) del 5% y la prueba estadística t-Student. La hipótesis nula H_0 es que las variables son independientes y distribuidas normalmente. La prueba estadística t-Student se calcula con la siguiente ecuación:

$$T_c = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}$$

Donde, T_c es el estadístico t-Student, H_0 es rechazada si $|T_c| > T_{1-\alpha/2}$, donde $T_{1-\alpha/2}$ es un punto de la distribución t-Student con n-2 grados de libertad y probabilidad de excedencia de $\alpha/2$. La prueba estadística “suma de orden” se calcula con la siguiente ecuación:

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

Donde, $\text{Var}(S) = n(n - 1)(2n + 5)/18$; H_0 es rechazada si $|Z_c| > Z_{1-\alpha/2}$, donde $Z_{1-\alpha/2}$ es el valor de la distribución normal estándar con una probabilidad de excedencia de $\alpha/2$.

b. Tabla de contingencia

Una tabla de contingencia es una de las formas más comunes de resumir datos categóricos. En general, el interés se centra en estudiar si existe alguna asociación entre una variable fila y otra variable columna y/o calcular la intensidad de dicha asociación. La distribución conjunta de dos variables categóricas determina su relación. Esta distribución también determina las distribuciones marginales y condicionales.

La tabla de contingencia permite verificar si existe un evento o no, es decir, muestra la frecuencia de "sí" y "no" los pronósticos y ocurrencias. La tabla de contingencia es una forma útil para ver qué tipos de errores se están realizando. Un sistema de previsión perfecta produciría sólo *aciertos y negativos correctos*, y no hay *fallos o falsas alarmas*.

Una gran variedad de *estadísticas categóricas* se calcula a partir de los elementos de la tabla de contingencia para describir aspectos particulares de desempeño de pronóstico. Los estadísticos para la evaluación son: Probabilidad de Detección (POD), que representa la secuencia de ocurrencias de precipitación que están correctamente detectadas por la variable en comparación, pero ignora las falsas alarmas; la Proporción o Ratio de Falsas Alarmas – FAR, representa la fracción de casos en que se registra precipitación en el modelo pero que en realidad no se registra precipitación; el Índice de éxito crítico – CSI, este mide la fracción de eventos observados y / o pronóstico que se predijo correctamente; el Porcentaje de estimaciones correctas (PC), detecta el factor de las previsiones que eran correctas del total; la Puntuación de habilidad de Heidke (HSS), mide la fracción de pronósticos correctos y el Índice de frecuencia del sesgo, este mide la relación entre la frecuencia de eventos de previsión a la frecuencia de los fenómenos observados, indica si el sistema de predicción tiene una tendencia a subestimar ($\text{bias} < 1$) o sobrestimar ($\text{bias} > 1$) eventos.

Para el estudio, en la tabla de contingencia, el pronóstico es la precipitación MRI-AGCM y la observada es la precipitación obtenida de las estaciones meteorológicas. En la Figura 16, se presentan las ecuaciones de los estadísticos de detección de los eventos de precipitación y se especifica los eventos a considerar con letras para definir los estadísticos a evaluar.

		si	no
Precipitación MRI - AGCM	si	a (acierto)	b (falsa alarma)
	no	c (pérdida)	d (no evento)

Precipitación \geq umbral $a + b + c + d = 1$

Estadísticos	Ecuación	Rango	Óptimo
Probabilidad de detección	$POD = \frac{a}{a + c}$	0 - 1	1
Ratio de falsas alarmas	$FAR = \frac{b}{a + b}$	0 - 1	0
Índice de éxito crítico	$CSI = \frac{a}{a + b + c}$	0 - 1	1
Porcentaje de estimaciones correctas	$PC = \frac{a + d}{a + b + c + d}$	0 - 1	1
Puntuación de habilidad de Heidke	$HSS = \frac{2(ad - bc)}{(a + c)(c + d) + (a + b)(b + d)}$	$-\infty - 1$	1
Índice de frecuencia del sesgo	$FBIAS = \frac{a + b}{a + c}$	0 - ∞	1

Figura 16. Parte superior: Tabla de contingencia. Parte inferior: Estadísticos que caracterizan la precipitación con tabla de Contingencia. Fuente: Ramos L. (2013)

3.2.7. Comparación de la precipitación proyectada del modelo MRI-AGCM y la precipitación de pluviómetros a nivel espacial

Los mapas espaciales de la precipitación en la cuenca Chancay - Huaral, se obtuvo interpolando la información de la zona de estudio, con los datos de las estaciones pluviométricas para el periodo en análisis (Enero 1980 a Diciembre 1999) con el método de la distancia inversa ponderada (IDW). De esta manera, se generó 240 mapas con información de pluviómetros; el mismo procedimiento se siguió para los cuatro productos MRI. Para obtener la correlación espacial de Pearson.

a. Correlación espacial de Pearson

La correlación se obtiene en forma vectorial de los mapas de cada mes de las estaciones pluviométricas y de los cuatro productos del modelo MRI – AGCM. Así, se puede realizar la correlación para el periodo de análisis presente: Enero 1980 a Diciembre 1999. Para conseguir la correlación mensual de cada mapa, es decir 240 correlaciones comprando con cada producto del modelo MRI – AGCM.

Se obtuvo también la correlación estacional espacial de las estaciones pluviométricas para el periodo en análisis de Enero a Diciembre (1980 - 1999) de los 240 mapas mensuales con información de pluviómetros y de los cuatro productos MRI (Enero 1980 a Diciembre 1999). Y se realizó el promedio de los mapas de la cuenca de Enero a Diciembre (1980 - 1999). Para luego obtener los mapas estacionales, de Verano (Diciembre - Febrero), de Otoño (Marzo – Mayo), de Invierno (Junio - Agosto), y de Primavera (Septiembre - Noviembre) de la precipitación de pluviómetros y de cada producto MRI-AGCM.

3.2.8 Anomalía mensual de la precipitación

Los mapas de la precipitación de la proyección futuro cercano y lejano del modelo MRI-AGCM, se generaron con el método de interpolación IDW, obteniendo 240 mapas correspondientes al total de meses de 2020 a 2039, futuro cercano y 240 mapas mensuales de 2080 a 2099, futuro lejano.

Para obtener la anomalía mensual futura se promedia cada mes del futuro cercano y lejano de enero a diciembre. Finalizando con 12 mapas de cada futuro. Con estos mapas se realizara una diferencia con los mapas del presente, para obtener la anomalía de la precipitación futura cercana y lejana con los cuatro productos del modelo MRI – AGCM.

3.2.9. Índices de sequía meteorológica

- Porcentaje de precipitación normal (PPN)

Calcula a nivel mensual la anomalía de la precipitación con respecto a un periodo determinado de registro histórico. El cálculo es el cociente entre la precipitación estudiada, en la zona de estudio fue a nivel mensual, y el promedio de los últimos 30 años, multiplicado todo ello por cien. Una precipitación para una región se considera normal cuando se le asocia un porcentaje de cien.

$$PPN (\%) = \left(\frac{P_i}{\bar{P}_m} \right) \times 100$$

Dónde PPN , porcentaje de precipitación normal o anomalía pluviométrica del mes i en porcentaje; P_i , precipitación del mes i y \bar{P}_m , precipitación media del mes i en el periodo.

- Precipitación tendencia anual

La anomalía es calculada aquí como la precipitación observada en un año específico, en (mm/mes), menos el promedio de la precipitación anual del periodo a analizar. Además el promedio móvil permite evaluar la tendencia de la precipitación en el tiempo. El promedio móvil es el promedio anual de la precipitación calculado usando los datos de los tres años anteriores. En la Tabla 7, se indican los valores de la anomalía.

Tabla 7. Categorías en la anomalía estandarizada. Fuente: DGA y DMC (2014).

Valor	Categoría
Mayor que 3	Extremadamente lluvioso
Entre 3 y 2	Moderadamente lluvioso
Entre 2 y 1	Ligeramente lluvioso
Entre -1 y 1	Normal
Entre -2 y -1	Ligeramente seco
Entre -3 y -2	Moderadamente seco
Menor que -3	Extremadamente seco

- Índice de precipitación estandarizado (SPI)

El SPI permite cuantificar y comparar el déficit de la precipitación para varias escalas temporales las cuales reflejan el impacto de la sequía en la disponibilidad de los diferentes recursos hídricos. Las condiciones de humedad del suelo responden a anomalías de precipitación en una escala relativamente corta. Las anomalías de precipitación a largo plazo quedan reflejadas en las aguas subterráneas, los caudales fluviales y el almacenamiento en reservorios.

El SPI de 3 meses refleja las condiciones de humedad a corto y medio plazo, y proporciona una estimación estacional de la precipitación. En las principales regiones agrícolas, un SPI de 3 meses podría ser más eficaz en comparación con otros índices hidrológicos actuales. Un SPI de 6 meses puede ser muy eficaz para mostrar la precipitación en distintas estaciones, la información derivada de un SPI de 6 meses también podría reflejar caudales fluviales y niveles de almacenamiento anómalos, en función de la región y la época del año. El SPI de 12 meses tiene a situarse en torno a 0, a menos que se esté produciendo una

tendencia húmeda o seca característica. Los SPI de estas escalas temporales generalmente se vinculan con cauces fluviales, niveles de los reservorios e incluso niveles de las aguas subterráneas a escalas temporales más largas. (OMM, 2012).

Para caracterizar o estudiar una sequía agrícola el periodo esta entre 1 a 6 meses, es por esta razón que se utilizó el SPI de 3 meses para identificar el periodo de sequía que podría afectar el crecimiento del cultivo y por tanto la producción de este, y los SPI de 6 y 12 meses pueden denotar el comportamiento o impactos en las reservas de agua. En la Tabla 8 se presenta el rango de este índice.

Tabla 8. Categorías en el índice de precipitación estandarizada. Fuente: McKee et al. (1993)

Valor	Categoría
Mayor que 2	Extremadamente lluvioso
Entre 1.5 y 2	Moderadamente lluvioso
Entre 1 y 1.5	Ligeramente lluvioso
Entre -1 y 1	Normal
Entre -1.5 y -1	Ligeramente seco
Entre -2 y -1.5	Moderadamente seco
Menor que -2	Extremadamente seco

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La precipitación proyectada por el modelo de circulación general de alta resolución MRI, se comparó con la precipitación de los pluviómetros. Para ello se realizó: i) un análisis preliminar que incluyó la regionalización de las estaciones pluviométricas en la zona de estudio; ii) Evaluación del grado de dependencia entre la precipitación proyectada del modelo MRI – AGCM y la información de pluviómetros, esto a través de la correlación de Pearson estadísticos obtenidos de la tabla de contingencia; iii) Se obtuvo ocho proyecciones futura de cambio climático con los que se evaluó las anomalías de la precipitación y diversos indicadores de sequía.

En la Tabla 9 se detalla la información de precipitación empleada en el estudio.

Tabla 9. Notación de los experimentos MRI – AGCM empleado en el estudio.

Notación	Precipitación	Downscaling Estadístico	Resolución espacial
Po	Pluviómetro	-	-
P1	MRI–AGCM 3.1S	PBC	20x20Km
P2	MRI–AGCM 3.1S CDF	CDF	20x20Km
P3	MRI–AGCM 3.2S	PBC	20x20Km
P4	MRI–AGCM 3.2S CDF	CDF	20x20Km

4.1. Análisis preliminar: Consistencia y regionalización

El análisis preliminar de la información incluye la regionalización de las estaciones pluviométricas, con información previamente homogénea. Para ello se realizó el análisis gráfico y el análisis de consistencia con las prueba estadísticas T-Student y F-Fisher con un nivel de significancia del cinco por ciento de los datos a nivel diario. Siendo corregidos los datos de la estación inconsistente para ser homogéneos. Los histogramas de precipitación total mensual de las estaciones durante el periodo de registro de 1980 a 1999 se presentan en el Anexo 1, según las zonas regionalizadas.

Con el método de vector regional (MVR) se establece la homogeneidad de las estaciones pluviométricas. Para el análisis se consideró el periodo de 1980 a 1999 con la precipitación total anual, considerando el año hidrológico (septiembre - agosto). Y se obtuvieron cuatro

grupos homogéneos, la distribución espacial de las estaciones pluviométricas es la siguiente:

i) El primer grupo o zona se encuentra ubicado en la parte costera a una altitud menor de 500 msnm con un clima árido; ii) el segundo grupo o zona, es ubicado a una altitud mayor de 1000 hasta los 2600 msnm con un clima templado y húmedo; iii) el tercer grupo o zona se ubica de 3000 a 4000 msnm con un clima semifrío y húmedo; y finalmente, iv) el cuarto grupo o zona se ubica en la parte mayor de 4000 msnm con un clima lluvioso y la estaciones pertenecientes a este son parte de la vertiente del atlántico.

En el Anexo 2 se indica un resumen de los índices de calidad de cada estación pluviométrica correlaciones con el vector, indicando que las estaciones se encuentran en una misma zona homogénea. Aquellas estaciones que se encuentran lejos del vector son eliminados del grupo y se ubican en los otros dos grupos. Pero estos se localizan en una misma zona climática, es decir, tienen similar precipitación y se encuentran a casi una misma altitud, siendo agrupados de esta manera.

En la Figura 17, se observa el mapa de clasificación climática y la ubicación de la cuenca Chancay Huaral, donde se visualiza la distribución y agrupación de las estaciones pluviométricas, cada grupo regionalizado pertenece a una zona de la clasificación climática. Además, en la Figura 18 muestra el mapa altitudinal ubicando la cuenca y las estaciones pluviométricas, particularmente la altitud es la agrupación o regionalización de los grupos o zonas uno y cuatro debido que estas no se encuentran dentro del vector.

4.2 Comparación entre la precipitación proyectada del modelo MRI-AGCM e información de estaciones pluviométricas.

La precipitación puntual del modelo se correlaciono con la precipitación observada para obtener el grado de dependencia de ambas variables, siendo el mejor resultado a nivel mensual. Posteriormente, de acuerdo a las zonas de homogenización y la mejor correlación de cada estación se obtuvo una estación representativa de cada zona para calcular los estadísticos de la tabla de contingencia, mostrando estos una similitud a pesar de la altitud y la zona.

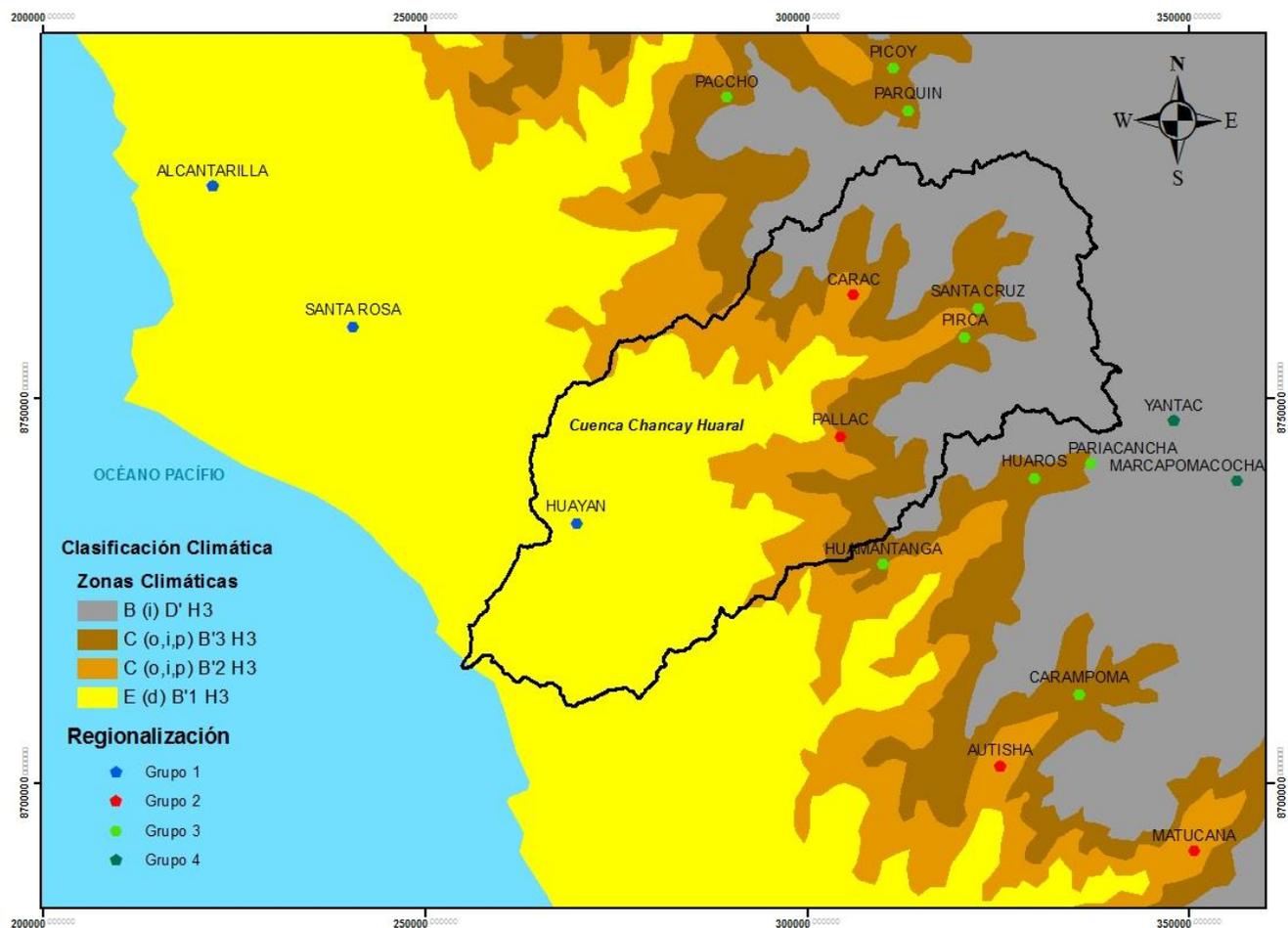


Figura 17. Regionalización de las estaciones pluviométricas empleando el método de vector regional (MVR) y el mapa de clasificación climático de la zona obtenido por SENAMHI. Zona climática E (d) B'1 H3 es árido, semicálido y húmedo con deficiencias de precipitación en todo el año; C (o, i, p) B'2 H3 es semiseco, templado y húmedo, con otoño y primavera seco; C (o, i, p) B'3 es semiseco, semifrío y húmedo con otoño y primavera seco y H3 B (i) D'H3 es lluvioso, semifrío y húmedo con invierno seco.

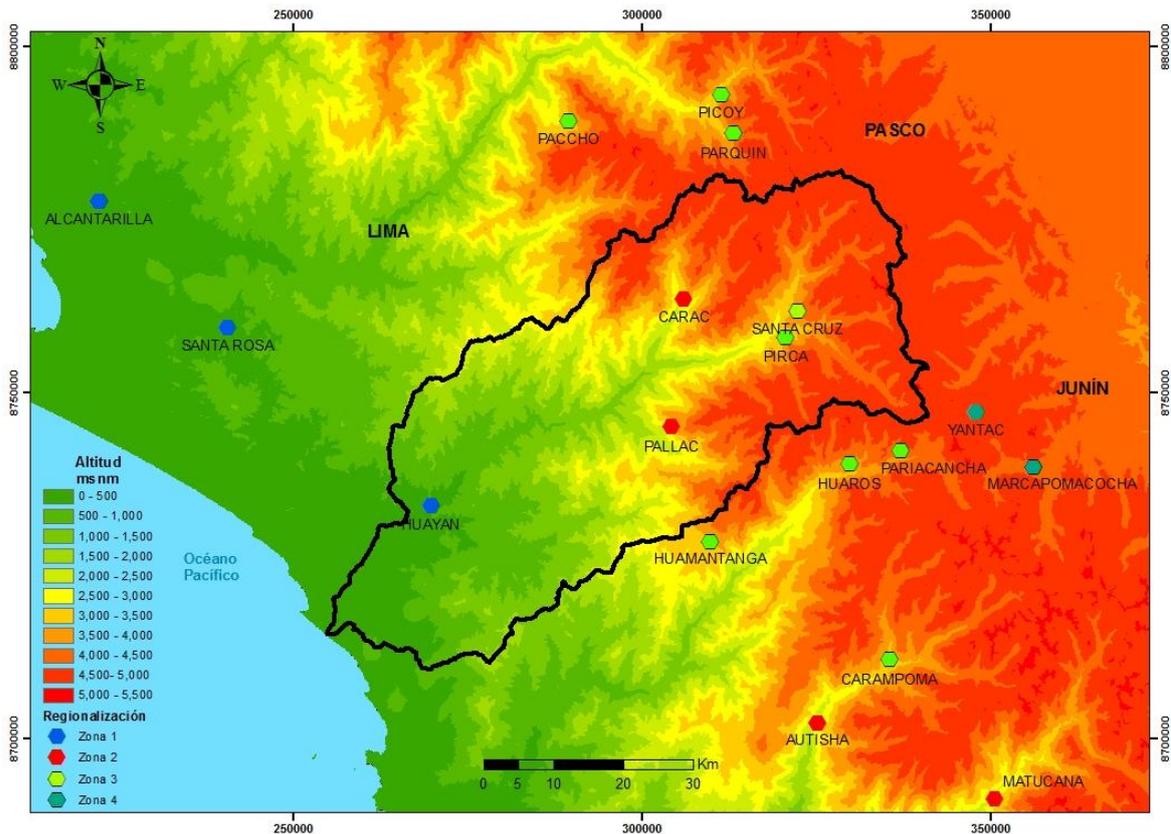


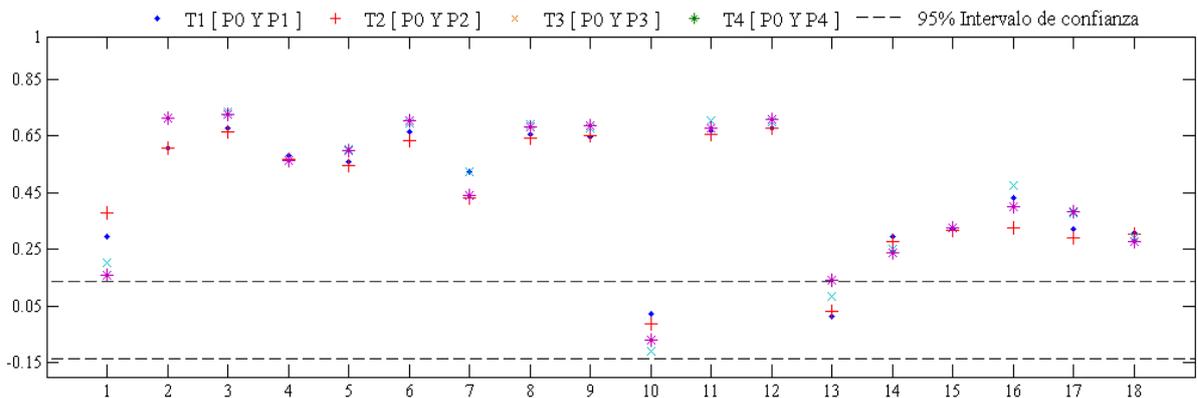
Figura 18. Variabilidad altitudinal y distribución de estaciones pluviométricas según regionalización.

Además, se usó la notación T1, para el experimento que compara la precipitación medida por el pluviómetro (Po) con la precipitación proyectada por el modelo MRI – AGCM (P1); T2, experimento que compara la precipitación medida por el pluviómetro (Po) con la precipitación proyectada por el modelo MRI – AGCM (P2); T3, experimento que compara la precipitación medida por el pluviómetro (Po) con la precipitación proyectada por el modelo MRI – AGCM (P3); y finalmente, T4, experimento que compara la precipitación medida por el pluviómetro (Po) con la precipitación proyectada por el modelo MRI – AGCM (P4). Estas notaciones se utilizaron para la correlación de Pearson puntual y estacional como para los estadísticos.

4.2.1. Coeficiente de correlación de Pearson

La correlación se realiza para el periodo de 1980 a 1999, se compara el modelo y los productos PBC y CDF (T1, T2, T3 y T4). De esta manera se reflejará el grado de dependencia y similitud entre la precipitación de pluviómetros y la precipitación proyectada del modelo de alta resolución MRI-AGCM. Además se ha empelado un nivel de significancia del cinco por ciento y la prueba estadística t-Student para el coeficiente de Pearson.

La correlación que se realizo fue a escala diaria, mensual y anual. Se obtuvo que las mayores correlaciones se presenta a escala mensual (Figura 19, numeración de estaciones Tabla 4), la correlación de Pearson se encuentra en un rango de 0.5 a 0.7, en escala diaria las correlaciones son bajas 0.1 a 0.5 y los resultados son muy bajos a escala anual.



Esstaciones Pluviometricas							
ZONA 1		ZONA 2		ZONA 3		ZONA 4	
1. Huayan	350	2. Pallac	2570	5. Santa Cruz	3590	14. Marcapomacocha	4479
10. Alcantarilla	120	3. Carac	2600	4. Pirca	3300	15. Yantac	4684
13. Santa Rosa	380	17. Autisha	2237	6. Huamantanga	3368		
		18. Matucana	2431	7. Huaros	4500		
				8. Pariacancha	3800		
				9. Parquin	3590		
				10. Paccho	3110		
				11. Picoy	3995		
				16. Carampoma	3426		

Figura 19. Coeficiente de correlación de Pearson entre la precipitación de pluviómetros y la precipitación proyectada por el modelo MRI – AGCM (cuatro productos), en las dieciocho estaciones pluviométricas empleadas en el estudio. Periodo de análisis: a escala mensual de Enero de 1980 a Diciembre de 1999.

4.2.2. Tabla de contingencia

Con ayuda de la tabla de contingencia se puede calcular y analizar diversos estadísticos de detección de eventos de precipitación, y realizar una comparación de la precipitación con el modelo de alta resolución MRI-AGCM. Diversos autores utilizan umbrales de precipitación: de 0 mm/d, 0.25 mm/d, 0.5 mm/d, 1 mm/d y 5 a 20mm/d o hasta 40 mm/d. (Ramos, 20013). Para la detección de precipitación en el estudio se consideró un umbral de lluvia de 0.5 mm/d, 1 mm/d, 2 mm/d, 5 mm/d, 10 mm/d, 15 mm/d y 20 mm/d para los estadísticos POD (Probabilidad de Detención de precipitación), FAR (Ratio de Falsas Alarmas), CSI (Índice de Éxito Crítico), PC (Porcentajes de Estimaciones Correctas), HSS (Puntuación de Habilidad de Heidke) y FBIAS (Índice de Frecuencia de Sesgo) en la tabla de contingencia, estos . En las siguientes figuras se tiene una estación representante ubicada en cada zona, teniendo así cuatro estaciones representativas gráficamente por cada zona de la cuenca.

En la Figura 20 se describe a la Estación Huayan, ubicada a 350 msnm, representando a la primera zona. Está muy bien representada por el estadístico PC con todos los productos del modelo, llegando al óptimo mientras se incrementa el umbral de precipitación. Con el estadístico FBIAS aumenta y llega aproximadamente al óptimo hasta 2mm/d, después disminuye hasta cero. Para el estadístico FAR los resultados son muy cercanos e iguales a 1 para luego disminuir con el aumento del umbral. Con los estadísticos POD, CSI y HSS los resultados están muy próximos a cero, no siendo el óptimo. Y esta tendencia sigue las estaciones de la parte baja.

La segunda zona está representada por la Estación Pallac, ubicada en la parte media de la cuenca, en la Figura 21. Los estadísticos POD, CSI y HSS presentan bajos valores desde 0 a 0.3 no siendo muy significativos. El estadístico FAR presenta valores de 0.6 a 1, mientras el umbral crece el resultado aumenta y se aleja del óptimo. El estadístico PC es el de mejor resultado ya que se acerca al óptimo en todos los productos y el estadístico FB IAS aumenta sus valores desde 1, según aumenta el umbral de precipitación. Las otras estaciones de la parte media de la cuenca tienen la misma aproximación.

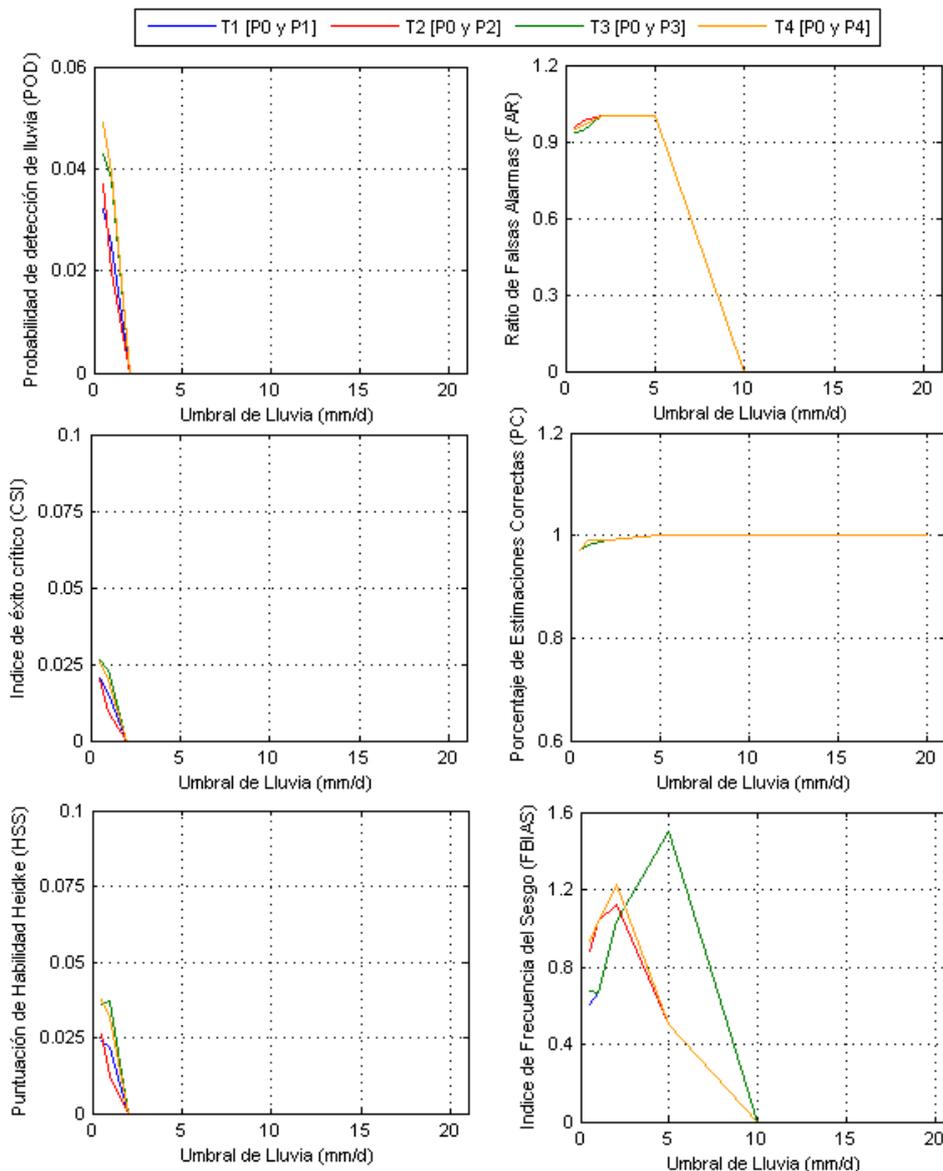


Figura 20. Estadísticos de la estación pluviométrica Huayan obtenidos a partir de la tabla de contingencia. Periodo de análisis a escala diaria de 1980 a 1999.

En la Figura 22 se presenta los estadísticos de la Estación Santa Cruz, ubicado en la tercera zona. El POD, CSI y HSS presentan resultados muy bajos a partir de 0.5 y va disminuyendo mientras va aumentando el umbral de precipitación, alejándose del óptimo; el FAR va aumentando de 0.5 a 1 en todos los productos se presenta la misma tendencia; y en PC inicia de 0.8 a 1, llegando al óptimo; por último en el FBIAS inicia desde 1 y aumentan en los umbrales mayores, a partir de 15mm/d. Las otras estaciones de aproximadamente la misma altitud se tiene los mismos resultados.

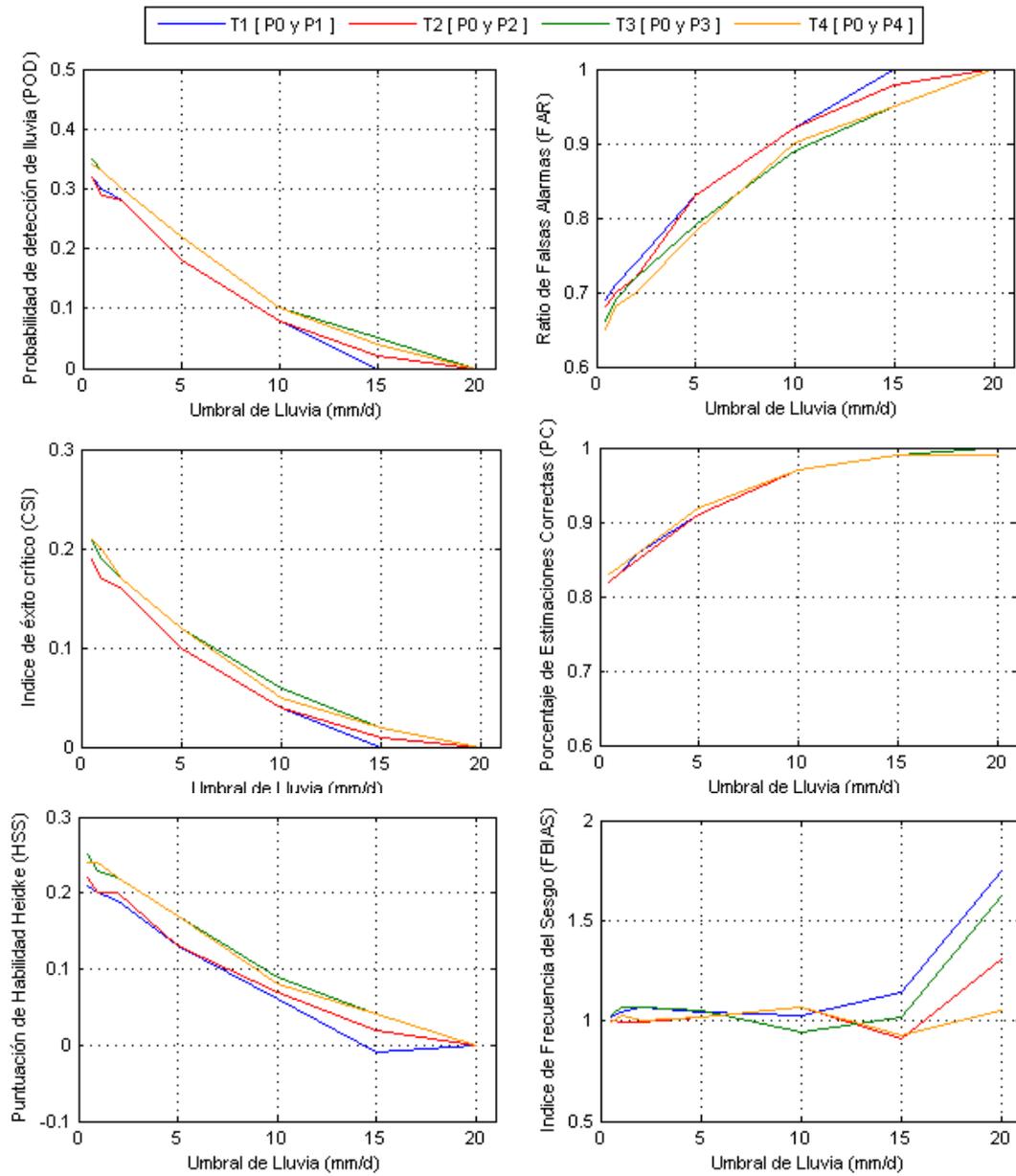


Figura 21. Estadísticos de la de la estación pluviométrica Pallac obtenidos a partir de la tabla de contingencia. Periodo de análisis a escala diaria de 1980 a 1999.

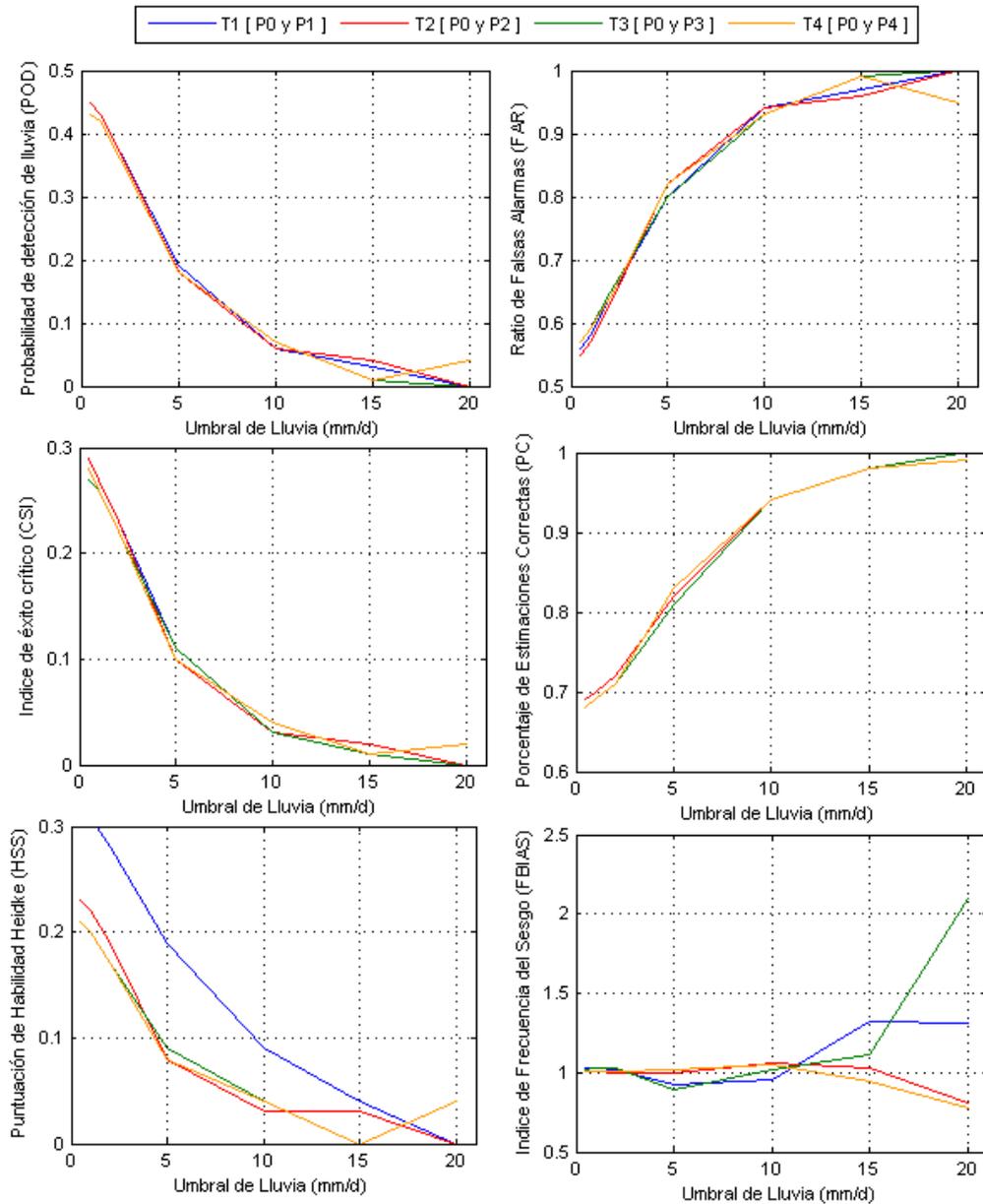


Figura 22. Estadísticos de la estación pluviométrica Santa Cruz obtenidos a partir de la tabla de contingencia. Periodo de análisis a escala diaria de 1980 a 1999.

Las estaciones del grupo cuatro de la cuenca presentan una diferencia en la tendencia, en la Figura 23 se aprecia la Estación Yantac, debido a que con los estadísticos POD, FAR, CSI y PC al inicio con cada producto del modelo es cercano al óptimo y disminuye su valor con el aumento del umbral; con el HSS se tiene un aumento en cada umbral desde cero, manteniéndose en el rango y con FBIAS en cada umbral intenta mantenerse aproximado al óptimo 1, debido a que los valores oscila entre 0.9 y 1.1.

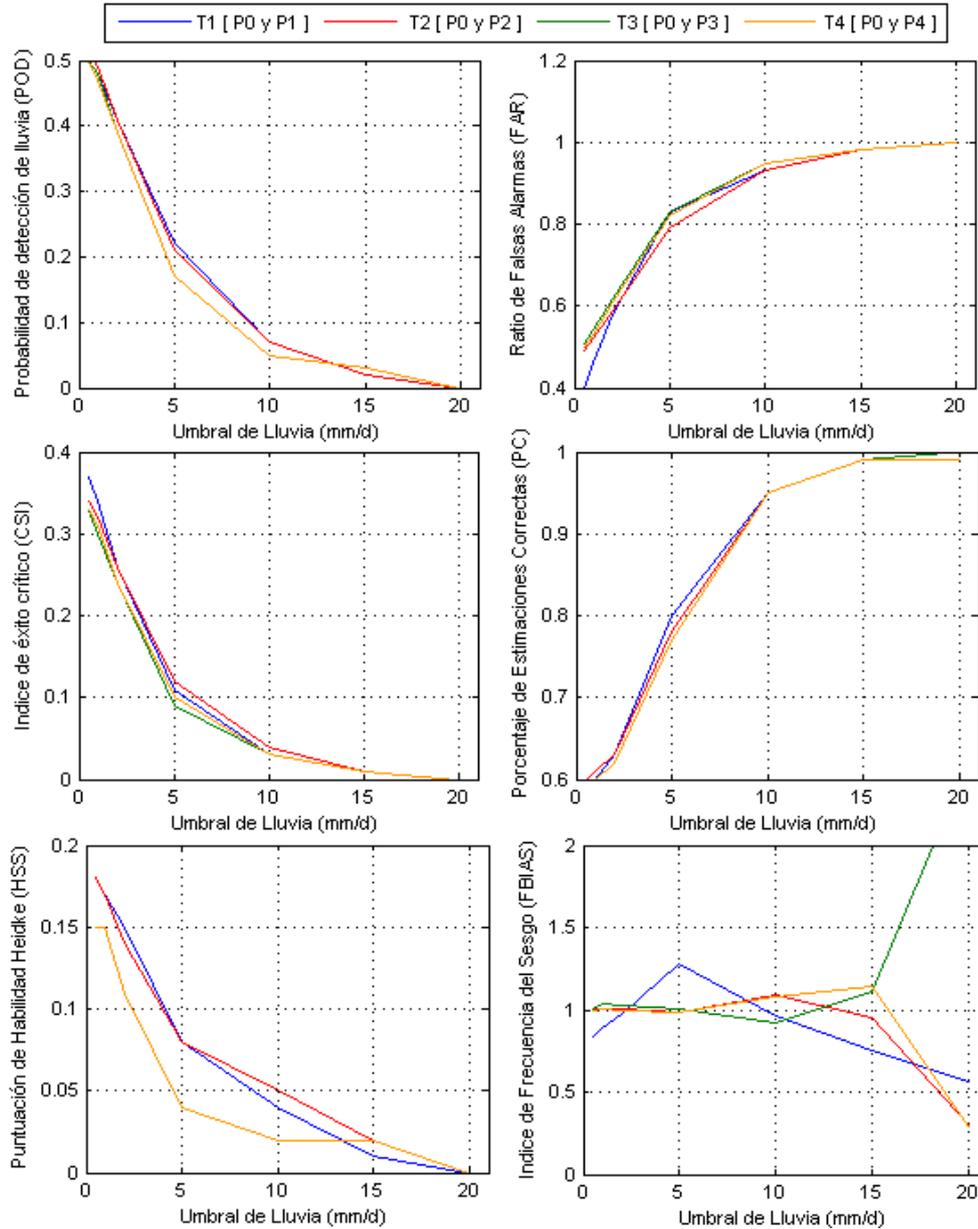


Figura 23. Estadísticos de la estación pluviométrica Yantac obtenidos a partir de la tabla de contingencia. Periodo de análisis a escala diaria de 1980 a 1999.

Se evidencia que el estadístico PC para la cuenca en las zona 1, 2 y 3 alcanza el óptimo según aumenta el umbral de precipitación, es decir, que va identificando los aciertos y falsas alarmas y va mejorando cuando aumenta el umbral de precipitación porque se tiene una mayor certeza o estimación de que lloverá comparando la precipitación observada y la precipitación proyectada del modelo. El estadístico FBIAS, es mayor a 1, quiere decir, que está sobrestimando la frecuencia de eventos que predice el modelo a la frecuencia de eventos observados, es óptimo cuando el umbral es 0.5mm/d. El estadístico POD es acertado cuando el umbral es menor. Y FAR es óptimo cuando el umbral de precipitación es mayor. Los estadísticos CSI y HSS son muy bajos y no se aproximan al óptimo. Estas

características se repiten en toda la cuenca como se muestran en las estaciones tanto en la parte baja, media y alta. Los productos del modelo presentan el mismo comportamiento en todos los estadísticos con algunas variaciones en los resultados, pero al final determinan lo mismo. Entonces, los resultados obtenidos por los estadísticos dependen del valor del umbral de precipitación y las características climáticas (cantidad de precipitación) para detectar y obtener un mejor resultado y no está siendo influenciado por la fisiografía de la zona. Y se tiene que para la cuarta zona de la cuenca la parte más lluviosa y alta de la región, en los estadísticos POD, FAR, CSI y PC se alcanza el óptimo con el umbral 0.5mm/d y va disminuyendo cuando aumenta el umbral. Y en FBIAS se encuentra en el rango del óptimo.

4.2.3. Correlación espacial de Pearson

Se realizó la correlación espacial de la precipitación del modelo con la precipitación observada como vector, obteniéndose mejores resultados que en los datos puntuales, a nivel mensual y estacional.

Las correlaciones mensuales espaciales entre la precipitación proyectada por el modelo de alta resolución MRI – AGCM y la precipitación de las estaciones pluviométricas del coeficiente de Pearson a nivel mensual de enero de 1980 a diciembre 1999 , en las comparaciones T1, T2, T3 y T4. Se ha empelado un nivel de significancia del cinco por ciento y la prueba estadística t- Student. Los datos de cada mes se obtuvieron en forma vectorial, de la información de precipitación de las estaciones pluviométricas y de la precipitación proyectada del modelo MRI –AGCM, para poder realizar la correlación mensual espacial de Pearson. Obteniendo 240 correlaciones de cada producto del modelo de alta resolución MRI – AGCM.

En la Figura 24 se muestra las comparaciones de las correlaciones de cada producto, se obtiene una correlación positiva significativa en T1 del 96.7 por ciento, en T2 del 97.5 por ciento, en T3 del 94.6 por ciento y en T4 del 97.5 por ciento. Además, se obtiene una correlación negativa significativa en T1 del 3.3 por ciento, en T2 del 2.5 por ciento, en T3 del 5.4 por ciento y en T4 del 2.5 por ciento. Las comparaciones de las correlaciones T1, T2, T3 y T4 presentan una dependencia significativa alta.

Se observa en el “box plot” de la Figura 25, que el coeficiente de correlación de Pearson obtiene valores ligeramente más altos en T2, siendo su valor máximo 0.88 y la mediana es

mayor al 0.5 del coeficiente de correlación en las cuatro comparaciones. También se aprecia que T2 y T4 presenta menos valores extremos de correlación negativa. En la Figura 26 se presentan las mejores correlaciones que se obtuvieron de cada producto del modelo MRI-AGCM. Y se observa que el modelo representa mejor la zona costera y parte media de la cuenca, sobrestimando levemente la parte alta de la cuenca.

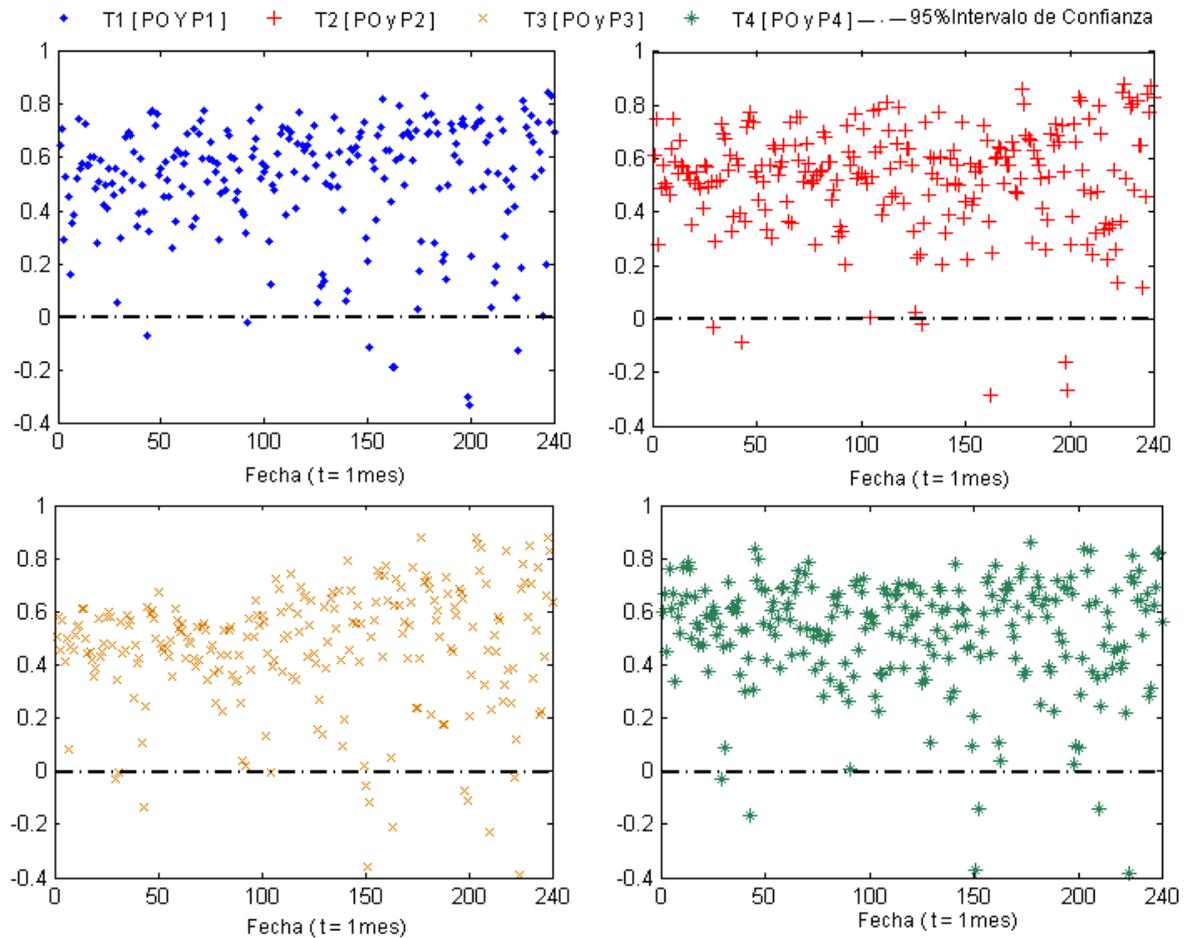


Figura 24. Correlación entre la precipitación de estaciones pluviométricas y de la precipitación proyectada por el modelo MRI – AGCM. Se utilizaron 1224728 celdas en la cuenca. Periodo de análisis: Enero de 1980 a Diciembre de 1999.

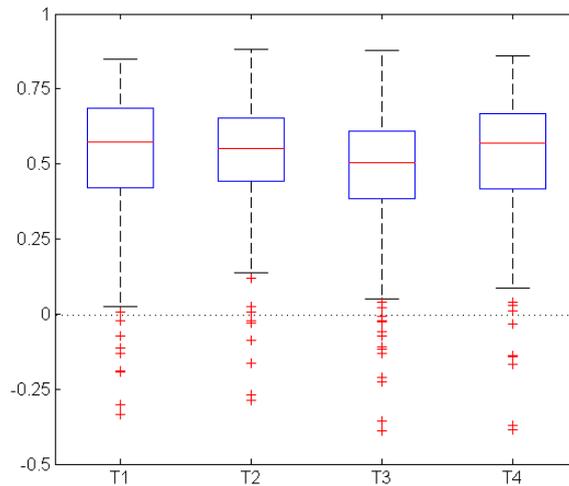


Figura 25. “Box plot” de la correlación mensual para las comparaciones T1, T2, T3 y T4. Con la mediana (línea roja), los cuartiles a 25% y 75% (caja), el valor máximo y mínimo (líneas de color negro) y los valores “outliers” (cruces rojas). Periodo de análisis: Enero de 1980 a Diciembre de 1999.

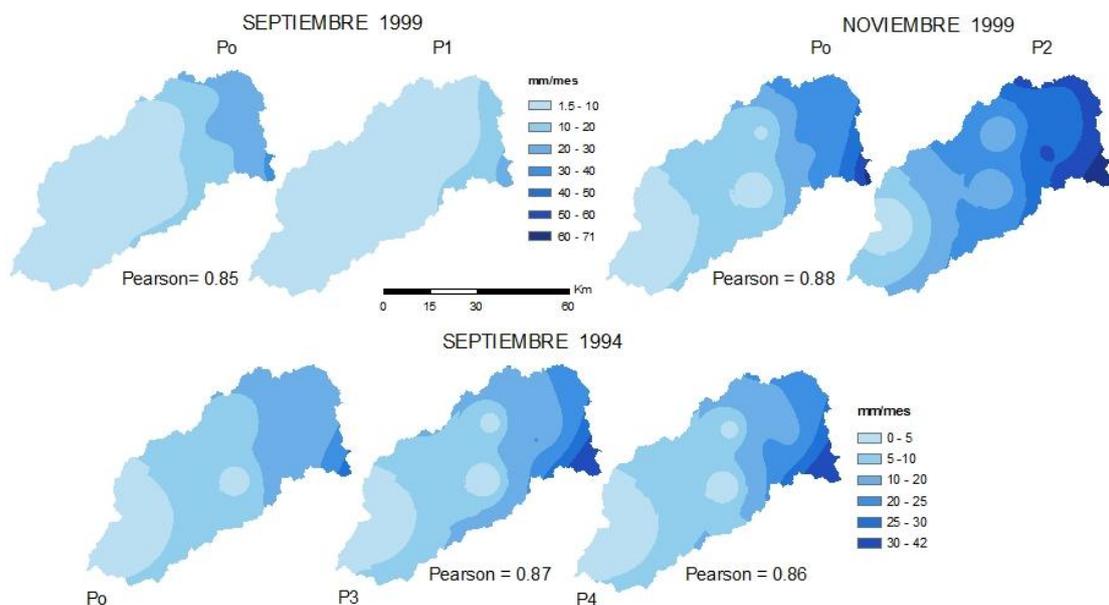


Figura 26. Mapas de precipitación mensual de pluviómetro (Po) y productos MRI (P1, P2, P3, P4), de la mejor correlación espacial Pearson. Periodo de análisis: Enero 1980 a Diciembre 1999.

La mejor correlación de Pearson entre la precipitación de pluviómetro (P_0) y los productos MRI se tiene a escala estacional espacial en verano (Diciembre - Febrero), otoño (Marzo - Mayo), y primavera (Septiembre - Noviembre), debido a que la concentración de lluvias es en la parte media y alto andina de la cuenca, representando el modelo esta caracterización muy bien. Y la correlación es menor en invierno (Junio - Agosto), debido a que la precipitación es menor en la parte media y alto andina de la cuenca (Ver Figura 27).

Además, se generaron los mapas estacionales de verano, otoño, invierno y primavera del periodo de análisis de enero de 1980 a diciembre de 1999, presentando su respectiva correlación; la mayor correlación estacional se presenta en verano y primavera en las cuatro comparaciones (Ver Figura 28).

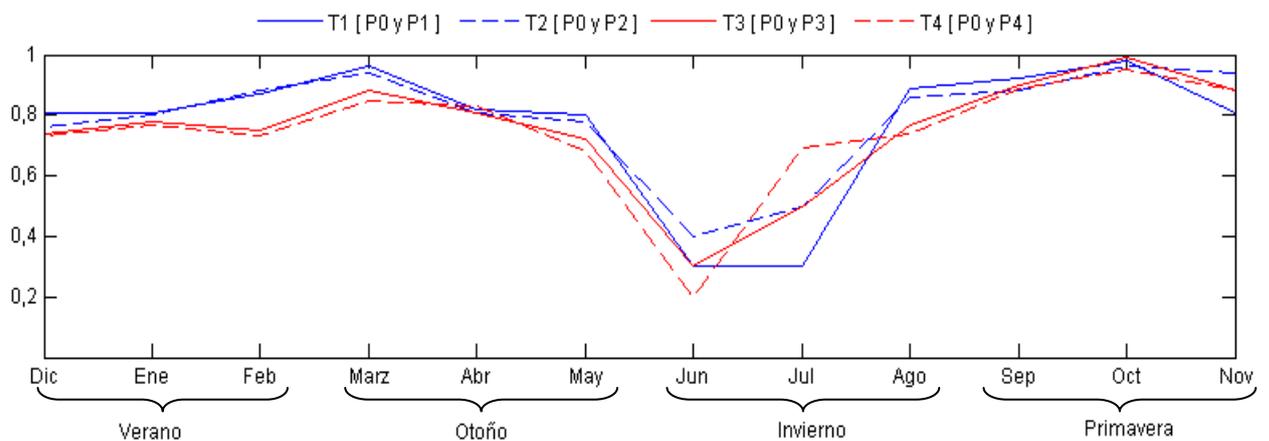


Figura 27. Correlación promediada entre la precipitación mensual de pluviómetros (P_0) y productos MRI-AGCM (P_1 , P_2 , P_3 , y P_4) para las comparaciones T1, T2, T3 y T4. Periodo de análisis: Enero de 1980 a Diciembre de 1999

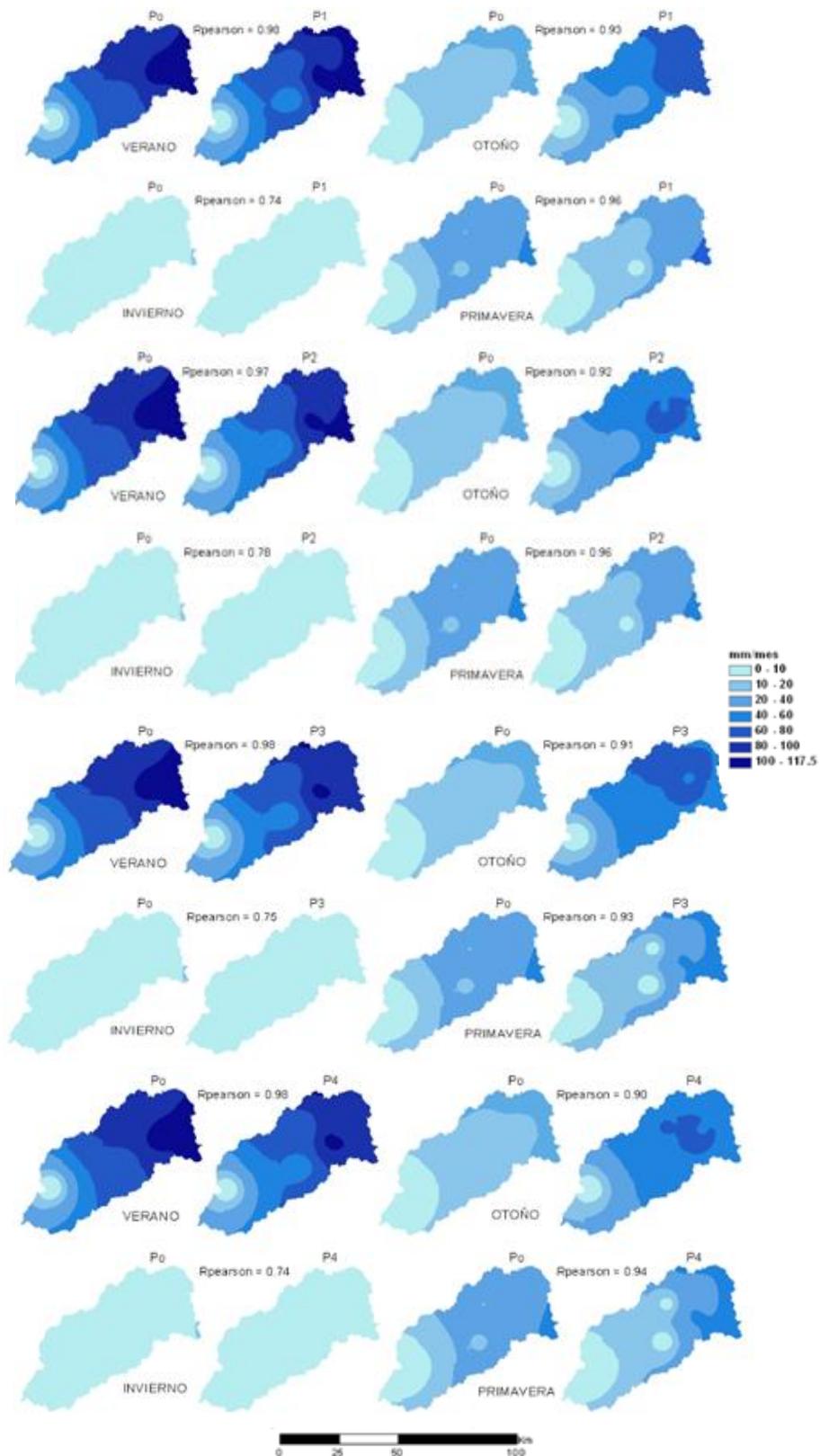


Figura 28. Mapa de precipitación media mensual para la estación de verano, otoño, primavera e invierno (mm/mes) con pluviómetros y modelo MRI- AGCM (P1, P2, P3 y P4). Periodo de análisis: Enero de 1980 a Diciembre de 1999.

4.3. Proyección futura de la precipitación ante el cambio climático

Se realiza la proyección del modelo MRI-AGCM para obtener las anomalías de la precipitación en el futuro cercano (2020 - 2039) y el futuro lejano (2080 - 2099) para la cuenca Chancay – Huaral. Se presenta los mapas del futuro y la anomalía de la precipitación. Además, se realiza los indicadores de sequía para obtener la anomalía de las precipitaciones presente y futura de la cuenca. Esto se realiza para determinar la proyección del cambio de la precipitación en la cuenca que puede perjudicar a la agricultura.

4.3.1. Proyección para un futuro cercano y lejano de la precipitación

Se realizó la proyección de la precipitación para el futuro cercano y lejano de la cuenca, obteniendo 240 mapas respectivamente. En la Figura 29, se puede apreciar la proyección de la precipitación en toda la cuenca, además se realiza una comparación con el presente, detectando que P1 y P2 presentan un aumento en la precipitación en la zona alta de la cuenca para los meses de Enero a Abril, P3 y P4 también presentan un ligero aumento en la precipitación en los mismos meses. Los meses de Junio a Agosto son los meses de menos y casi nula precipitación, esta caracterización se presenta en las cuatro proyecciones. En la

Figura 30, se observa un aumento de la precipitación muy severo en los meses de Enero a Abril en las cuatro proyecciones, desde la parte media hasta la parte alta de la cuenca; y en el mes de Diciembre para P1 y P2 en la parte alta de la cuenca. Los meses más secos o con precipitación casi nula se presentan de Junio a Agosto en las cuatro proyecciones, cambiando ligeramente en los meses de Septiembre y Octubre para las proyecciones de P1 y P2 que se mantienen con precipitaciones muy bajas en comparación con las otras dos proyecciones.

Estas proyecciones tienen concordancia con la proyecciones obtenidas del estudio de Kitoh, Kusunoki y Nakaegawa (2011) acerca del cambio climático y las proyecciones sobre América del Sur a finales Siglo XXI, indicando que en América del Sur habrá un aumento de la precipitación en el periodo húmedo y disminución de la precipitación en el periodo seco, el mapa que se presenta en el artículo coincide con la zona de estudio en análisis.

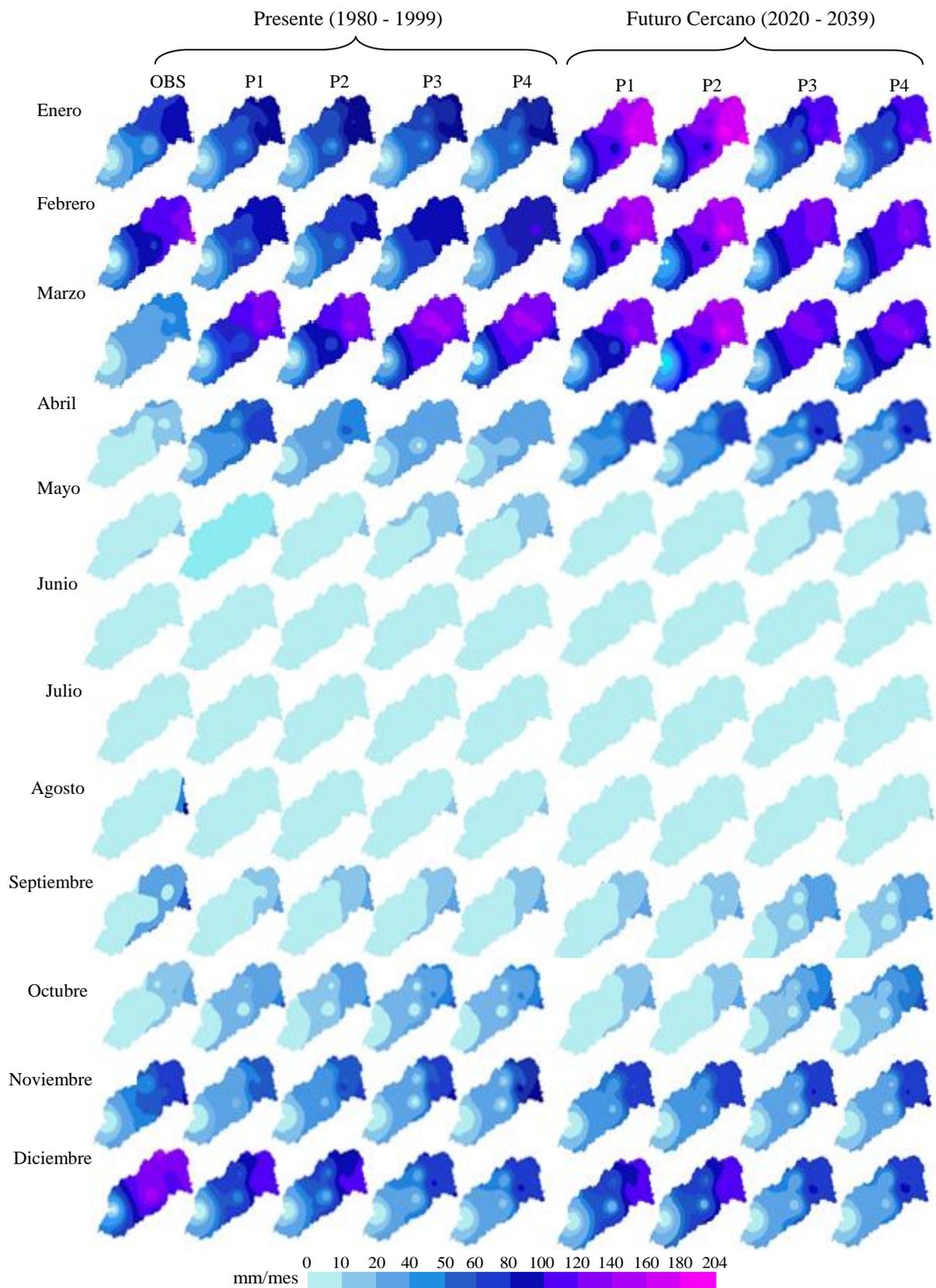


Figura 29. Mapas de precipitación observada, precipitación presente MRI (P1, P2, P3, P4) y mapas de precipitación futura cercana MRI (P1, P2, P3, P4). Periodo de análisis: Meses de Enero a Diciembre.

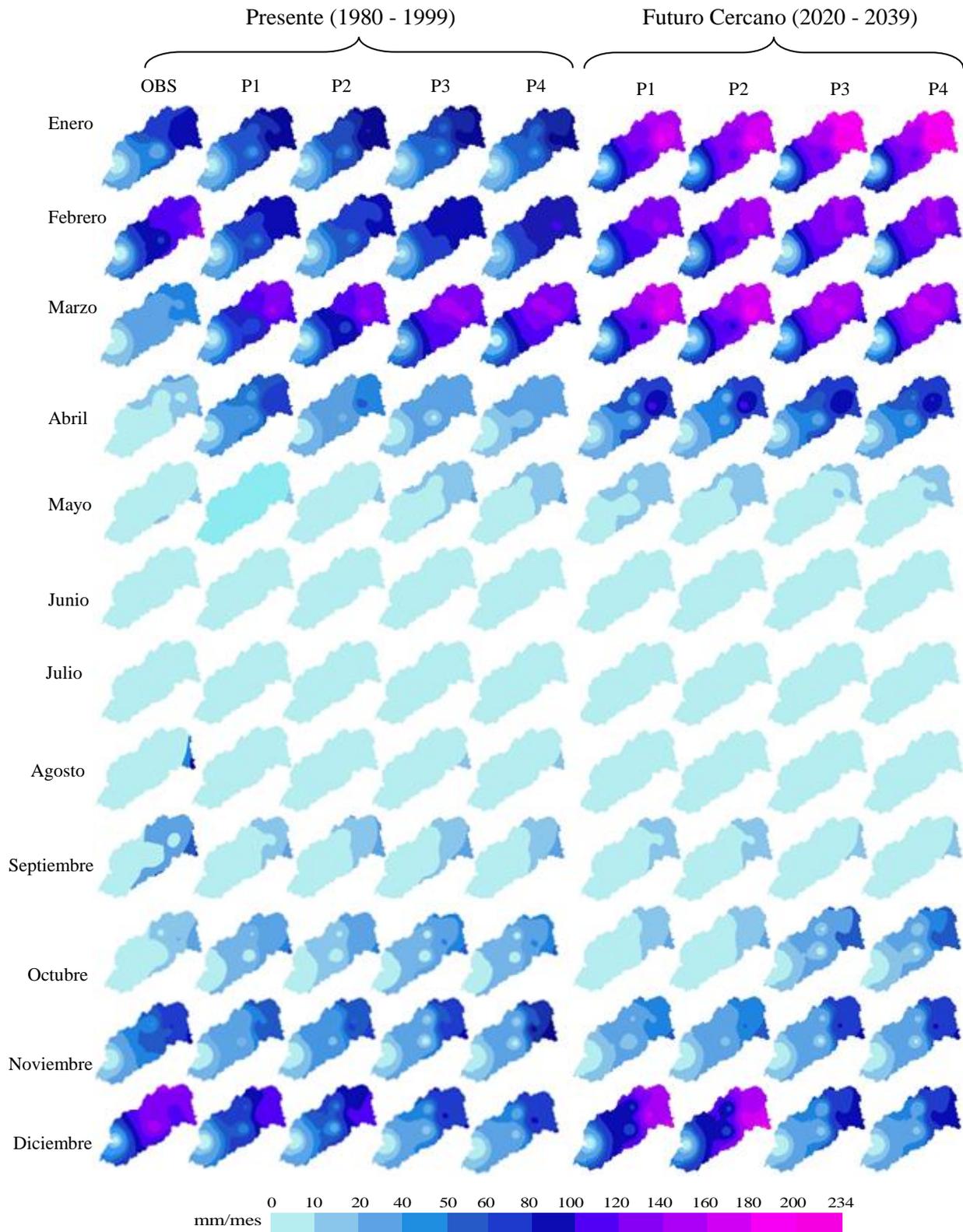


Figura 30. Mapas de precipitación observada, precipitación presente MRI (P1, P2, P3, P4) y mapas de precipitación futura lejana MRI (P1, P2, P3, P4). Período de análisis: Meses de Enero a Diciembre.

4.3.2. Anomalías de la precipitación

Las anomalías de precipitación se obtuvieron a partir de los mapas proyectados con la diferencia de los mapas observados. Estos mapas son a nivel mensual tanto para la precipitación futura cercana y lejana de los cuatro productos MRI. Donde se aprecia la precipitación negativa (porque disminuye la precipitación en la proyección) y positiva (porque aumenta la precipitación en la proyección).

En la Figura 31 para el futuro cercano se obtiene que la precipitación aumente a 71 mm/mes en promedio en parte alta de la cuenca, sobre todo en los meses de enero a abril, también se proyecta en los meses de mayo a julio un leve aumento de 10 mm/mes, en la segunda hasta la cuarta zona, y la primer zona si tendría un déficit de 10 mmm/mes; en agosto si se proyecta un déficit en toda se tiene un aumento en la precipitación con un déficit en la primera zona. Los meses de noviembre y diciembre presentan un déficit de 32.5 mm/mes hasta -106 mm/mes, sobre todo en la parte media de la cuenca, que corresponde parte de la primera zona, y el total de la segunda y tercera zona. En las anomalías se muestra una disminución de precipitación en la costa, siendo esta zona ya árida y aumento en los meses húmedos en toda la cuenca.

De igual manera, se obtuvo los mapas de la anomalía de precipitación futura lejana a nivel mensual con los cuatro productos MRI. Se detalle en los mapas de la Figura 32. Para el futuro lejano el escenario mantiene similitud con la tendencia del futuro cercano, con un mayor aumento de la precipitación en los meses de enero a abril, sobre todo en la zona alto-andina perteneciente a la tercera y cuarta zona de la cuenca, con un promedio de 90.8 mm/mes, en el mes de mayo para P1 y P2 no se presenta cambios en la precipitación, en comparación con P3 y P4 donde se aprecia un aumento y déficit de 10 mm/mes, sobre todo en la primera y segunda zona. En los meses de junio a septiembre se presenta un déficit de 10 mm/me y un aumento aproximadamente de 20 mm/mes en todo la cuenca; en el mes de octubre se observa un cambio, para P1 y P2 surge un aumento de la precipitación se mantiene el déficit pero para P3 y P4. Finalmente para los meses de noviembre y diciembre se tiene un déficit en toda la cuenca para P3 y P4, sin embargo para P1 y P2 se presenta un déficit en la primera y segunda zona, pero un aumento en la tercera y cuarta zona. Las anomalías proyectadas para cada futuro son plausibles debido a la alta resolución del modelo MRI - AGCM.

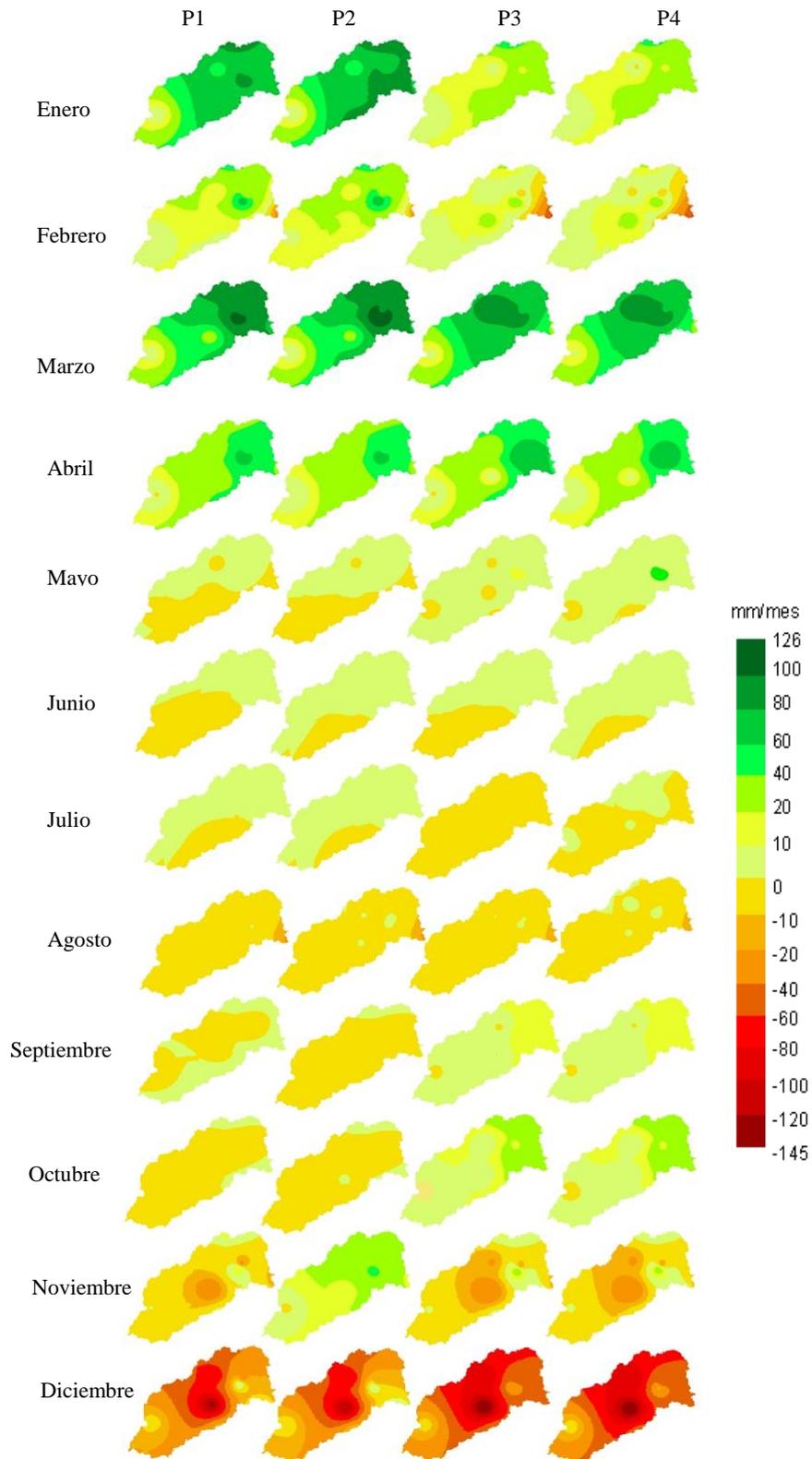


Figura 31. Mapas de las anomalías de precipitación mensual con los productos MRI (P1, P2, P3, P4) para el futuro cercano. Periodo de análisis del año 2020 a 2039 de los meses de Enero a Diciembre.

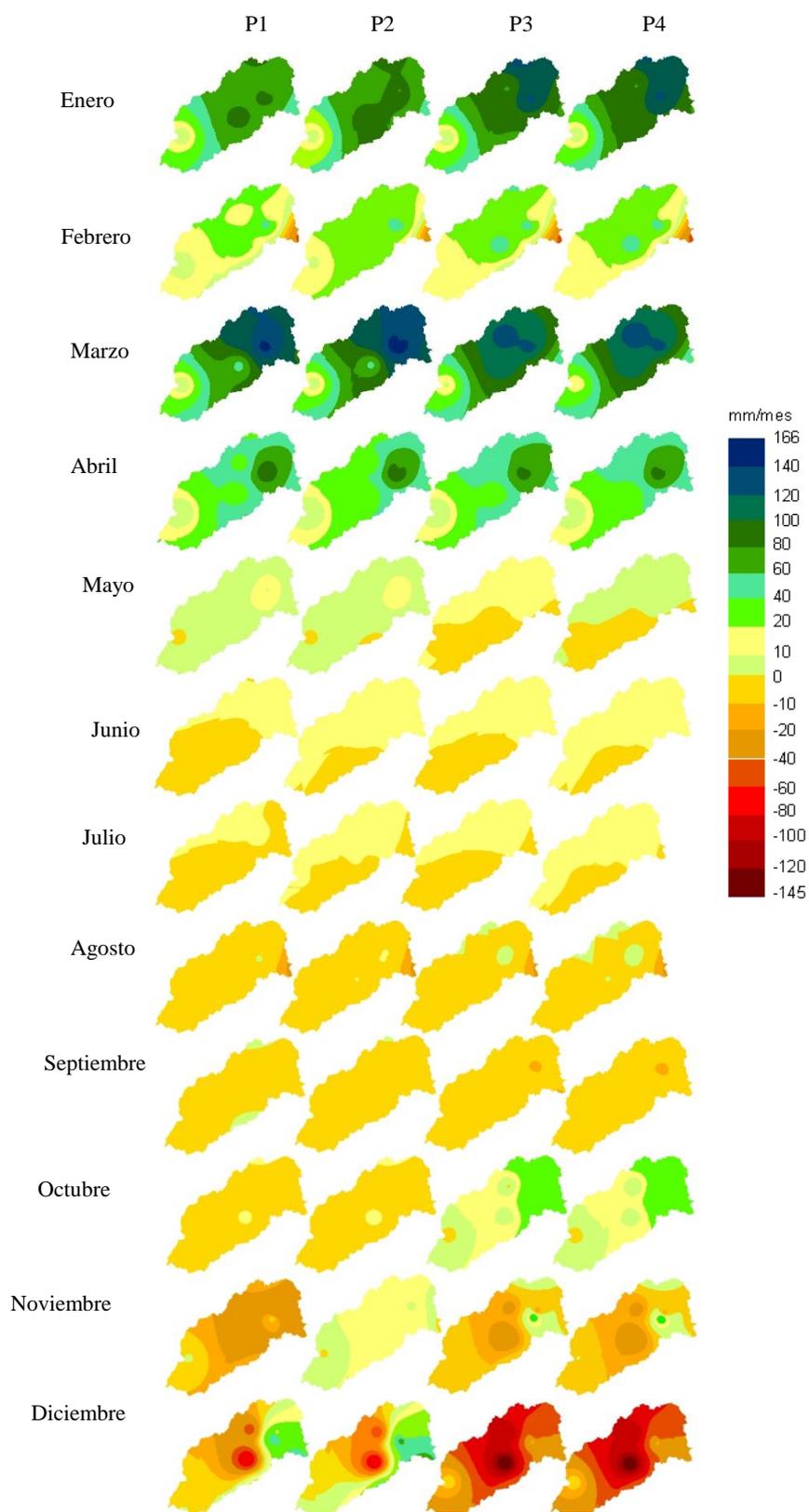


Figura 32-Mapas de las anomalías de precipitación mensual con los productos MRI (P1, P2, P3, P4) para el futuro lejano. Periodo de análisis del año 2080 a 2099 de los meses de Enero a Diciembre.

4.3.3. Índices de sequía

Estos índices van a permitir conocer los periodos húmedos y secos de la precipitación que se puedan presentar en el periodo presente (1980 a 1999). Para el futuro cercano (2020 - 2039) y futuro lejano (2080 a 2099) se realizara la comparación con los productos MRI – AGCM 3.1S CDF (P2) y MRI – AGCM 3.2S CDF (P4), debido a que con estos dos productos se mantiene un significativo coeficiente de correlación en la mayoría de estaciones pluviométricas y espacialmente representan mejor la precipitación mensual en la cuenca Chancay-Huaral.

a. Porcentaje de precipitación normal (PPN)

Se realiza este indicador para conocer las anomalías que se presentan mensualmente en la actualidad y las que se podrían presentar de acuerdo a la proyección futura de la precipitación según el modelo de alta resolución MRI-AGCM con los productos P2 y P4 para el futuro cercano y lejano.

Se debe considerar que el porcentaje de precipitación normal es limitado sobre todo en el análisis en grande regiones donde se coexisten zonas áridas y húmedas (Monzonis et. al. 2014), a pesar de ello es un índice muy utilizado por diversos autores debido a su simplicidad y por poder ser calculado con poca información meteorológica disponible (Bhalme & Mooly, 1980).

La anomalía se representara en diagrama de cajas con la mediana (50 de percentil) y con un 25 y 75 de percentiles, los valores de los límites máximos y mínimos no se encuentren a más de 1.5 veces el RIC (Rango Intercuartílico) de los percentiles 25 y 75 respectivamente, los valores atípicos son representados por cruces. En la zona de estudio se ubican cuatro zonas homogéneas, los siguientes gráficos representaran cada zona con una estación representativa elegida por el coeficiente de correlación de Pearson. Tres de ellas dentro de la cuenca y en cada zona; y una representando la región alta de la cuenca (cuarta zona).

En la estación Huayan, representa a la primera zona, se tiene que principalmente en todo el año se presenta una baja precipitación por lo que los valores extremos representan los meses de los años en que se elevó la precipitación; además, esta zona de la cuenca se caracteriza por ser árida y con escasez de precipitación sobre todo en los meses de junio a septiembre. Para el futuro cercano para P2 como para P4 la anomalía es similar y sigue el

mismo comportamiento estacional de la precipitación, siendo los meses más secos de junio a septiembre; y se también llega al 600 por ciento en los meses de octubre y noviembre en P2 (1.6 y 18.3 mm/mes) y en marzo en P4 (75.4 mm/mes). Se tiene que el periodo húmedo (Enero a Abril) se presentan un comportamiento de la anomalía similar con el presente. Y para el futuro lejano de P2 se tiene un aumento en la precipitación en los meses de noviembre a marzo, y se presenta un valor extremo en el mes de abril que corresponde al año 2087 con una precipitación de 19.3 mm/mes, perteneciendo este mes al precio seco, por lo tanto se puede caracterizar como anormal para esta zona por la falta de precipitación. Y en P4 el comportamiento es similar al futuro cercano con más valores atípicos en el periodo húmedo en los meses de enero a marzo, siendo las precipitaciones más elevadas que las del presente desde 20 mm/mes hasta 90 mm/mes. (Ver Figura 33)

En la estación Pallac, representante de la segunda zona de la cuenca, presenta precipitaciones típicas para el periodo húmedo y seco llegando de 215 mm/mes hasta 0 mm/mes, respectivamente. En el presente la mayoría de precipitaciones está dentro del límite superior del percentil 75, presentando más valores atípicos en septiembre y octubre; además los meses de julio y septiembre presenta una mediana de cero, con un valor atípico de 1200 por ciento, por la precipitación de 2.6 mm/mes, pareciendo ser extremo debido a que el promedio de la precipitación en esos meses es de 0.2 mm/mes. Para el futuro cercano de P2 se tiene dos valores extremos atípicos en octubre de 2027 y septiembre de 2036, presentándose una precipitación mayor del promedio, con 38.9 y 11.8 mm/mes respectivamente. También se presenta una mayor precipitación en los meses de enero a marzo que el promedio del presente, similarmente se presenta para P4, presentando un aumento en la precipitación sobre todo en los meses de febrero y marzo con una precipitación promedio mensual de 103.7 y 113.6 mm/mes respectivamente. Para el futuro lejano P2, los meses de diciembre a abril presentan mayor precipitación promedio mensual comparado con el presente, el mes de septiembre presenta valores atípicos de 6 a 9 mm/mes con respecto al promedio de 1.6 mm/mes; para P4, la precipitación de enero a abril es mayor al promedio del presente y en el periodo seco se tiene precipitaciones atípicas en los meses de mayo de 2.1 mm/mes y septiembre de 4.2 mm/mes con respecto al promedio mensual del presente. (Ver Figura 34)

En la Figura 35, la estación Santa Cruz, representa la tercera zona de la cuenca. Se tiene valores atípicos en los meses de junio a septiembre, con precipitaciones desde 24 mm/mes

hasta 143.5 mm/mes, valores elevados con respecto al promedio de la precipitación en esos meses que es de 2.5 a 16.2 mm/mes. Para el futuro cercano P2 y P4 se presenta un aumento de los valores de precipitación en los meses de enero a abril con 30 mm/mes para P2 y 20 mm/mes para P4 en promedio; y con valores atípicos en julio, agosto y octubre para P2 de 3, 4.3 y 94.2 mm/mes respectivamente con respecto a la media, y los meses de junio a agosto para P4 con 5, 10 y 16 mm/mes respectivamente con respecto al promedio. Para el futuro lejano en P2 y P4 se presenta una precipitación con un mayor aumento en los meses de enero a abril, para P2 se registra un aumento promedio de 60 mm/mes y para P4 de 35 mm/mes; y se tiene valores atípicos sobre todo en el periodo seco, en los meses de junio a agosto, para P2 la precipitación se eleva de 4 a 6 mm/mes con respecto al promedio, y para P4 la precipitación alcanza los valores desde 4 a 10 mm/mes, siendo mayores con respecto a su promedio de 0.6 a 1.6 mm/mes.

La estación Yantac, representa la cuarta zona, en el presente los valores se encuentran debajo del 500 por ciento, los valores atípicos ubicados en el periodo seco son valores mayores al promedio, en los meses de junio de 69.9 mm/mes y en agosto de 62.1 mm/mes, teniendo valores promedio de precipitación en estos meses de 15.6 y 18.1 mm/mes, respectivamente. En el futuro cercano P2 se presentan valores atípicos en los meses de enero y julio, se tiene una precipitación de 205 y 216 mm/mes, y de 20 mm/mes respectivamente, estas precipitaciones son mayores al promedio que con valores desde 5mm/mes hasta 121 mm/mes; para P4 se presenta una valor atípico en el límite inferior en el mes de diciembre indicando una precipitación menor de 28 mm/mes con respecto al promedio que es 99 mm/mes, también se presenta valores atípicos en el límite superior en los de febrero, mayo, octubre y noviembre. Para el futuro lejano P2 se presenta un aumento de la precipitación en el mes de junio con respecto al promedio de 4.4 mm/mes a 15 mm/mes; además se tiene un aumento de la precipitación en los meses de diciembre a enero y en octubre se tiene un valor a típico de 109 mm/mes. Para P4 se presenta un aumento en las precipitaciones de octubre a enero y disminuye la precipitación de febrero y marzo; asimismo se tiene valores atípicos en mayo y agosto de 60 y 44 mm/mes respectivamente con respecto al promedio que es de 30 y 12 mm/mes en cada mes. Esta estación presenta en sus proyecciones un comportamiento de disminución de la precipitación en el periodo seco debido a que disminuye la precipitación en 8 mm/mes en promedio en todos los productos aproximadamente. (Ver Figura 36).

Además, todas las estaciones representativas presentan valores menores al 100 por ciento , valores menores al promedio, sobre todo en los meses secos de junio a septiembre, presentando una mayor concentración y menos dispersión, en comparación con los valores de los meses húmedos de diciembre a abril, que si presentan una mayor dispersión.

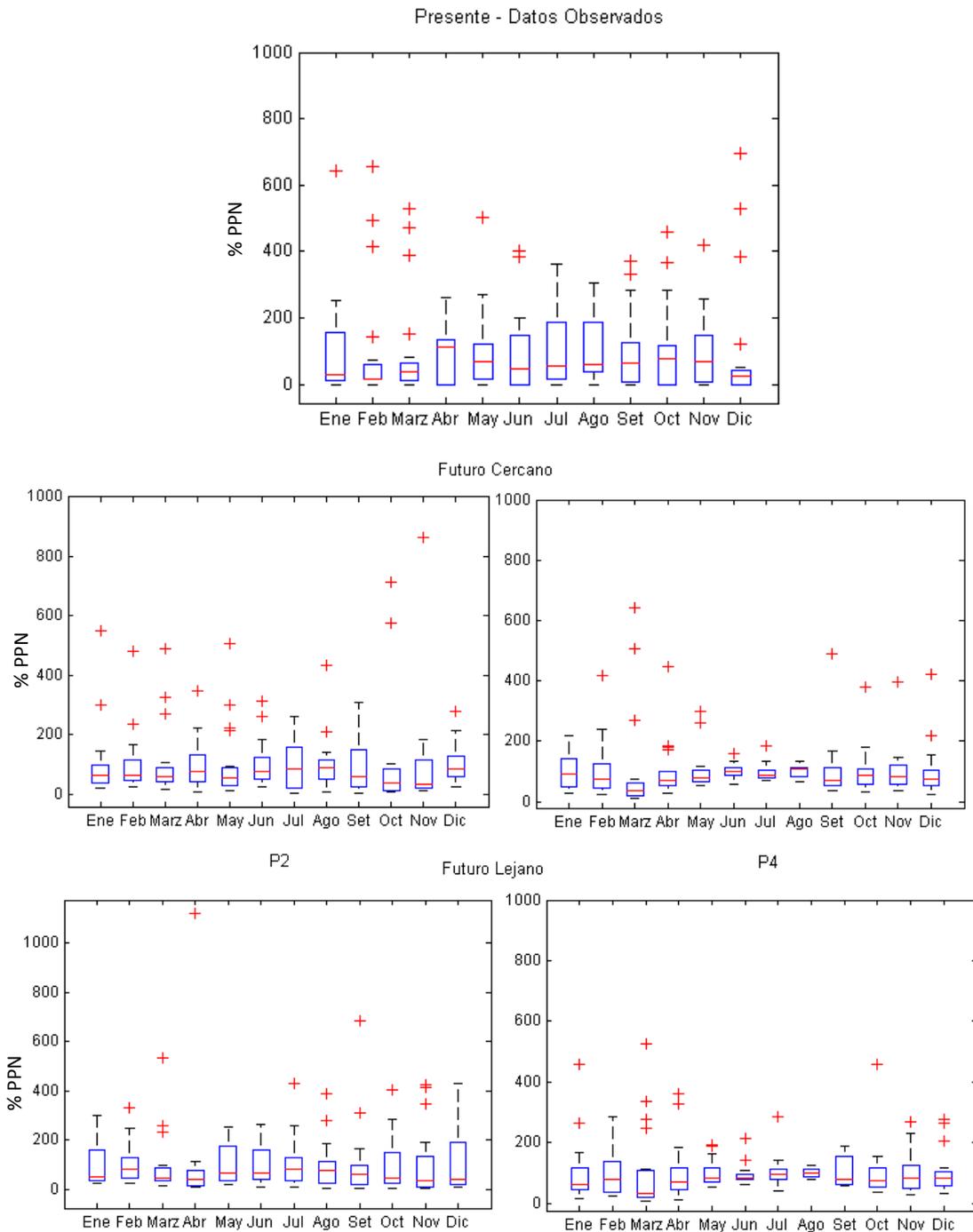


Figura 33. Diagrama de cajas para las anomalías del porcentaje de precipitación normal (PPN) en la estación pluviométrica Huayan.

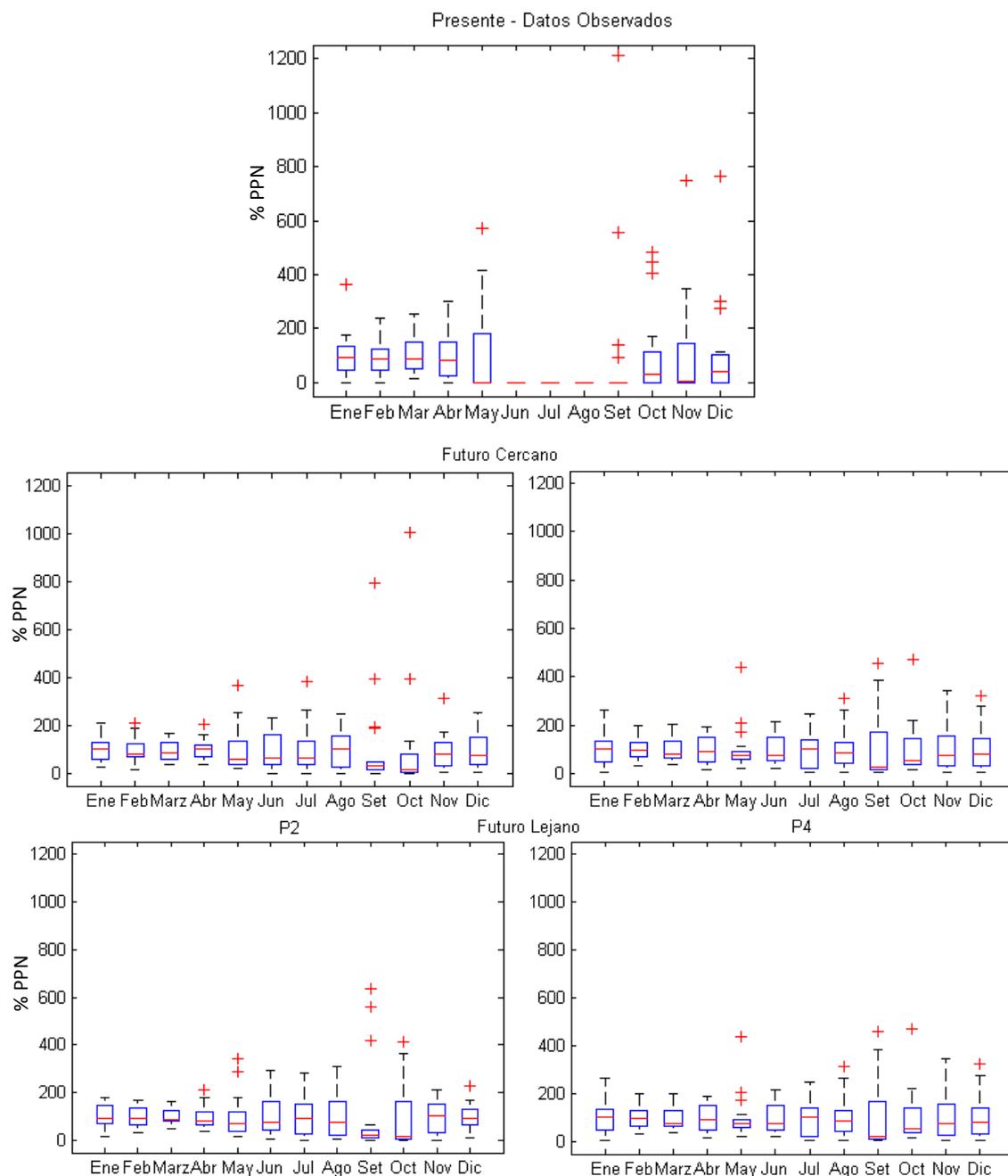


Figura 34. Diagrama de cajas para las anomalías del porcentaje de precipitación normal (PPN) en la estación pluviométrica Pallac.

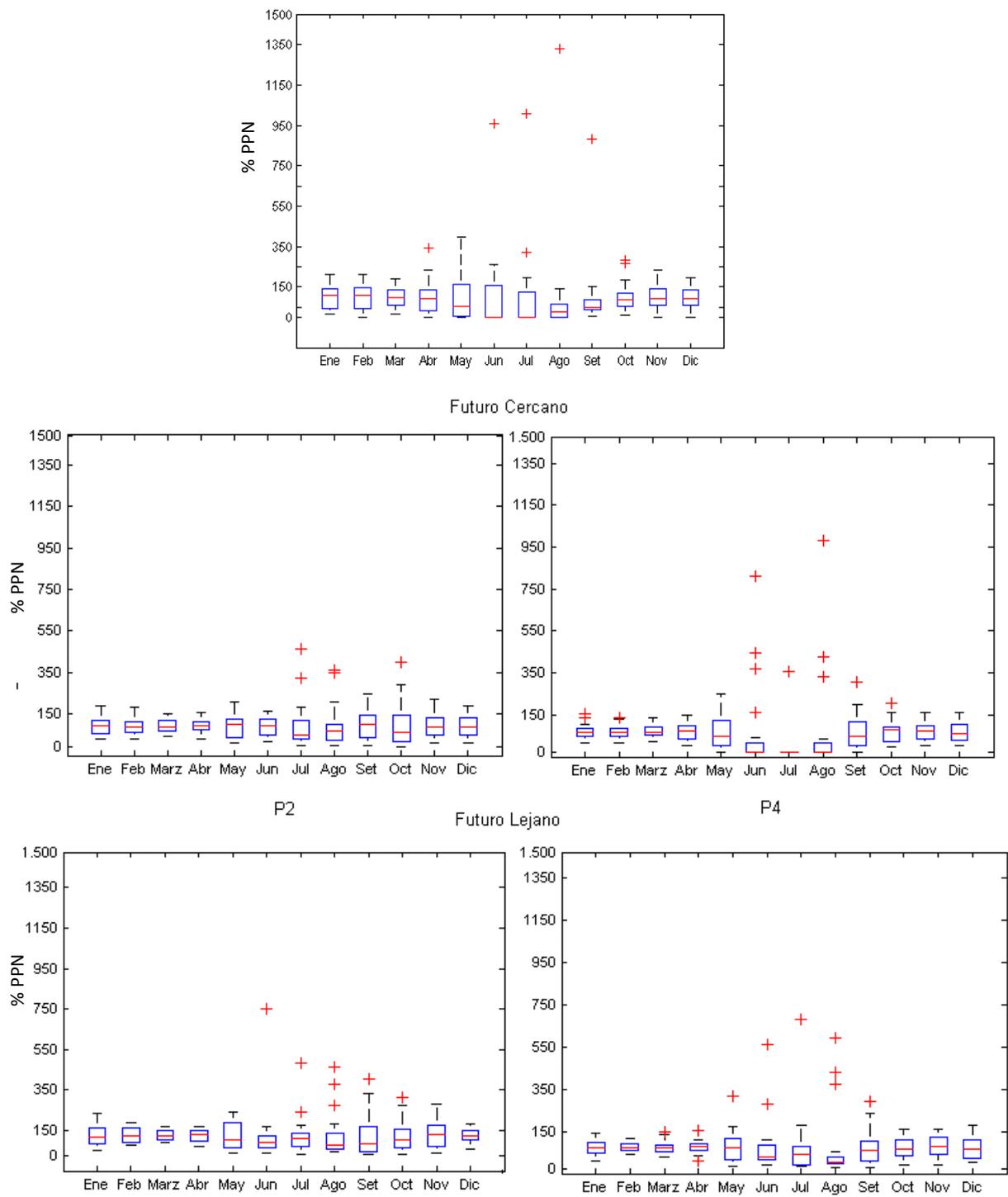


Figura 35. Diagrama de cajas para las anomalías del porcentaje de precipitación normal (PPN) en la estación pluviométrica Santa Cruz.

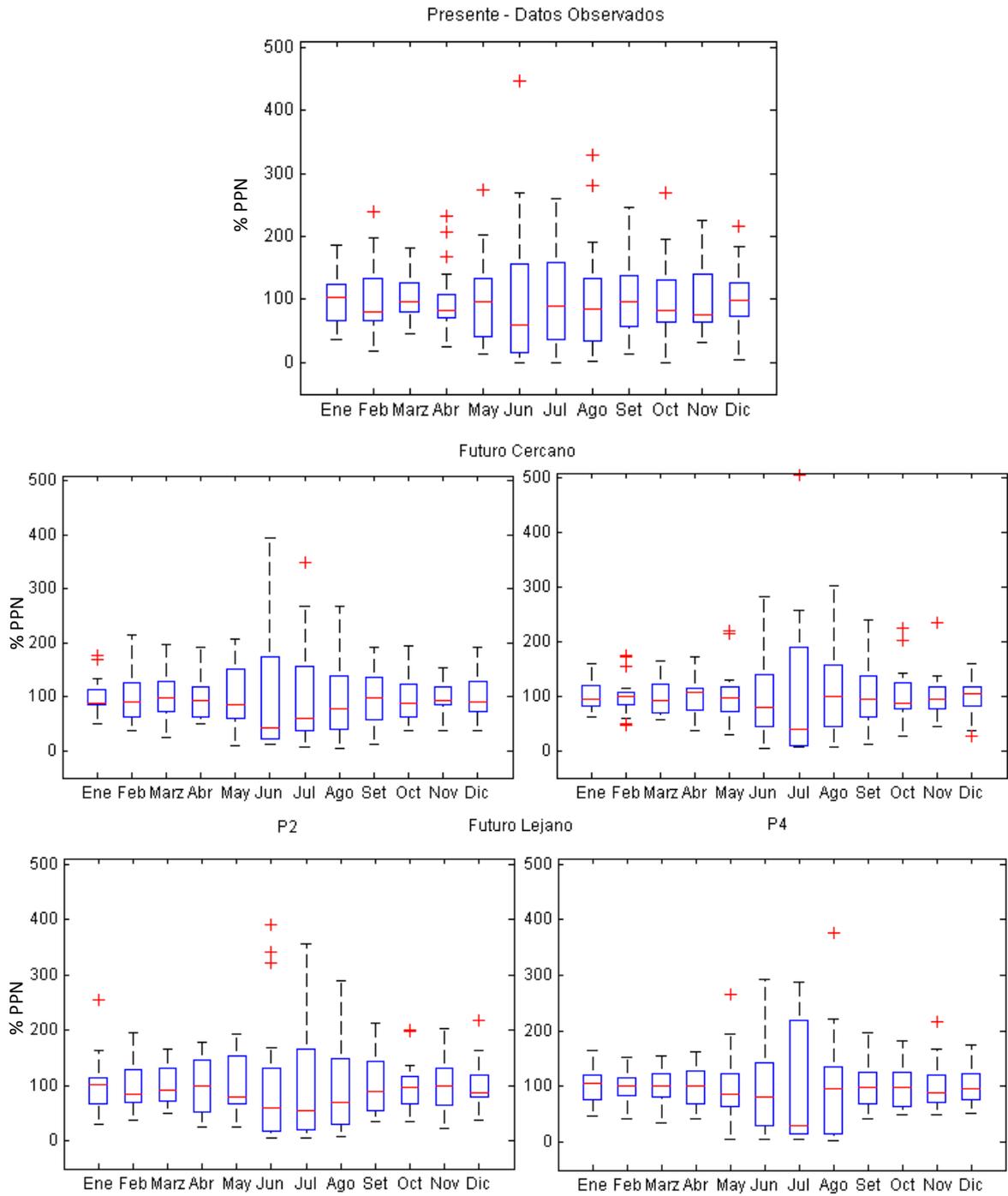


Figura 36. Diagrama de cajas para las anomalías del porcentaje de precipitación normal (PPN) en la estación pluviométrica Yantac.

b. Precipitación tendencia anual (PTA)

Con este tipo de índice se muestra en general como ha sido el comportamiento de la precipitación en todo el periodo a nivel anual reflejando las anomalías de la precipitación si el año ha sido seco o húmedo. Este índice también es considerado en el monitoreo de sequía de Chile, desarrollado con apoyo principalmente de la UNESCO y la FAO. Para una mayor información se puede acceder a la página web de “Monitoreo de Indicadores de Sequía - Climate Data Library” (DMC & DGA, 2014), en que se detalla una guía orientativa de este indicador.

En las estaciones representantes se tiene la siguiente información. La estación Huayan presenta un rango normal en su precipitación anual durante casi todo el periodo, excepto por el año 1996 que presenta una anomalía ligeramente lluviosa; y el año 1998, es el de mayor precipitación en comparación con todo el periodo, siendo extremadamente lluvioso. Para el futuro cercano para P2, la precipitación se encuentra en casi todo el periodo en el rango normal, el año 2021 es el que presenta una precipitación extremadamente lluviosa, los años 2027 y 2039 presentan ser moderadamente lluvioso y el año 2023 presenta un ligero aumento de la precipitación; en comparación con el presente, en este periodo se proyecta más años lluviosos. Para P4 se tiene más años húmedos que secos, se inicia con un año ligeramente seco, en el 2023 se tiene una precipitación moderadamente lluviosa, el 2027 es contrario a P2, ya que presenta ser un año ligeramente seco, al igual que 2029 y 2032; y los años 2028 y 2034 presentan un aumento en la precipitación, siendo una anomalía de extremadamente lluvioso. En comparación con el presente se tiene más precipitación a nivel anual. Y para el futuro lejano para P2 se presentan 6 años ligeramente secos, los años 2086 es moderadamente seco y 2098 es extremadamente seco; los años 2094 y 2097 son extremadamente lluviosos. Para P4, se tiene 4 años ligeramente secos, y presenta seis años moderadamente secos, además se tiene cuatro años extremadamente lluviosos, esto refleja la precipitación anual muy diversa en comparación con todos los futuros. (Ver Figura 37)

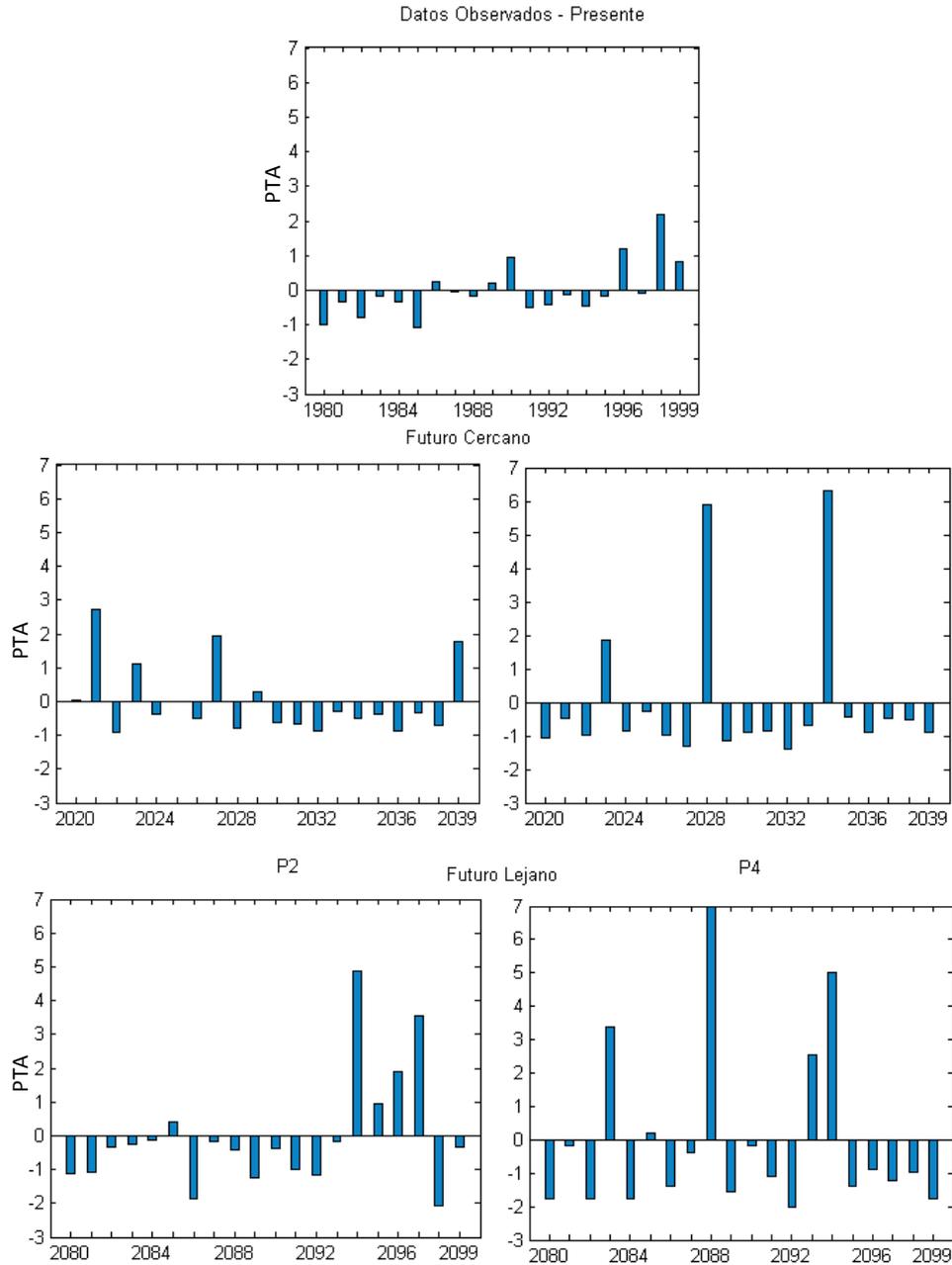


Figura 37. Diagrama de barras de la precipitación de tendencia anual (PTA) en la estación pluviométrica Huayan.

En la estación Pallac, en el periodo presente se presenta anomalías extremadamente secas y lluviosas, con 9 años cada una; 6 años con anomalías mayores a -5 y 5 para el periodo seco y lluvioso respectivamente. En el futuro cercano P2 presenta 9 años extremadamente lluviosos y 7 años extremadamente secos, los años 2022 y 2032 son los que presentan una mayor anomalía. Para P4 se presenta 5 años extremadamente húmedos, los años 2028 y 2034 tienen las anomalías más extremas, después se tiene 12 años que son extremadamente secos, siendo los años 2027 y 2029 son los más anómalos, el resto de los años están en el rango normal. Para el futuro lejano para P2 se presentan seis años extremadamente

lluviosos, siendo los más extremos 2084 y 2094, presentándose más años secos en casi todo el periodo, los años más extremos secos son 2080 y 2099. Para P4 se presentan 8 años lluviosos, siendo dos de ellos los más extremos (2083 y 2088) y los otros años son secos, presentando 4 años extremadamente secos (2080, 2082, 2084 y 2092). Observar la Figura 38.

En la Figura 39 se tiene la estación Santa Cruz, con anomalías de precipitaciones mayores para esta zona. En el presente se tiene aproximadamente la misma cantidad de años lluviosos y secos, siendo solo 3 años normales. Para el futuro cercano P2 presenta más años secos que lluviosos. Para el futuro cercano P4 se presenta más años lluviosos y secos, siendo el 2025 y 2034 los extremos lluviosos, y los extremos secos 2024 y 2035, y el periodo solo presenta un año normal (2022). En el futuro lejano P2 presenta más años secos que lluviosos, siendo verdaderamente extremo el año 2087, con una precipitación anual de 1033.7mm y el año 2092 extremo seco con 214.6mm. Para P4 se tiene la misma cantidad de años lluviosos y secos, siendo el año 2082, el único año normal, los años extremos lluviosos son 2085 y 2094, los años 2084 y 2095 como los años extremadamente secos.

En la zona más lluviosa de la cuenca, representada por la estación Yantac, se tiene en el presente que durante el periodo 1980 a 1999, en los años de 1982 a 1995 fue una época seca, en comparación con los últimos años que han sido muy lluviosos. Para P2 se tiene 4 años extremadamente lluviosos y 6 años secos, con 5 años en el rango normal. Para P4 aumento los años lluviosos a 8 años, de la misma manera que para los años secos, presentando pocos años normales. Y para el futuro lejano P2 se presentan la misma cantidad de años lluviosos y secos, el año 2094 es el más lluvioso con 1116.9 mm de precipitación anual; y P4 tiene una variación entre años lluviosos y secos, presentando una época seca de 2089 al 2096, siendo extremadamente seca (Ver Figura 40).

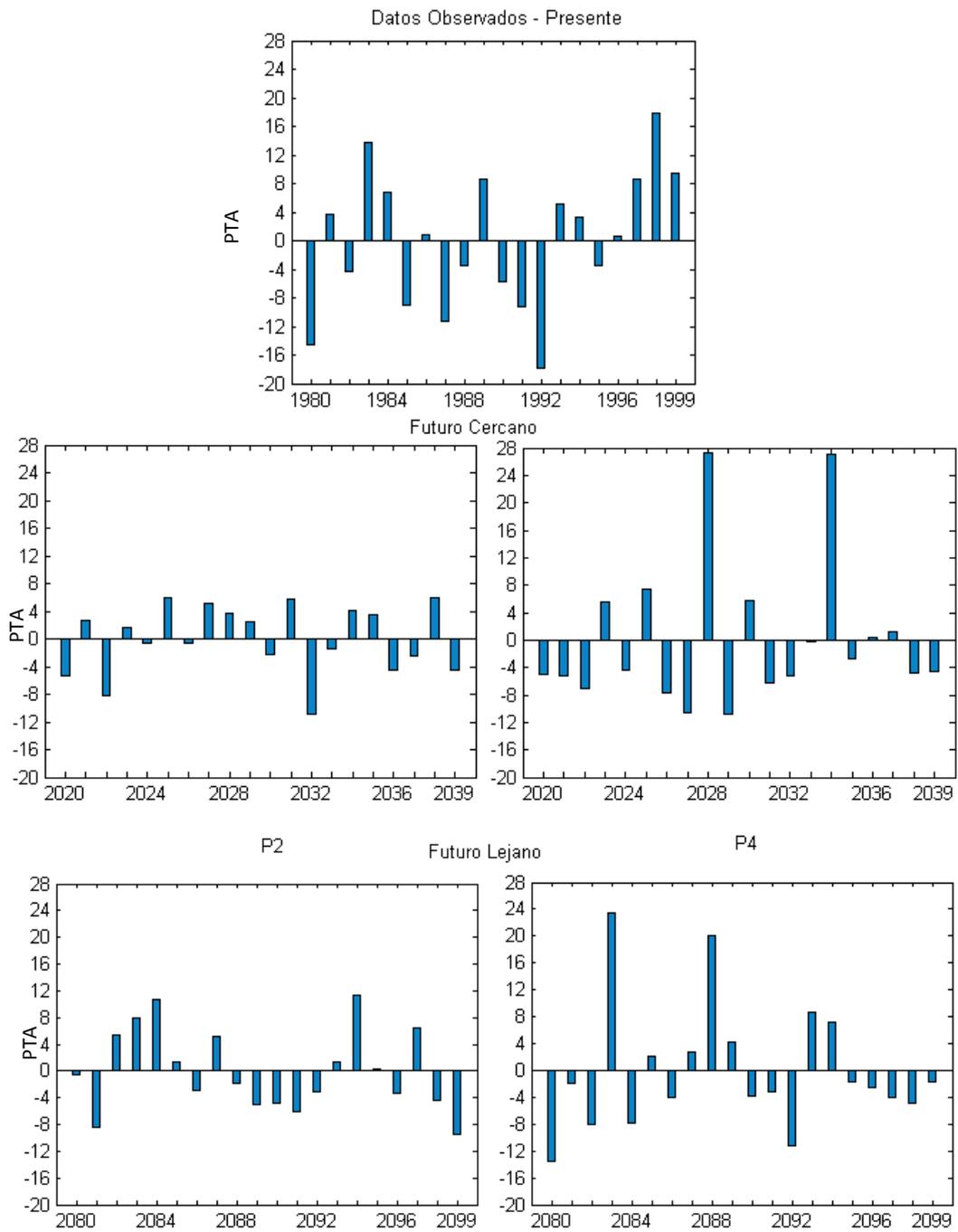


Figura 38. Diagrama de barras de la precipitación de tendencia anual (PTA) estación pluviométrica Pallac.

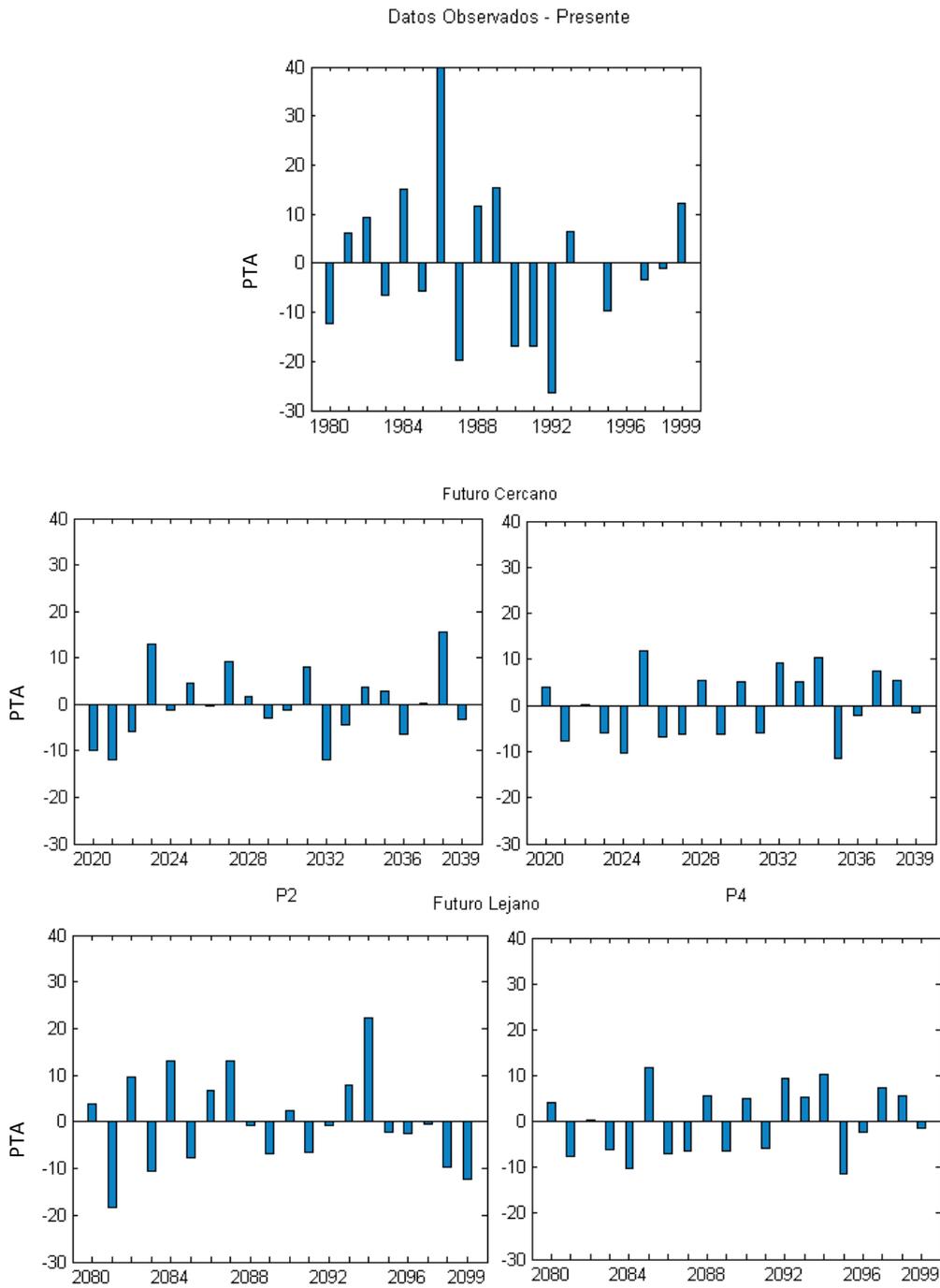


Figura 39. Diagrama de barras de la precipitación de tendencia anual (PTA) en la estación pluviométrica Santa Cruz.

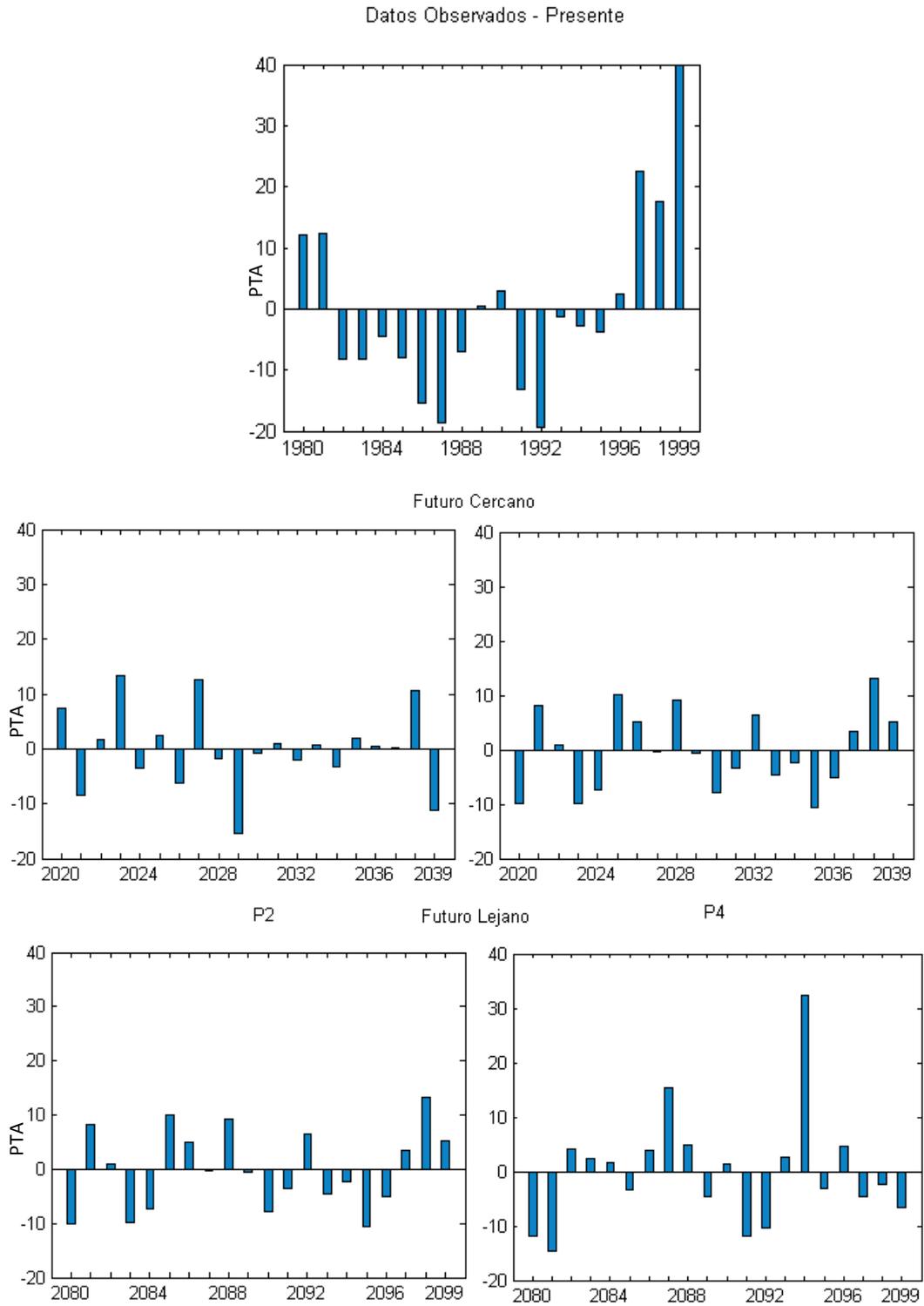


Figura 40 Diagrama de barras de la precipitación de tendencia anual (PTA) en la estación pluviométrica Yantac. Periodo de análisis: Año de 1980 a 1999.

c. Índice de precipitación estandarizada (SPI)

El método SPI es un método extensamente utilizado, así lo demuestran los trabajos de Türkes (1996) en Turquía; Zanvettor (2000) en Argentina; Ji and Peters (2002) en Estados Unidos, en México por el Centro de Investigaciones sobre la Sequía del Instituto de Ecología (CEISS, 2004). Y en la actualidad el SPI se utiliza para dar seguimiento a la sequía en los Estados Unidos de América a través del Centro Nacional de Mitigación contra la Sequía, el Centro Climático de Colorado, el Centro Climático Regional del Oeste y el Centro de Predicción del Clima de los EUA (Pichardo, 2004); y en Chile por la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), la Dirección General de Aguas (DGA) y la Fundación para el Desarrollo Frutícola (DMC & DGA, 2014).

En la escala de tres meses, los valores del SPI presentan alta sensibilidad a los cambios de la precipitación acumulada durante el periodo trimestral, por lo cual cambian de positivo a negativo en cortos periodos de tiempo (Nuñez et. al., 2007). Asimismo, el SPI de 3 meses refleja las condiciones de humedad a corto y medio plazo, y proporciona una estimación estacional de la precipitación. En las principales regiones agrícolas, un SPI de 3 meses podría ser más eficaz para poner de relieve la existencia de condiciones de humedad que otros índices hidrológicos actuales. (OMM, 2011). La importancia de conocer este índice en la cuenca es porque la población de Chancay- Huaral trabaja principalmente en el sector agrícola. El SPI de 6 meses indica tendencias de precipitación entre estacionales y a medio plazo y se considera más sensible a las condiciones en esta escala que el Índice de Palmer. Un SPI de 6 meses puede ser muy eficaz para mostrar la precipitación en distintas estaciones. (OMM, 2011). Dado que estas escalas temporales son el resultado acumulado de períodos más cortos que pueden estar por encima o por debajo de lo normal, el SPI a más largo plazo tiende a situarse en torno a cero, a menos que se esté produciendo una tendencia húmeda o seca característica. Los SPI de estas escalas temporales generalmente se vinculan con cauces fluviales, niveles de los reservorios e incluso niveles de las aguas subterráneas a escalas temporales más largas, como es el SPI de 12 meses o un año. (OMM, 2011).

Es por esto que realizamos el análisis del SPI en tres escalas: 3, 6 y 12 meses, en las cuatro estaciones representativas de cada zona. Caracterizando la duración, intensidad promedio y frecuencia.

En la estación Huayan (representa la primera zona), como se observa en la Figura 41 y Figura 42, se tiene que la duración de la sequía en el SPI 3, pertenece a los meses marzo a mayo de 1980, junio a agosto de 1981, agosto a diciembre de 1982, y de mayo a julio de 1997 con una sequía ligera. El año 1985 presenta sequías ligeras y moderadas, el mes de agosto presenta una sequía extrema. El SPI 6 presenta sequías ligeras de junio a noviembre de 1980; en enero de 1984 se presentan una sequía extrema y en el año 1985 desde el mes de marzo a diciembre se presenta sequías moderadas y extremas, siendo estas en los meses de agosto noviembre; y en el año 1986, los meses de enero y febrero son sequías extremas. Para el SPI 12, se observa en el año 1980 en diciembre se presenta una sequía moderada, de mayo a julio de 1981 una sequía ligera, en 1985 junio a agosto una sequía moderada, desde septiembre a diciembre, y de enero a mayo de 1986 se presenta una sequía extrema, con una sequía moderada de junio a agosto. Entonces el año 1985 y principios de 1986, para esta región fue una temporada seca. En el futuro cercano P2, para el SPI 3, el año 2029 desde marzo a junio, y de julio a agosto del 2036 se tiene una sequía ligera, con el SPI 6 los meses de marzo a septiembre de 2029, de febrero a abril en el 2036, se presenta también una sequía ligera; para el SPI 12, se tiene que de febrero a octubre del año 2029 y de febrero a diciembre del 2036 se presenta una sequía ligera. Además en las tres escalas del SPI, se tiene que en febrero del 2038 se tendrá una sequía ligera. Para el futuro cercano de P4 se tiene que el año 2027 se presenta una sequía ligera los meses de enero a marzo y junio en SPI 3, de enero a junio y septiembre con SPI 6; de febrero a junio y septiembre con SPI 12. Además el año 2032 se presenta desde enero a abril en SPI 3, de enero a julio - octubre y noviembre para el SPI 6; febrero a julio - octubre y noviembre en el SPI 12, una sequía también ligera. Asimismo es probable que se presente una sequía ligera en las escalas del SPI 3 y 6 para los años 2036, 2038 y 2039, con una sequía moderada en el mes de enero del último año. Para el futuro lejano P2, para el año 2086 se presentarán sequías ligeras desde el mes de marzo a nivel de las tres escalas SPI, siendo el mes de octubre con sequía moderada en el SPI 3, sequía extrema en el SPI 6 y sequía ligera en el SPI 12. El año 2087 los meses de enero a marzo, y el año 2088 los meses de abril a octubre se presentará una sequía ligera según el SPI 12, siendo coincidiendo en los meses de febrero a marzo, y abril en los años 2087 y 2088, respectivamente con el SPI 6. Se puede considerar por el SPI 12 el año 2091 con una sequía moderada de enero a octubre, así como para el SPI 6 de enero a mayo; y para el SPI 3 el mes de enero, presentando en febrero y marzo sequías ligeras. Así como el año 2099 en los meses de enero y noviembre, que presentan en

las tres escalas del SPI sequias ligera. Para el futuro lejano P4 el año 2091, en los meses de julio a agosto se presenta una sequía ligera en el SPI 6 y de octubre a noviembre una sequía moderada con una sequía extrema en el mes de diciembre, así como este último en el SPI 3. El año 2092 se presenta una sequía ligera en los meses de enero a julio para el SPI 6, de enero a noviembre para el SPI 12, y de enero a abril en SPI 3, siendo común el mes de febrero en las tres escalas del mismo año una sequía extrema; pero los meses de octubre y noviembre en las escalas del SPI 3 y 6 se presenta una sequía extrema. Y en el año 2099 en el mes de febrero se presenta una sequía moderada para las escalas del SPI 3 y 6, y una sequía ligera para SPI 12, extendiéndose un mes más.

En la Figura 43 y Figura 44, se aprecia las escalas del SPI de la estación Pallac, representando a la segunda zona. En el presente se tiene que el SPI 3 en el año 1992 en los meses de enero a abril se tiene sequias extremas, así como en el SPI 6 los meses de enero a julio del mismo año; y de febrero a diciembre en el año 1992 y principios del año 1993 (enero) se presenta la sequía extrema en el SPI 12, siendo este año el más seco en el periodo de 1980 a 1999. Además en el año 1987 en el mes de diciembre se presentó una sequía ligera en las tres escalas de SPI, y en el año 1990 desde el mes de febrero a noviembre se presentan sequias ligeras en las tres escalas. Para el futuro cercano P2 se tiene que en el año 2032 el mes de noviembre se tiene sequias extremas en SPI 3 y 6; y en diciembre y enero del 2033 en SPI 12. Además desde febrero a octubre de 2033 en el SPI 12 se tiene una sequía moderada; y el año 2036 desde el mes de marzo a septiembre y noviembre se tiene una sequía moderada, presentando en marzo y abril sequía moderada en SPI 6, en septiembre sequía extrema en SPI 3. Asimismo el año 2038 los meses de enero y febrero se presentan sequias extremas en los SPI 3 y 6, pero en SPI 12 la sequía es moderada. Para el futuro cercano P4, se tiene el año 2027 se tiene sequias moderadas y ligeras en los meses de enero a mayo en SPI 3; y de enero a septiembre en SPI 6; y en SPI 12 de febrero a septiembre la sequía es moderada. En diciembre de 2029 se tiene sequía ligera en SPI 3 Y 12, y sequía moderada en SPI 6. En el 2034 de octubre a diciembre se tiene sequía ligera en SPI 3 y 6, y sequía moderada en noviembre del mismo año en SPI 6. También en septiembre del año 2035 se tiene una sequía extrema en SPI 6. Finalmente en el 2038 en el mes de enero se tiene sequias moderadas en el SPI 3 y 6. Para el futuro lejano P2, en el año 2080 en diciembre se tendrá una sequía extrema en SPI 3 y 6, y en SPI 12 una sequía ligera. En los meses de febrero a noviembre del año 2089 y principios del año 2090 en SPI 12, se tiene sequias ligeras y moderadas, con sequias extremas en los meses de

abril para SPI 3 y en julio para SPI 6 en el año 2089. En el año 2091 es probable que en el mes de enero se tenga una sequía extrema. Además, en el año 2099 de enero a diciembre se tiene sequías ligeras y finalizando sequías moderadas en SPI 12, los meses de noviembre y diciembre para SPI 3 y SPI 6 se tiene sequías ligeras. Para el futuro lejano en P4, los años 2080 y 2082 en los meses de junio a septiembre se tiene sequías ligeras y moderadas en SPI 6. En el año 2086 se tiene en enero en SPI 3 una sequía extrema y moderada en SPI 6. En el año 2091, se tiene en los meses de julio, agosto, y de octubre a diciembre sequías moderadas y ligeras en SPI 3 y 6. En el año 2092 en el mes de enero se tiene una sequía extrema en las tres escalas del SPI, y en febrero en SPI 6 y 12; seguidamente de sequías moderadas hasta marzo en SPI 3, a mayo SPI 6, y a junio en SPI 12. Asimismo el año 2095 se presenta sequías ligeras en los meses de octubre a diciembre en SPI 3 y 6, con una sequía ligera en el mes de febrero en el año 2099 en las tres escalas.

En la estación Santa Cruz, representa la tercera zona (Figura 45 y Figura 46), en el presente, el año 1982 se tiene sequías moderadas y ligeras en los meses de febrero a noviembre en las tres escalas, siendo las sequías extremas en febrero en SPI 3, en julio en SPI 6, y en agosto y noviembre en SPI 12. En el año 1985 de enero a marzo se tiene sequías moderadas y ligeras en las tres escalas siendo una sequía extrema en el mes de enero en SPI 12. En el año 1991 de enero a diciembre en SPI 12 se presenta sequías moderadas y ligeras; en SPI 3 en los meses de marzo y octubre sequías extremas, y en junio en SPI 6 del mismo año. Finalmente en el año 1995 de mayo a octubre se tiene sequías ligeras en SPI 12, sequías ligeras y moderadas en SPI 6 y 3. Para el futuro cercano P2, en el año 2021 de febrero a diciembre en SPI 12, predomina la sequía ligera. N 2022 se presentaría una sequía extrema en el mes de octubre (SPI 6). En el año 2029 de abril a octubre sequías entre ligeras y moderadas en las tres escalas del SPI, así como en el año 2033 en todos los meses excepto diciembre. En abril y marzo del año 2036 se tiene sequías extremas en SPI 6, seguidas de moderadas hasta junio. En cambio de marzo a noviembre se tiene sequías moderadas en SPI 12. Para el futuro cercano P4, el año 2024 se tiene sequías moderadas en su mayoría y sequías ligeras en SPI 12, e son sequías moderadas, en octubre y diciembre son sequías ligeras en SPI 3; en el mes de mayo - octubre y diciembre son sequías ligeras en SPI 6, así como en los meses de enero y abril son sequías moderadas y en marzo es una sequía extrema. En el año 2027 se tiene sequías ligeras de enero a noviembre, siendo los últimos tres meses de sequías moderadas en SPI 12, en SPI 6 se aprecia que el mes de abril se tiene una sequía extrema, los otros meses con sequías moderadas y ligeras, en SPI 3 los

meses de enero a abril se tiene sequías ligeras. En el año 2035 se tiene sequias ligeras en los meses de abril a diciembre en SPI 12, y se tiene sequías extremas en los meses de junio y septiembre en SPI 3 y 6, respectivamente. Para el futuro lejano P2, se observa que el año 2081 en los meses de marzo a noviembre se tiene sequias ligeras, con una sequía extrema en el mes de diciembre en SPI 12, siendo moderada para las otras dos escalas. En el año 2085 de mayo a octubre se tiene sequías moderadas y ligeras en SPI 12, en el año 2096 de marzo a octubre se tiene sequias moderadas en predominancia, con sequía extrema en el mes de mayo en SPI 6, y moderadas en SPI 3 en los mes de mayo y junio. También se tiene el año 2098 de junio a octubre en las tres escalas con sequías moderadas y ligeras, en el mes de diciembre de 2099 se tiene sequía ligera en las tres escalas. Para el futuro lejano P4, el año 2086 en el mes de diciembre se tiene sequías extremas en SPI 3 y 6; el año 2087 de enero a octubre se tiene sequias moderadas en SPI 12. En el año 2092 se presentaría una sequía extrema en el mes de enero en las tres escalas, de febrero a septiembre sequías ligera en SPI 12. También en el año 2094 se tiene sequías extremas en los meses de abril en SPI 3, en los meses de agosto y septiembre en SPI 6, y sequías ligeras de abril, agosto a diciembre en SPI 12. En el año 2096, en los meses de febrero a diciembre se tiene sequías ligeras y moderadas entre los meses en las tres escalas. Finalmente, en el año 2097 de marzo a noviembre se tiene sequías ligeras en SPI 12.

La estación Yantac representa la cuarta zona, se observa la Figura 47 y Figura 48, donde se aprecia las escalas de SPI, se tiene en el tiempo presente en el año 1985 en el mes de enero una sequía extrema en SPI 3 y moderada en SPI 6, los meses de febrero, marzo y diciembre se tiene una sequía ligera en las tres escalas del SPI. En el año 1987 en junio se presenta una sequía extrema en SPI 3, en agosto y septiembre en SPI 6, y de junio a diciembre sequías ligeras en SPI 12; en el año 1990 en abril se presenta una sequía extrema en SPI 3; y en el año 1992 en los meses de enero a junio y diciembre, se presentan sequias ligeras y moderadas en las tres escalas del SPI. Para el futuro cercano P2, que el año 2026 se presentan sequias ligera en SPI 12, siendo coincidente en las tres escalas el mes de febrero con una sequía moderada. En el año 2029, se tiene esas sequias moderadas y ligeras en las tres escalas del SPI, siendo sequías extremas los meses de noviembre y diciembre junto con enero del año 2030 en SPI 12, posteriormente el resto de meses de este año son sequías ligeras y moderadas. Para el futuro cercano P4, se tiene sequías extremas en el año 2024 en las tres escalas en los meses de enero a mayo; en el año 2030 los meses de mayo y junio presentan sequía extrema los SPI 3 y 6. Además, el año 2035 presenta en

los meses de marzo a diciembre sequías ligeras y moderadas en las tres escalas del SPI, y en los meses de junio, agosto y septiembre sequias extremas en SPI 3 y 6 respectivamente, y de octubre a diciembre se presenta sequias moderadas en SPI 12. Para el futuro lejano P2, en el año 2081 y 2092, se presenta sequías ligeras y moderadas en las tres escalas del SPI. En el año 2098 se tiene de enero a junio sequía ligera y moderada en SPI 3, con una sequía extrema en abril; en SPI 6 se tiene sequías ligeras y moderadas, en los meses de abril y junio se tiene sequías extremas; sin embargo en SPI 12, se tiene desde marzo a octubre sequías extremas. Para el futuro lejano P4, en diciembre d 2088 se tiene una sequía extrema en SPI 3. En el año 2094 se tiene sequías ligeras y moderadas de abril a diciembre en las tres escalas del SPI, en mayo a julio son sequías extremas en SPI 3, de junio a noviembre en SPI 6, y de octubre a diciembre en SPI 12. En el año 2095 se tiene sequías ligeras en SPI 12. En el año 2096 se tiene sequias moderadas en los meses de febrero y marzo en SPI 3, y en los meses de enero a junio en SPI 6, y sequías moderadas en su mayoría y ligeras en los meses enero a septiembre en SPI 12, con una sequía extrema en marzo.

En el periodo presente, las sequias extremas en la primera zona fueron en el año 1985, en la segunda zona en el año 1992, en la tercera zona los años 1985 en la época húmeda, el año 1991 y en 1995 en la época seca en las tres escalas del SPI se presentan sequias ligeras y moderadas. En la cuarta zona las sequias extremas se presentaron en el año 1985 y 1987 en SPI 3 y 6, y en el SPI 12 no presenta sequias extremas en esta región, solo moderadas y ligeras. Para el futuro cercano, se tendría en la primera zona, en P2, los años 2029 y 2036, sequias ligeras; el año 2027 y 2032 una sequía ligera para P4. En la segunda zona, se tiene una sequía moderada en el año 2036 en P2, y en P4 en el año 2027. En la tercera zona, en P2 se tendría sequia moderada en los años 2033 y 2036, en P4 en el año 2027, una sequía ligera. En la cuarta zona, en P2, los años 2029 y 2030, sequia ligera y moderada, respectivamente. En P4 una sequía extrema en el año 2024 y en el año 2035 sequía extrema y moderada. Para el futuro lejano, se tendría en la primera zona los años 2091 y 2092 una sequía ligera para P2 y P4, y en el año 2099 una sequía ligera por P2. En la segunda zona, se tiene una sequía moderada en el año 2089 en P2, y en P4 en el año 2092 con sequía extrema también. En la tercera zona, en P2 se tendría sequia moderada en los años 2096 y 2098, en P4 en el año 2092, una sequía extrema y sequia ligera en el año 2096. En la cuarta zona, en P2, los años 2081, 2092 y 2098, sequia ligera, moderada y extrema,

respectivamente, en la época seca. En P4 una sequía extrema en el segundo semestre del año 2094 y en el primer semestre del año 2096 sequía moderada.

Así como se ha podido observar los resultados de sequía, también se puede apreciar las temporadas más lluviosas que se obtendrían en la cuenca, en las Figura 41 hasta la Figura 48, se tiene que en cada estación representativa de cada zona, un aumento de la precipitación teniendo una magnitud de ligera, moderada y extremadamente lluvioso. En la primera zona, en el presente se tiene que el año 1987, 1990 a 1992 se tiene que es ligeramente lluvioso, y los años de 1998 y principios de 1999 son extremadamente lluviosos. Para el futuro cercano en P2 se tendría los años 2021 y 2022 extremadamente lluviosos, y en SPI 3 y SPI 6 el año 2030 y en los tres SPI, los años 2038 y principios del 2039 extremadamente lluviosos; y en P4 el año 2028, finales del 2033 y principios del 2034 serían extremadamente lluviosos. Para el futuro lejano, en P2 se tendría los años 2094 y 2095 extremadamente lluviosos y el año 2097 sería moderadamente lluvioso.

En la segunda zona, se tiene en el presente los años 1983 y 1984 temporadas con ligera y moderada lluvia, y los años 1989, 1991 y 1995 se presentan en SPI 3 y SPI 6, y en 1998 se tiene que es moderada y extrema lluvioso. En el futuro cercano, en P2 los años 2024, 2025, finales de 2027 y 2028 presentan temporadas lluviosas ligeras y moderadas, en el 2029 y 2030 se presentan temporadas lluviosas ligeras y moderadas en SPI 3 y SPI 6, y en el año 2034 se presenta lluvias moderadas en los tres SPI. Además, en los años 2037 y 2038 se tiene lluvias moderadas y extremas en meses de época seca. En P4, el año 2028 se tiene temporadas lluviosas moderadas y extremas y en el 2034 sería lluvioso extremo. En el futuro lejano, los años 2083 y 2084 se tiene temporadas lluviosas moderadas y en 2087 es moderada la lluvia en SPI 3 y SPI 6, en 2094 es moderada la lluvia solo en SPI 3. En P4 se tendría en el año 2083 y 2093 lluvias extremas y moderadas, respectivamente; en el 2088 y 2093 sería lluvias extremas y moderadas, en SPI 3 y SPI 6; también los años 2097 en SPI 3 y 2098 en SPI 6 serían ligeramente lluviosos.

En la tercera zona, en el presente se tuvo los años 1983, 1986 y 1998 temporadas de lluvias extremas; para el futuro cercano en P2, los años 2023, 2024, 2030, 2034 y 2038 se presentaría lluvias ligeras y moderadas en diversas épocas del año, tanto en época seca como húmeda, y en P4 en el año 2025 sería lluvia moderada, en el 2034 lluvia extrema y en el 2039 lluvia ligera en los tres SPI. En el futuro lejano, en P2 en el año 2094 serían lluvias extremas, en el 2097 en SPI 3 y 6, lluvias moderadas y en SPI 12 lluvia ligera, y en

el 2084, sería ligera y moderada. En P4, el año 2083 y 2095, lluvias ligeras; y el año 2099, lluvia moderada.

En la cuarta zona, se tiene en el periodo presente en los años 1980 y 1981, hasta el mes de noviembre, se presentó lluvias moderadas, y desde noviembre de 1997 a abril de 1999, se tuvo lluvias moderadas, y desde mayo de 1969, lluvias extremas. Para el futuro cercano, en P2, en el año 2027 y 2031 (SPI 12) se tendría unas lluvias ligeras, y en el 2023 y 2028 se presentaría lluvias moderadas, y en el año 2035 (SPI 3 y 6) serían lluvias moderadas. Para P4, los años 2023 y 2028 serían lluvias ligeras, en el 2026 moderadas y extremas, y los años del 2038 y 2039, lluvias moderadas. Para el futuro lejano, en P2, el año 2087, lluvia moderada, en el 2094, lluvia extrema y los años 2090, 2091, 2098 y 2099 serían lluvias moderadas y extremas en SPI 3 y 6. Para P4, los años 2087, 2088, 2090 y 2091 serían lluvias ligeras y moderadas, y los años 2098 y 2099 presentarían lluvias moderadas y extremas. Se tendría en común años similares entre el futuro cercano y lejano en las cuatro zonas que nos indican la intensidad de lluvias (ligeras, moderadas y extremas), sobre todo para finales del siglo XXI.

Con respecto a la frecuencia, magnitud e intensidad de la sequía se tiene para las cuatro zonas, desde la Tabla 10 a la Tabla 21; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.:**

La primera zona (Tabla 10 - Tabla 12), representada por la estación Huayan, en SPI 3, se tiene que para el periodo presente una sequía ligera que representan el 84%, con un intensidad promedio de -1.19 y se presentan solo una sequía extrema que representa el 3.2% con un intensidad promedio de -2.7; para el futuro cercano solo se presentan sequias ligeras para P2 y el 86.4% de sequias ligeras en P4, con una sequía moderada de -1.73. Para el futuro lejano, en P2 se presentaría solo dos tipos de sequias, ligera y moderada, la primera presenta una magnitud del 81% con una intensidad promedio de -1.18 y la segunda con 19% con una intensidad de -1.69. Para P4 si se presenta la sequía ligera, moderada y extrema, siendo mayor la sequía ligera con un 77.8% e intensidad promedio de -1.20 y se presentaría solo una sequía extrema que representa el 3.7% con un intensidad promedio de -2.1. En SPI 6, se tiene el presente predominan la sequía ligera y extrema con un 40.7% y un 33.3%, con intensidades de -1.29 y -2.51, respectivamente. Para el futuro P2, se presenta solo sequia ligera con una intensidad de -1.19, y para P4 se tiene dos tipos de sequía, ligera y moderada, siendo la magnitud de 96.2% y 3.8%, con intensidades de -1.18 y -1.53, respectivamente. Para el futuro lejano, en P2 y P4 se presentan los tres tipos de

sequía, ligera, moderada y extrema, presentando un mayor porcentaje en la sequía ligera de un 80%, y la intensidad promedio de -1.18 en P2 y -1.23 en P4, las intensidades para la sequía extrema es -2.9 y -3.7, respectivamente para P2 y P4. En SPI 12, se tiene en el periodo presente, las siguientes magnitudes 33.3% para la sequía ligera, 29.2% sequía moderada y 37.5% sequía extrema, con las intensidades de -1.21, -1.71 y -2.69, respectivamente. Para un futuro cercano P2 y P4 presentan solo la sequía ligera con 23 y 19 eventos, de intensidades de -1.25 y -1.1, respectivamente. Para el futuro lejano se presentaron dos tipos de sequía, la ligera y moderada; en P2 se tiene un 62% con la intensidad de -1.26 en sequia ligera, y un 38% con la intensidad de -1.7; en P4 se tiene un 93.3% con la intensidad de -1.27 en sequia ligera, y un 6.7% con la intensidad de -1.61.

La segunda zona (Tabla 13 - Tabla 15), representada por la estación Pallac, se tiene que el presente para el SPI 3, igual número de eventos de la sequía ligera y moderada, representando ambas un 35.7%, con intensidades promedios de -1.2 y -2.52. Para el futuro cercano, en P2, se tendría un 64% de sequía ligera con la intensidad promedio de -1.3 y con cinco eventos de sequía extrema (14%) con intensidad promedio de -2.27; en P4 se tiene solo dos tipos de sequía, ligera y moderada, con un 75% y 25%, con intensidad promedio de -1.28 y -1.70, respectivamente. Para el futuro lejano en P2 y P4 se presentan los tres tipos de sequía, y se tiene mayor número de eventos en la sequía ligera con un 70% y 60%, con la misma intensidad promedio de -1.24, y la sequía extrema en P2 presenta una intensidad promedio mayor que en P4 de -2.63, y en P4 de -2.36. Para el SPI 6, se tiene en el presente un 50 % de sequía ligera con una intensidad promedio de -1.18, y la sequía extrema con 33.3% con la intensidad promedio de -2.5. Para el futuro cercano, en P2 y P4, se presenta los tres tipos de sequía, siendo la sequía ligera con un mayor número de eventos, de un 67% y 63%, con una intensidad promedio de -1.22 y -1.2, en P2 presenta 3 eventos de sequía extrema y en L4 solo uno, las intensidades promedio son -2.31 y -2.11, respectivamente. Para el futuro lejano, se presenta los tres tipos de sequía, el mayor porcentaje en la sequía ligera de 66% y 56% con una intensidad promedio de -1.23, la intensidad promedio de la sequía extrema en P2 es de -2.7 en comparación con la de p4 que es de -2.44. En SPI 12, para el presente se tiene 13 eventos de una magnitud de sequía ligera (48.1%), 2 de magnitud de sequía moderada (7.4%) y 12 de magnitud de sequía extrema (44.4%), con intensidad promedio -1.23, -1.68 y -2.58, respectivamente. Para el futuro cercano, en P2 se presenta los tres tipos de sequía, siendo la sequía ligera la de mayor eventos con un 53.2% y una intensidad promedio de -1.27; en P4 se presentaría dos

magnitudes de sequía, siendo mayor la sequía moderada con 66.7% con una intensidad promedio -1.81. Para el futuro lejano, en P2 y P4 se presenta las tres magnitudes de sequía, para P2 el mayor número de eventos se presentaría en la sequía ligera (53.3%) con una intensidad promedio de -1.23, pero en P4 en la sequía moderada (54.5%) y una intensidad promedio de -1.73.

Tercera zona (Tabla 16 - Tabla 18), representada por la estación pluviométrica Santa Cruz, en SPI3, para el periodo presente se tuvo las tres sequias, teniendo un mayor porcentaje de 57.6%, la sequía ligera, seguida de la sequía moderada con un 33.3% y la sequía extrema de un 9.1%, las intensidades promedio de -1.16, -1.67 y -2.51. Para el futuro cercano en P2 y P4 se presenta las tres sequías, siendo mayor en ambos la sequía ligera, ambos con un 62%, con intensidades promedio de -1.30 y -1.27. Para el futuro lejano, para P2 y P4, se presenta mayores eventos en la sequía ligera, y en p4 se tiene 8 eventos de sequía extrema con una intensidad promedio de -2.40. En SPI 6, se presentó para el periodo presente, mayor cantidad de eventos de una sequía ligera con un 56.1%. Para el futuro cercano, en P2 se presentaría un 73.3% de sequía ligera y en P4 de 56.4%, para la sequía moderada se tiene mayor intensidad promedio en P2 de -1.82 que en P4 de -1.64, pero en la sequía extrema en P2 es de -2.12 y en P4 de -2.29. Para el futuro lejano, tanto para P2 y P4 se presentaría mayor número de eventos en una sequía ligera, en la sequía extrema se tiene una mayor intensidad den P4 que en P2, siendo estos de -2.45 y -2.16. Para SPI 12, en el presente se presentó mayores eventos para la sequía moderada con una intensidad promedio de -1.81 (48.6%). Para el futuro cercano, en ambos P2 y P4 se tiene solo dos tipos de sequía, ligera y moderada; presentando en ambos mayor porcentaje en la sequía ligera con la misma intensidad promedio de -1.26. Para el futuro lejano, se presenta los tres tipos de sequía para ambos productos y presentarían solo un evento en la sequía extrema; la sequía ligera para P2 tiene un 58.5% y en P4 un 68.9%, las intensidades promedio son -1.20 y -1.23, la sequía extrema es mayor en P4 con la intensidad de -2.28 y en P2 con -2.03.

En la cuarta zona (Tabla 19 - Tabla 21), representada por la estación Yantac. En SPI 3, se tiene una magnitud mayor de sequía ligera con respecto a las otras dos tipos de sequía, con la intensidad promedio de -1.33 y 6 eventos de sequía extrema con la intensidad promedio de -2.51. Para el futuro cercano en P2 y P4 se presenta mayor porcentaje y magnitud en la sequía ligera, aproximadamente el 55%. En cambio para el futuro lejano, se tiene que en

P2 una mayor magnitud de un 70.5% de sequía ligera y P4 de 51.3%, con intensidad promedio de -1.22 y -1.23, respectivamente; la sequía extrema tendría una intensidad promedio de -2.34 en P4 y en P2 de -2.19., con mayor número de eventos en P4 de 6 en total. En SPI 6, se presenta mayor magnitud en la sequía ligera del 73% con una intensidad promedio de -1.24 y una sequía extrema con una intensidad promedio de -2.37. Para el futuro cercano, en P2 presentaría una mayor magnitud de sequía ligera (65.1%), en P4 se tiene mayores magnitudes para la sequía ligera y extrema de un 47.2% y 3.0.6% con intensidades promedio de -1.17 y -2.30. Para el futuro lejano en ambos productos se presenta los tres tipos de sequía, siendo la de mayor magnitud la sequía ligera, la sequía extrema tiene mayor magnitud en P4 con una intensidad promedio de -2.39 y en P2 es de -2.27. En el SPI 12, en el periodo presente solo se presenta dos tipos de sequía, ligera y moderada, con mayor magnitud la primera (94.1%) con una intensidad promedio de -1.24. Para el futuro cercano, en P2 y P4 se tiene los tres tipos de sequias, en P2 un 75.6% de sequía ligera y en P4 de 43.8%, en la sequía extrema se presenta mayor magnitud en P4, pero la intensidad promedio es mayor en P2 con -2.29 y en P4 con -2.15. Para el futuro lejano, se presenta mayor magnitud o número de eventos en la sequía ligera en ambos, en P4 se tiene que la sequía moderada es de 36.4% y la sequía extrema tiene una intensidad promedio de -2.22 y en P2 la sequía extrema tiene una intensidad promedio de -2.29.

Los resultados del índice SPI de 3 meses se caracterizaron por una gran frecuencia en cortos periodos de tiempo e intensidad variable. El análisis realizado se consideraría oportuno para la zona de estudio en el futuro debido a que se puede relacionar el efecto de la sequía con la agricultura, pero se ha de tener en cuenta que estas sequias son de magnitud ligeras, presentando en frecuencia más del 50%.

Los resultados para un SPI de 6 meses, es más variado con respecto a cada zona, debido a que no se presentan una uniformidad en toda la cuenca, en la primera zona se tiene una mayor frecuencia de sequía ligera, para el futuro cercano en P2 y P4 no se presentaría una magnitud de sequias extrema, para la segunda zona se presenta una magnitud de sequía ligera mayor del 50%, pero una sequía extrema menor del 10%, en la tercera y cuarta zona se presenta sequia ligera alrededor del 50% y las sequías extremas mayores del 10%.

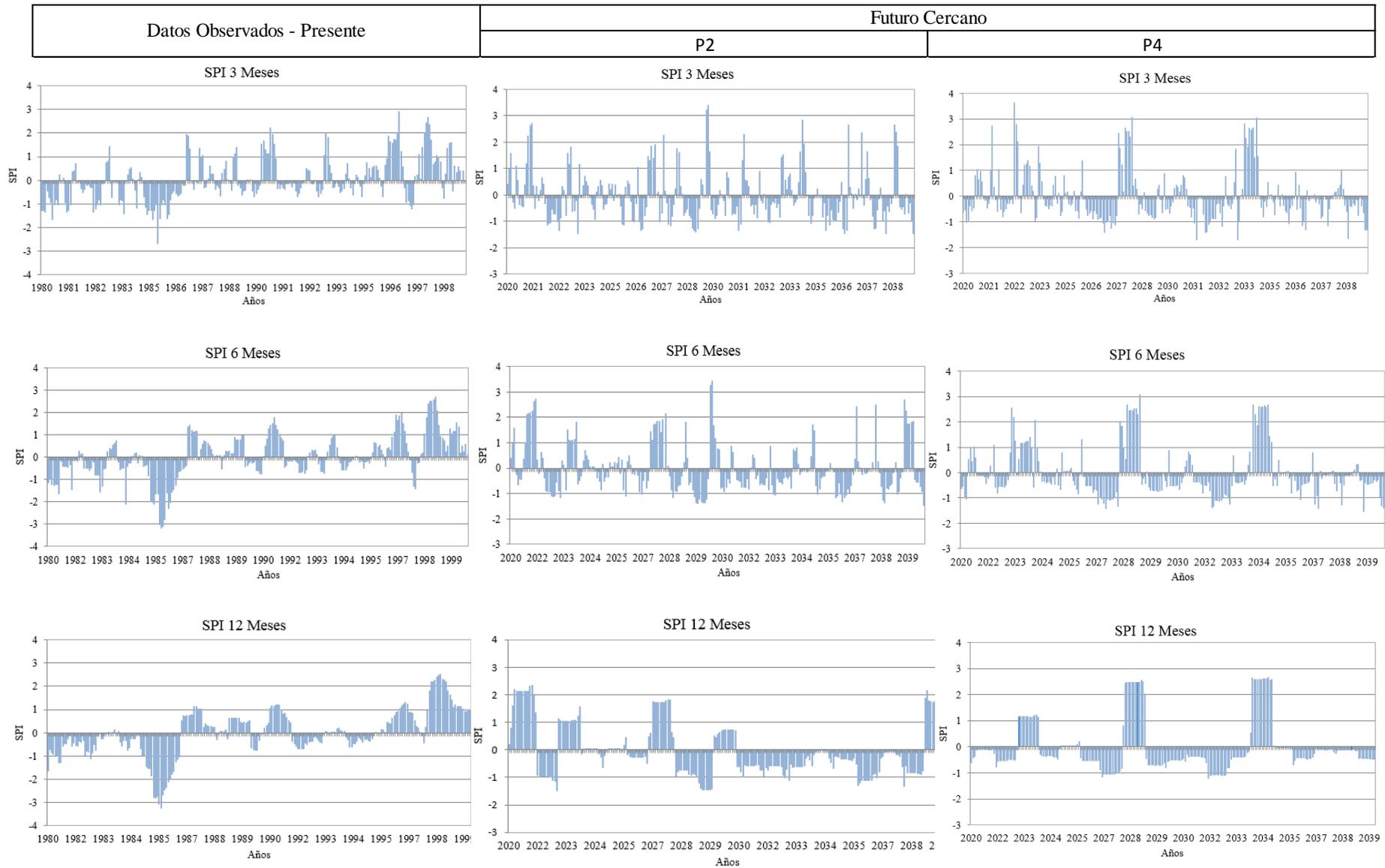


Figura 41. Evolución del índice de precipitación estandarizada (SPI) de 3, 6 y 12 meses en la estación pluviométrica Huayan. Periodo presente: 1980-1999 y futuro cercano (2020-2039).

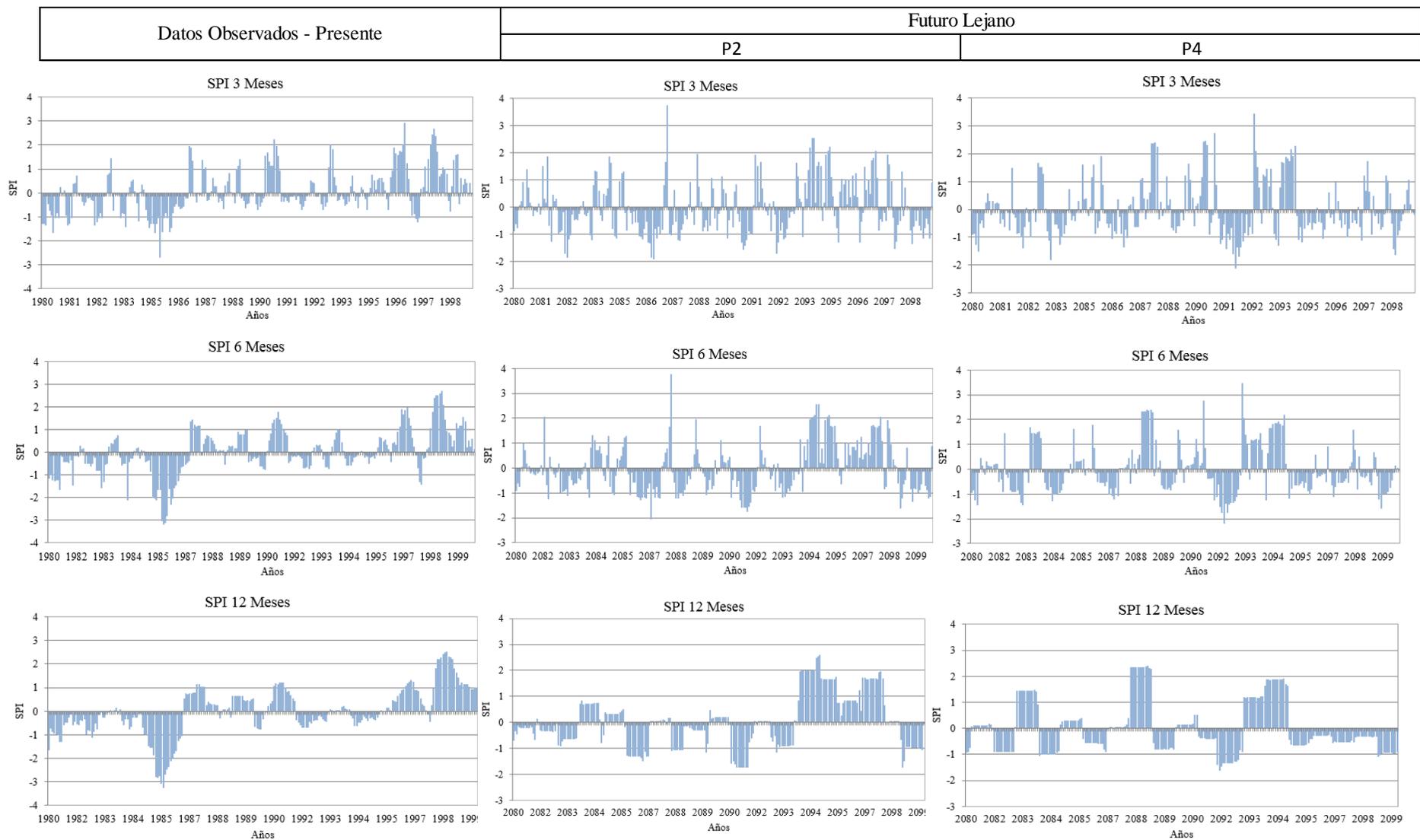


Figura 42. Evolución del índice de precipitación estandarizada (SPI) de 3, 6 y 12 meses en la estación pluviométrica Huayan. Periodo presente: 1980-1999 y futuro cercano (2080-2099).

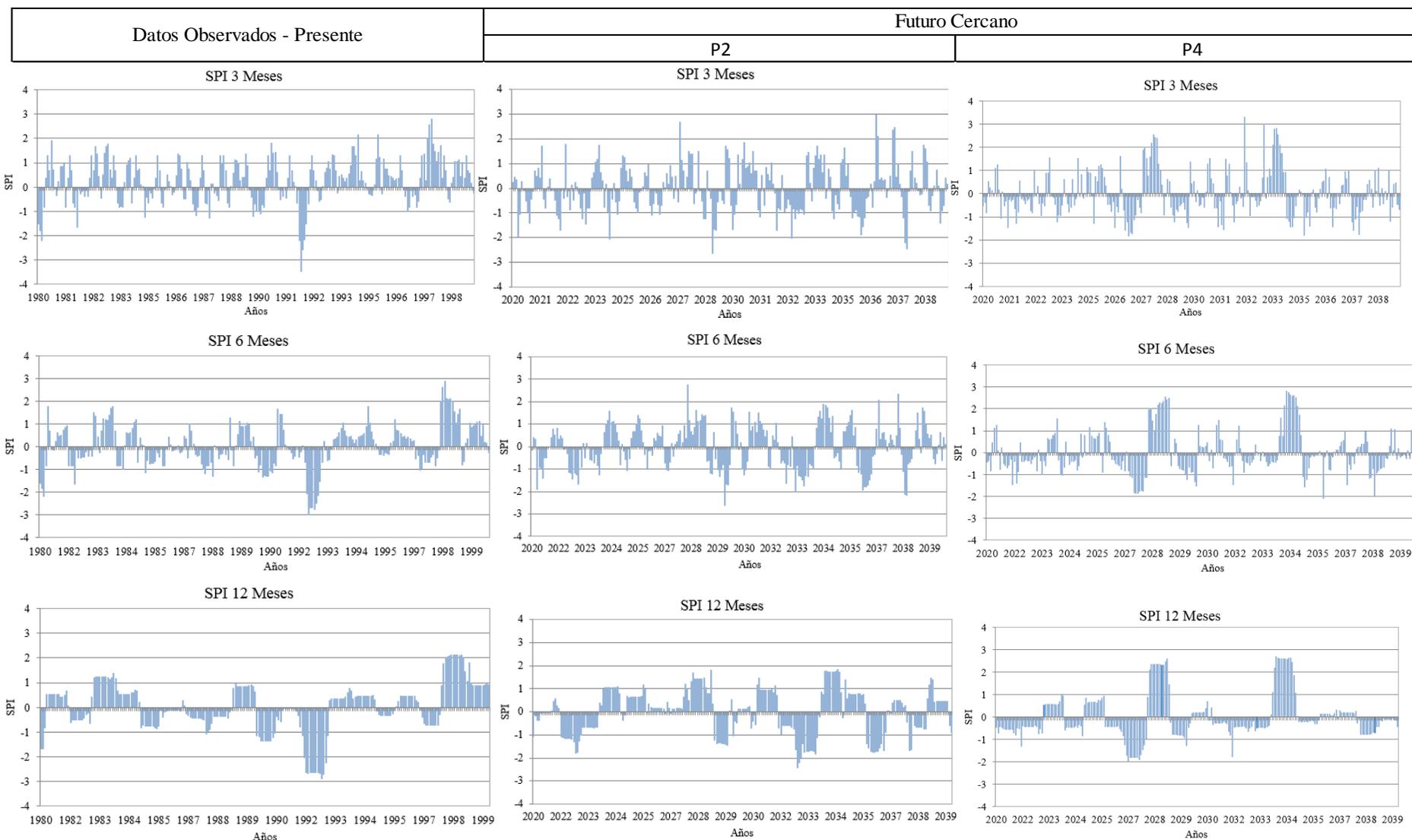


Figura 43. Evolución del índice de precipitación estandarizada (SPI) de 3, 6 y 12 meses en la estación pluviométrica Pallac. Periodo presente: 1980-1999 y futuro cercano (2020-2039).

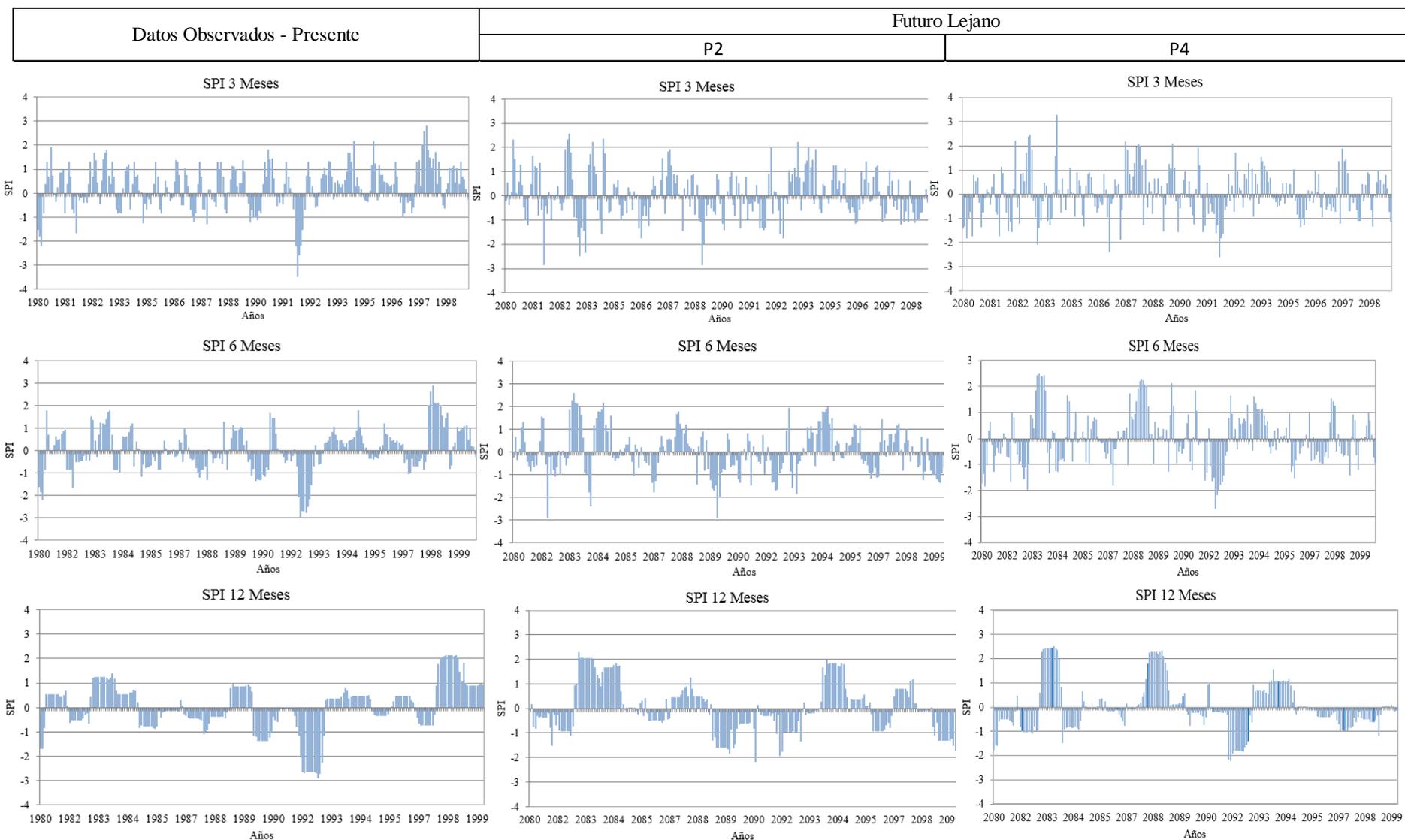


Figura 44. Evolución del índice de precipitación estandarizada (SPI) de 3, 6 y 12 meses en la estación pluviométrica Pallac. Periodo presente: 1980-1999 y futuro cercano (2020-2099).

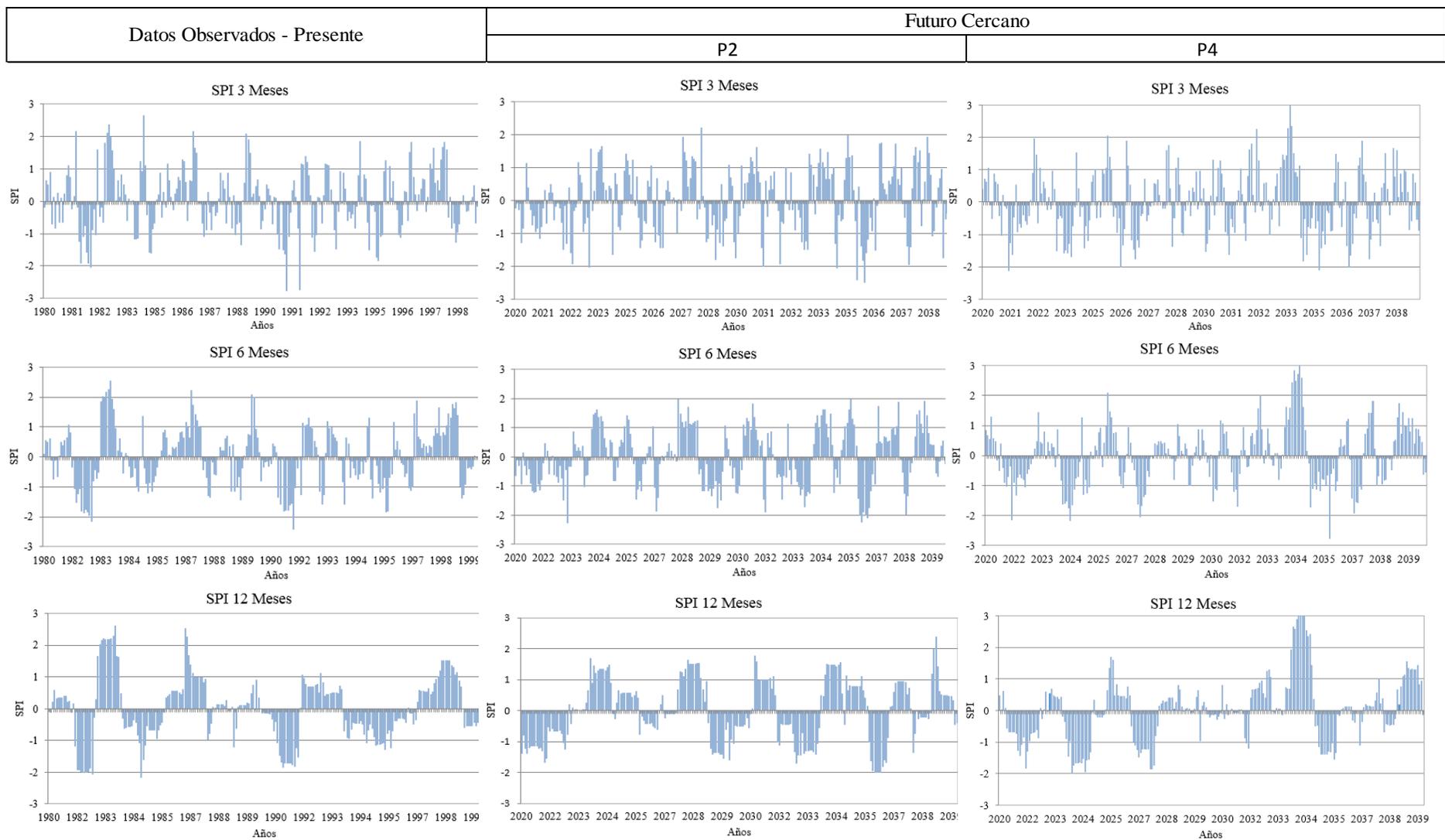


Figura 45. Evolución del índice de precipitación estandarizada (SPI) de 3, 6 y 12 meses en la estación pluviométrica Santa Cruz. Periodo presente: 1980-1999 y futuro cercano (2020-2039).

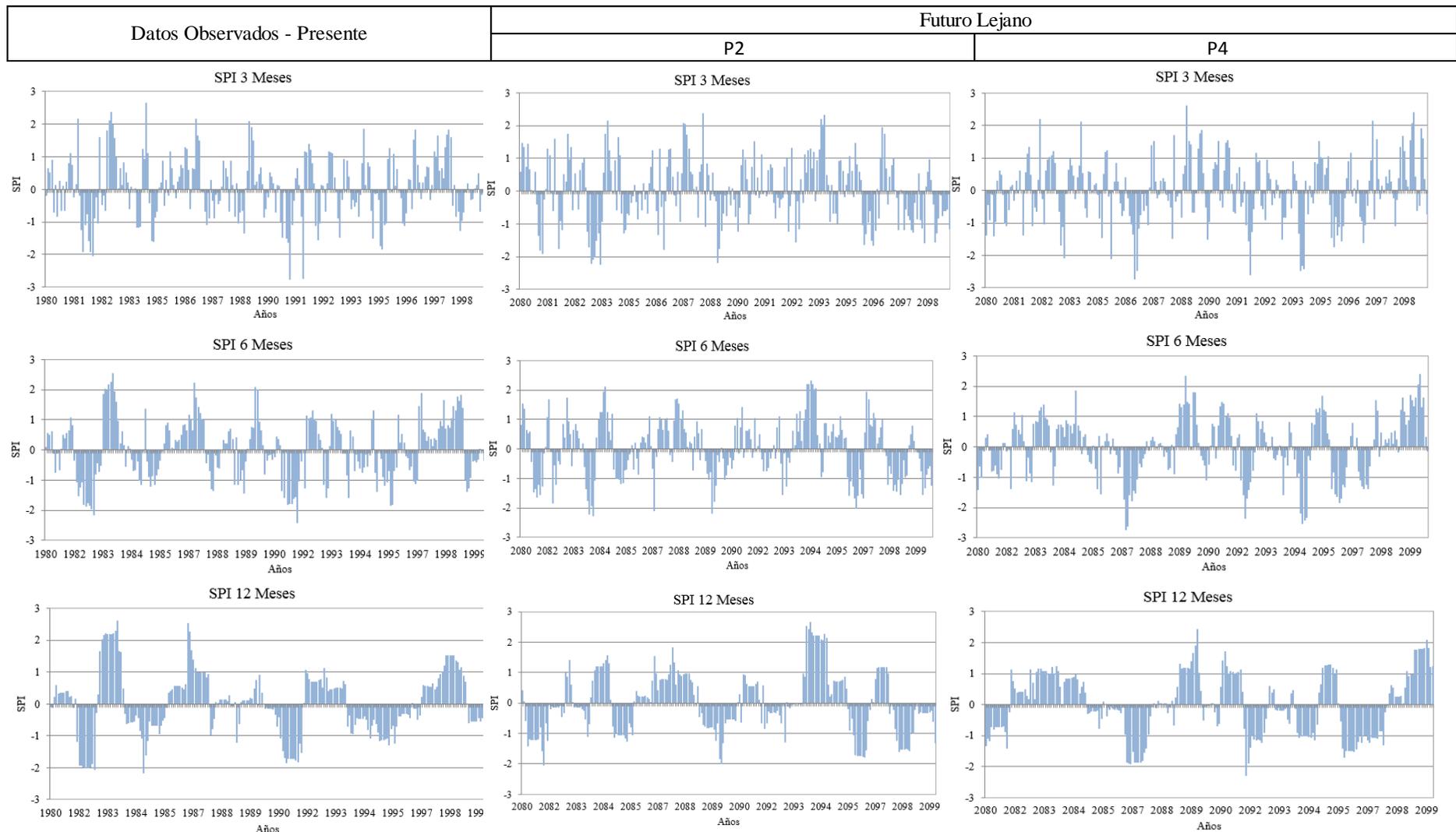


Figura 46. Evolución del índice de precipitación estandarizada (SPI) de 3, 6 y 12 meses en la estación pluviométrica Santa Cruz. Periodo presente: 1980-1999 y futuro cercano (2020-2099).

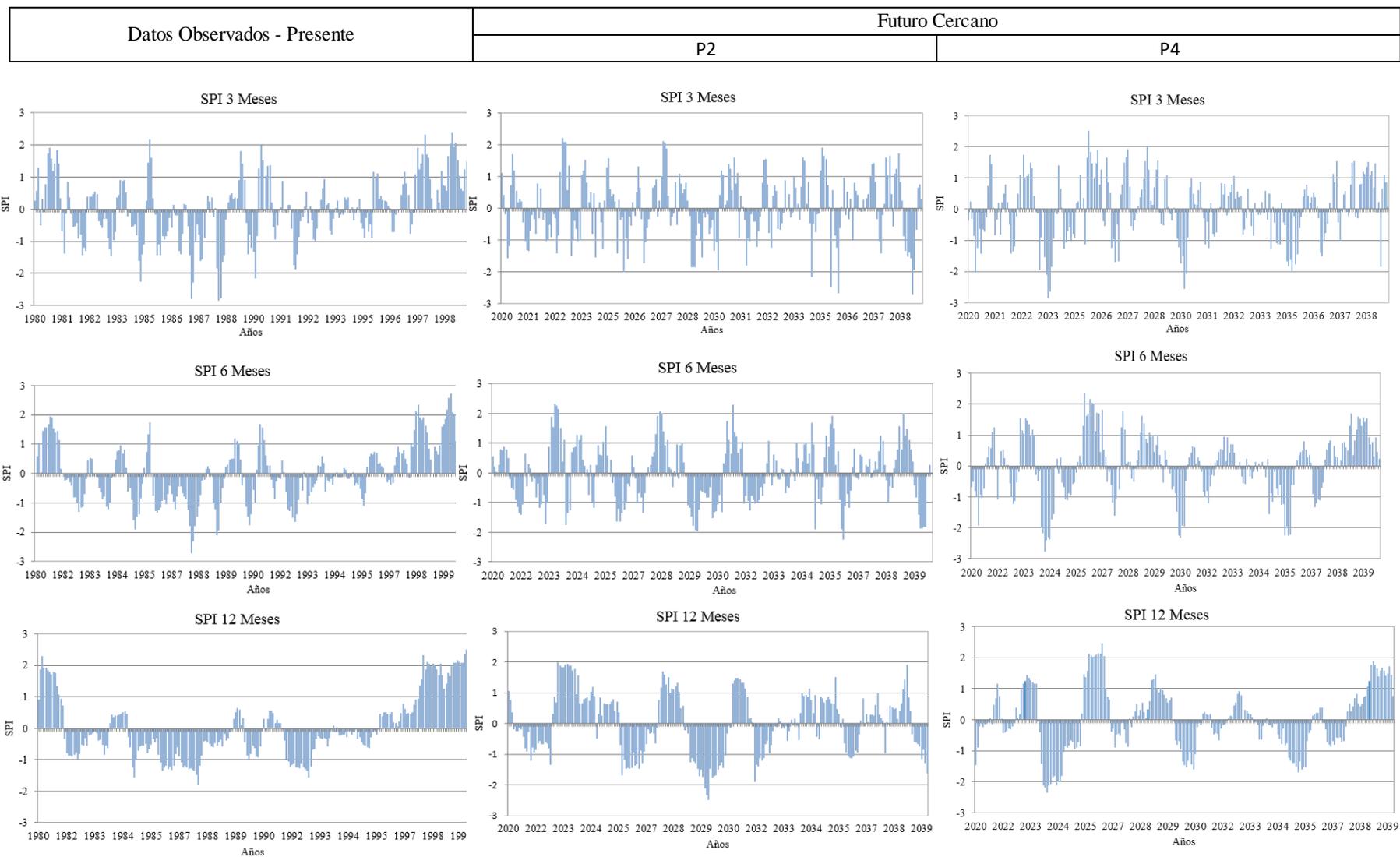


Figura 47. Evolución del índice de precipitación estandarizada (SPI) de 3, 6 y 12 meses en la estación pluviométrica Yantac. Periodo presente: 1980-1999 y futuro cercano (2020-2039).

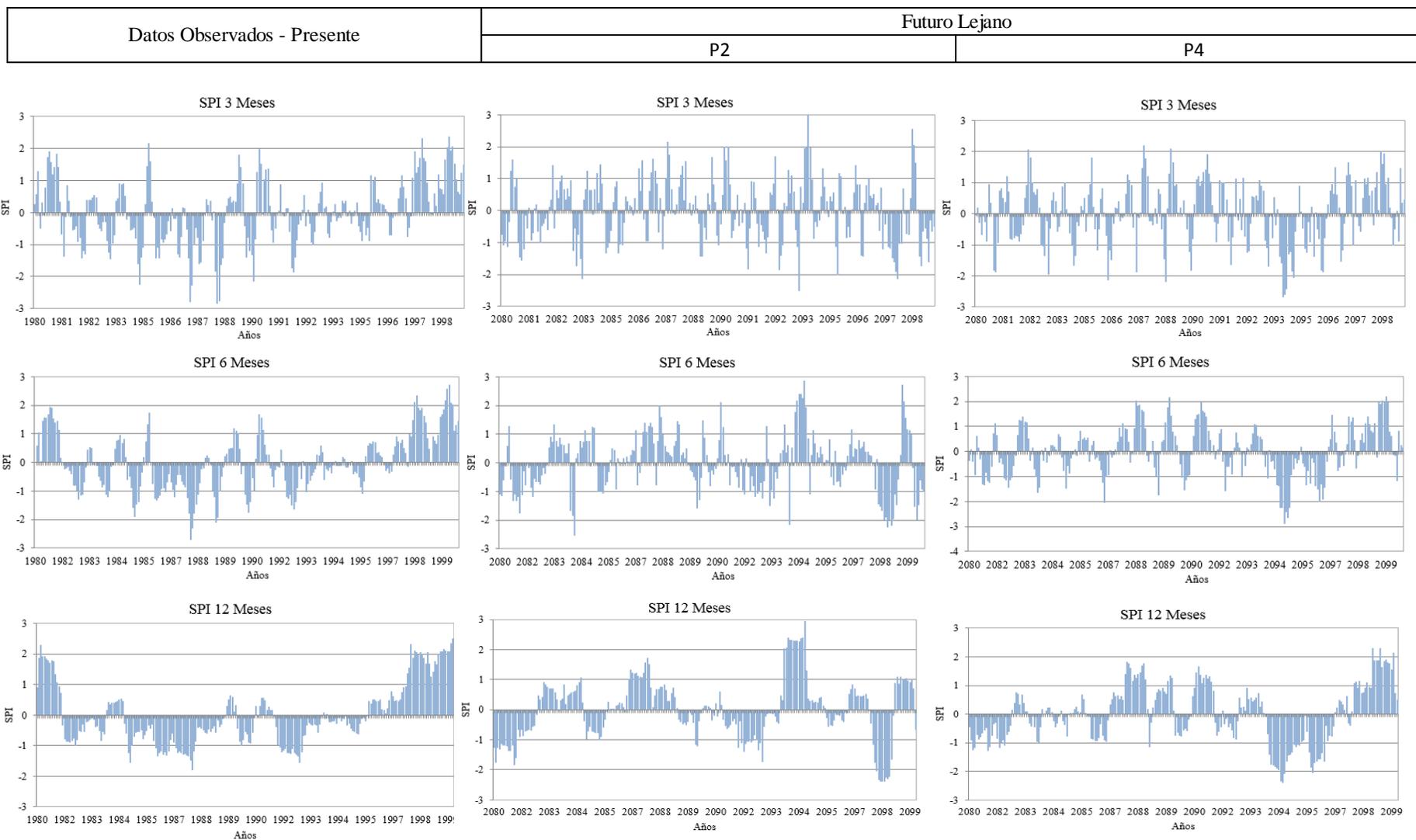


Figura 48. Evolución del índice de precipitación estandarizada (SPI) de 3, 6 y 12 meses en la estación pluviométrica Yantac. Periodo presente: 1980-1999 y futuro cercano (2020-2099).

Tabla 10. Frecuencia de ocurrencia de sequias según su magnitud periodo presente y futuro en la primera zona representada por la estación de Huayan en SPI 3 meses

Estación Huayan - SPI 3 MESES														
Periodo		Modelo	Magnitud				Intesidad Promedio				Frecuencia			
			Sequia Ligera (-1a -1.5)	Sequia Moderada (-1.5 a -2)	Sequia Extrema (<-2)	Total	Sequia Ligera (-1a -1.5)	Sequia Moderada (-1.5 a -2)	Sequia Extrema (<-2)	Total	Sequia Ligera (-1a -1.5)	Sequia Moderada (-1.5 a -2)	Sequia Extrema (<-2)	Total
Presente	1980 - 1999	Po	27	4	1	32	-1.19	-1.64	-2.7	-1.3	84.4	12.5	3.1	100%
Futuro Cercano	2020 - 2039	P2	33	0	0	33	-1.23	0	0	-1.23	100	0	0	100%
		P4	19	3	0	22	-1.18	-1.69	0	-1.25	86.4	13.6	0.0	100%
Futuro Lejano	2080 - 2099	P2	30	7	0	37	-1.23	0	0	-1.28	81.1	18.9	0.0	100%
		P4	21	5	1	27	-1.2	-1.64	-2.1	-1.32	77.8	18.5	3.7	100%

Tabla 11. Frecuencia de ocurrencia de sequias según su magnitud periodo presente y futuro en la primera zona representada por la estación de Huayan en SPI 6 meses.

Estación Huayan - SPI 6 MESES														
Periodo		Modelo	Magnitud				Intesidad Promedio				Frecuencia			
			Sequia Ligera (-1a -1.5)	Sequia Moderada (-1.5 a -2)	Sequia Extrema (<-2)	Total	Sequia Ligera (-1a -1.5)	Sequia Moderada (-1.5 a -2)	Sequia Extrema (<-2)	Total	Sequia Ligera (-1a -1.5)	Sequia Moderada (-1.5 a -2)	Sequia Extrema (<-2)	Total
Presente	1980 - 1999	Po	11	7	9	27	-1.29	-1.67	-2.51	-1.8	40.7	25.9	33.3	100%
Futuro Cercano	2020 - 2039	P2	28	0	0	28	-1.19	0	0	-1.19	100.0	0.0	0.0	100%
		P4	25	1	0	26	-1.18	-1.53	0	-1.2	96.2	3.8	0.0	100%
Futuro Lejano	2080 - 2099	P2	28	6	1	35	-1.18	-1.6	-2.05	-1.27	80.0	17.1	2.9	100%
		P4	22	4	1	27	-1.23	-1.64	-2.19	-1.32	81.5	14.8	3.7	100%

Tabla 12. Frecuencia de ocurrencia de sequias según su magnitud periodo presente y futuro en la primera zona representada por la estación de Huayan en SPI 12 meses.

Estación Huayan - SPI 12 MESES														
Periodo		Modelo	Magnitud				Intesidad Promedio				Frecuencia			
			Sequia Ligera (-1a -1.5)	Sequia Moderada (-1.5 a -2)	Sequia Extrema (<-2)	Total	Sequia Ligera (-1a -1.5)	Sequia Moderada (-1.5 a -2)	Sequia Extrema (<-2)	Total	Sequia Ligera (-1a -1.5)	Sequia Moderada (-1.5 a -2)	Sequia Extrema (<-2)	Total
Presente	1980 - 1999	Po	8	7	9	24	-1.21	-1.71	-2.69	-1.91	33.3	29.2	37.5	100%
Futuro Cercano	2020 - 2039	P2	23	0	0	23	-1.25	0	0	-1.25	100.0	0.0	0.0	100%
		P4	19	0	0	19	-1.1	0	0	-1.1	100.0	0.0	0.0	100%
Futuro Lejano	2080 - 2099	P2	16	10	0	26	-1.26	-1.7	0	-1.23	61.5	38.5	0.0	100%
		P4	14	1	0	15	-1.27	-1.61	0	-1.29	93.3	6.7	0.0	100%

Tabla 13. Frecuencia de ocurrencia de sequias según su magnitud periodo presente y futuro en la segunda zona representada por la estación de Pallac en SPI 3 meses.

Estación Pallac- SPI 3 MESES														
Periodo		Modelo	Magnitud				Intesidad Promedio				Frecuencia			
			Sequia Ligera (-1a -1.5)	Sequia Moderada (-1.5 a -2)	Sequia Extrema (<-2)	Total	Sequia Ligera (-1a -1.5)	Sequia Moderada (-1.5 a -2)	Sequia Extrema (<-2)	Total	Sequia Ligera (-1a -1.5)	Sequia Moderada (-1.5 a -2)	Sequia Extrema (<-2)	Total
Presente	1980 - 1999	Po	5	4	5	14	-1.2	-1.62	-2.52	-1.8	35.7	28.6	35.7	100%
Futuro Cercano	2020 - 2039	P2	23	8	5	36	-1.3	-1.73	-2.27	-1.46	63.9	22.2	13.9	100%
			24	8	0	32	-1.28	-1.7	0	-1.39	75.0	25.0	0.0	100%
Futuro Lejano	2080 - 2099	P4	23	6	4	33	-1.24	-1.73	-2.63	-1.5	69.7	18.2	12.1	100%
			22	12	3	37	-1.24	-1.66	-2.36	-1.47	59.5	32.4	8.1	100%

Tabla 14. Frecuencia de ocurrencia de sequias según su magnitud periodo presente y futuro en la segunda zona representada por la estación de Pallac en SPI 6 meses.

Estación Pallac - SPI 6 MESES														
Periodo		Modelo	Magnitud				Intesidad Promedio				Frecuencia			
			Sequia Ligera (-1a -1.5)	Sequia Moderada (-1.5 a -2)	Sequia Extrema (<-2)	Total	Sequia Ligera (-1a -1.5)	Sequia Moderada (-1.5 a -2)	Sequia Extrema (<-2)	Total	Sequia Ligera (-1a -1.5)	Sequia Moderada (-1.5 a -2)	Sequia Extrema (<-2)	Total
Presente	1980 - 1999	Po	12	4	8	24	-1.18	-1.65	-2.5	-1.7	50.0	16.7	33.3	100%
Futuro Cercano	2020 - 2039	P2	28	11	3	42	-1.22	-1.78	-2.31	-1.45	66.7	26.2	7.1	100%
		P4	17	9	1	27	-1.2	-1.76	-2.11	-1.42	63.0	33.3	3.7	100%
Futuro Lejano	2080 - 2099	P2	23	9	3	35	-1.23	-1.73	-2.7	-1.48	65.7	25.7	8.6	100%
		P4	19	12	2	33	-1.23	-1.72	-2.44	-1.48	57.6	36.4	6.1	100%

Tabla 15. Frecuencia de ocurrencia de sequias según su magnitud periodo presente y futuro en la segunda zona representada por la estación de Pallac en SPI 12 meses.

Estación Pallac - SPI 12 MESES														
Periodo		Modelo	Magnitud				Intesidad Promedio				Frecuencia			
			Sequia Ligera (-1a -1.5)	Sequia Moderada (-1.5 a -2)	Sequia Extrema (<-2)	Total	Sequia Ligera (-1a -1.5)	Sequia Moderada (-1.5 a -2)	Sequia Extrema (<-2)	Total	Sequia Ligera (-1a -1.5)	Sequia Moderada (-1.5 a -2)	Sequia Extrema (<-2)	Total
Presente	1980 - 1999	Po	13	2	12	27	-1.23	-1.68	-2.58	-1.85	48.1	7.4	44.4	100%
Futuro Cercano	2020 - 2039	P2	25	20	2	47	-1.27	-1.71	-2.32	-1.5	53.2	42.6	4.3	100%
		P4	5	10	0	15	-1.31	-1.81	0	-1.64	33.3	66.7	0.0	100%
Futuro Lejano	2080 - 2099	P2	16	13	1	30	-1.26	-1.65	-2.15	-1.46	53.3	43.3	3.3	100%
		P4	8	12	2	22	-1.14	-1.73	-2.18	-1.55	36.4	54.5	9.1	100%

Tabla 16. Frecuencia de ocurrencia de sequias según su magnitud periodo presente y futuro en la tercera zona representada por la estación de Santa Cruz en SPI 3 meses.

Estación Santa Cruz- SPI 3 MESES														
Periodo		Modelo	Magnitud				Intesidad Promedio				Frecuencia			
			Sequia Ligera (-1a -1.5)	Sequia Moderada (-1.5 a -2)	Sequia Extrema (<-2)	Total	Sequia Ligera (-1a -1.5)	Sequia Moderada (-1.5 a -2)	Sequia Extrema (<-2)	Total	Sequia Ligera (-1a -1.5)	Sequia Moderada (-1.5 a -2)	Sequia Extrema (<-2)	Total
Presente	1980 - 1999	Po	19	11	3	33	-1.16	-1.67	-2.51	-1.45	57.6	33.3	9.1	100%
Futuro Cercano	2020 - 2039	P2	26	12	4	42	-1.3	-1.76	-2.24	-1.52	61.9	28.6	9.5	100%
			24	11	4	39	-1.27	-1.65	-2.01	-1.46	61.5	28.2	10.3	100%
Futuro Lejano	2080 - 2099	P4	23	12	5	40	-1.22	-1.69	-2.15	-1.48	57.5	30.0	12.5	100%
			22	7	8	37	-1.23	-1.6	-2.4	-1.55	59.5	18.9	21.6	100%

Tabla 17. Frecuencia de ocurrencia de sequias según su magnitud periodo presente y futuro en la tercera zona representada por la estación de Santa Cruz en SPI 6 meses.

Estación Santa Cruz - SPI 6 MESES														
Periodo		Modelo	Magnitud				Intesidad Promedio				Frecuencia			
			Sequia Ligera (-1a -1.5)	Sequia Moderada (-1.5 a -2)	Sequia Extrema (<-2)	Total	Sequia Ligera (-1a -1.5)	Sequia Moderada (-1.5 a -2)	Sequia Extrema (<-2)	Total	Sequia Ligera (-1a -1.5)	Sequia Moderada (-1.5 a -2)	Sequia Extrema (<-2)	Total
Presente	1980 - 1999	Po	23	16	2	41	-1.21	-1.73	-2.28	-1.46	56.1	39.0	4.9	100%
Futuro Cercano	2020 - 2039	P2	33	7	5	45	-1.24	-1.82	-2.12	-1.43	73.3	15.6	11.1	100%
		P4	22	13	4	39	-1.16	-1.64	-2.29	-1.44	56.4	33.3	10.3	100%
Futuro Lejano	2080 - 2099	P2	24	14	5	43	-1.21	-1.65	-2.16	-1.47	55.8	32.6	11.6	100%
		P4	22	12	7	41	-1.24	-1.65	-2.45	-1.56	53.7	29.3	17.1	100%

Tabla 18. Frecuencia de ocurrencia de sequias según su magnitud periodo presente y futuro en la tercera zona representada por la estación de Santa Cruz en SPI 12 meses.

Estación Santa Cruz - SPI 12 MESES														
Periodo		Modelo	Magnitud				Intesidad Promedio				Frecuencia			
			Sequia Ligera (-1a -1.5)	Sequia Moderada (-1.5 a -2)	Sequia Extrema (<-2)	Total	Sequia Ligera (-1a -1.5)	Sequia Moderada (-1.5 a -2)	Sequia Extrema (<-2)	Total	Sequia Ligera (-1a -1.5)	Sequia Moderada (-1.5 a -2)	Sequia Extrema (<-2)	Total
Presente	1980 - 1999	Po	15	17	3	35	-1.17	-1.81	-2.07	-1.56	42.9	48.6	8.6	100%
Futuro Cercano	2020 - 2039	P2	35	14	0	49	-1.26	-1.76	0	-1.4	71.4	28.6	0.0	100%
		P4	26	15	0	41	-1.26	-1.71	0	-1.43	63.4	36.6	0.0	100%
Futuro Lejano	2080 - 2099	P2	24	16	1	41	-1.2	-1.66	-2.03	-1.4	58.5	39.0	2.4	100%
		P4	31	13	1	45	-1.23	-1.78	-2.28	-1.41	68.9	28.9	2.2	100%

Tabla 19. Frecuencia de ocurrencia de sequias según su magnitud periodo presente y futuro en la cuarta zona representada por la estación de Yantac en SPI 3 meses.

Estación Yantac - SPI 3 MESES														
Periodo		Modelo	Magnitud				Intesidad Promedio				Frecuencia			
			Sequia Ligera (-1a -1.5)	Sequia Moderada (-1.5 a -2)	Sequia Extrema (<-2)	Total	Sequia Ligera (-1a -1.5)	Sequia Moderada (-1.5 a -2)	Sequia Extrema (<-2)	Total	Sequia Ligera (-1a -1.5)	Sequia Moderada (-1.5 a -2)	Sequia Extrema (<-2)	Total
Presente	1980 - 1999	Po	19	7	6	32	-1.33	-1.69	-2.51	-1.63	59.4	21.9	18.8	100%
Futuro Cercano	2020 - 2039	P2	21	13	5	39	-1.22	-1.71	-2.4	-1.53	53.8	33.3	12.8	100%
			20	12	7	39	-1.24	-1.72	-2.33	-1.58	51.3	30.8	17.9	100%
Futuro Lejano	2080 - 2099	P4	31	9	4	44	-1.22	-1.71	-2.19	-1.41	70.5	20.5	9.1	100%
			20	13	6	39	-1.23	-1.77	-2.34	-1.58	51.3	33.3	15.4	100%

Tabla 20. Frecuencia de ocurrencia de sequias según su magnitud periodo presente y futuro en la cuarta zona representada por la estación de Yantac en SPI 6 meses.

Estación Yantac - SPI 6 MESES														
Periodo		Modelo	Magnitud				Intesidad Promedio				Frecuencia			
			Sequia Ligera (-1a -1.5)	Sequia Moderada (-1.5 a -2)	Sequia Extrema (<-2)	Total	Sequia Ligera (-1a -1.5)	Sequia Moderada (-1.5 a -2)	Sequia Extrema (<-2)	Total	Sequia Ligera (-1a -1.5)	Sequia Moderada (-1.5 a -2)	Sequia Extrema (<-2)	Total
Presente	1980 - 1999	Po	27	7	3	37	-1.24	-1.76	-2.37	-1.43	73.0	18.9	8.1	100%
Futuro Cercano	2020 - 2039	P2	28	14	1	43	-1.21	-1.78	-2.24	-1.42	65.1	32.6	2.3	100%
		P4	17	8	11	36	-1.17	-1.77	-2.3	-1.65	47.2	22.2	30.6	100%
Futuro Lejano	2080 - 2099	P2	21	12	4	37	-1.22	-1.78	-2.27	-1.51	56.8	32.4	10.8	100%
		P4	26	6	7	39	-1.24	-1.73	-2.39	-1.52	66.7	15.4	17.9	100%

Tabla 21. Frecuencia de ocurrencia de sequias según su magnitud periodo presente y futuro en la cuarta zona representada por la estación de Yantac en SPI 12 meses.

Estación Yantac - SPI 12 MESES														
Periodo		Modelo	Magnitud				Intesidad Promedio				Frecuencia			
			Sequia Ligera (-1a -1.5)	Sequia Moderada (-1.5 a -2)	Sequia Extrema (<-2)	Total	Sequia Ligera (-1a -1.5)	Sequia Moderada (-1.5 a -2)	Sequia Extrema (<-2)	Total	Sequia Ligera (-1a -1.5)	Sequia Moderada (-1.5 a -2)	Sequia Extrema (<-2)	Total
Presente	1980 - 1999	Po	32	2	0	34	-1.24	-1.66	0	-1.26	94.1	5.9	0.0	100%
Futuro Cercano	2020 - 2039	P2	34	8	3	45	-1.28	-1.71	-2.29	-1.42	75.6	17.8	6.7	100%
		P4	14	12	6	32	-1.29	-1.69	-2.15	-1.61	43.8	37.5	18.8	100%
Futuro Lejano	2080 - 2099	P2	23	6	8	37	-1.19	-1.72	-2.29	-1.51	62.2	16.2	21.6	100%
		P4	17	12	4	33	-1.23	-1.74	-2.22	-1.53	51.5	36.4	12.1	100%

Para el SPI de 12 meses se tiene mayor frecuencia de la magnitud de sequía ligera en la primera zona, es un 100% en P2 y P4 para el futuro cercano, y en el futuro lejano no se tiene la magnitud de la sequía extrema. En la segunda zona se presentan los tres tipos de sequía siendo de mayor frecuencia la sequía ligera en P2 y menor a un 10% la sequía extrema, además en P4 se tiene que es de mayor frecuencia la sequía moderada, y en el futuro cercano no se presenta sequía extrema y en comparación con el futuro lejano. En la tercera zona, para el futuro cercano no se tiene la magnitud de sequía extrema, para el futuro lejano si se tiene y es menor al 10%; en la cuarta zona, se presenta con mayor frecuencia la magnitud de sequía ligera, siendo más del 60%, en el presente no se tiene sequía extrema, pero en el futuro cercano y lejano si se tiene y es mayor al 10%, a excepción de P2 en el futuro cercano.

Los cambios de la precipitación a nivel puntual también se muestran en la Figura 49, Figura 50, Figura 51 y la

Figura 52, donde se observa una tendencia de aumento gradual de la precipitación en los periodos húmedos así como una disminución de la precipitación en los periodos secos para los próximos años futuros. Principalmente en P2 y P4, aumentando de acuerdo a cada zona gradualmente.

Además para identificar esta variabilidad se realizó la diferencia porcentual de las proyecciones de las precipitaciones del modelo MRI –AGCM con las precipitaciones presentes de las estaciones pluviométricas. De esta manera se obtuvo la variabilidad de la precipitación en los cuatro productos del modelo MRI –AGCM (P1, P2, P3 y P4). En la primera zona se tiene que los meses de enero a marzo presentan un aumento del 300%, pero en esta zona se tiene presente que las precipitaciones son escasas, los meses de junio a agosto presentan una disminución del 100%. En la segunda zona, los meses de enero a marzo presentan un aumento del 31%, en las estaciones de Matucana y Autisha presentan una disminución de la precipitación en la diferencia porcentual que no es significativa con respecto al promedio de la precipitación presente, y predomina la tendencia de las estaciones que se encuentran dentro de la cuenca; y los meses de junio a agosto se tiene una disminución del 25%, además en diciembre se presenta una disminución de la precipitación en ambas zonas. En la tercera zona, se presenta los meses de diciembre a febrero con un aumento de la precipitación de un 36%, los meses de junio a agosto, se presenta una disminución del 27%, además los meses de marzo y septiembre presentan un

aumento de la precipitación. En la cuarta zona, predomina que los meses de diciembre a febrero un aumento de la precipitación de 70 %, y los meses de junio a agosto del 100 %, y aumento en todos los meses, estas variaciones se presentan en el Anexo 3.

En la cuenca alto-andina de Chancay Huaral, la población en su mayoría depende del sector agrícola, tanto urbano como rural, debido a que las actividades del sector urbano están asociadas de forma directa o indirecta interviniendo en la producción agrícola. Generalmente se producen hortalizas, cereales y tubérculos en la cuenca, asimismo es uno de los principales abastecedores de productos alimenticios del país incluyendo su fruticultura y los productos agroindustriales. Es por esto, la necesidad de tener en cuenta el cambio que se producirá en la precipitación en el futuro para no afectar de esta manera el ámbito socio económico de la población.

Además sus recursos hídricos dependen de la precipitación estacional, así como, los aportes de deshielo de los nevados y otros, principalmente el aporte de la precipitación como se observa en la parte alta de cuenca, siendo parte de la tercera y cuarta zona. Es por esto que se determinó la proyección de la precipitación futura en la cuenca. El modelo atmosférico de alta resolución MRI – AGCM proyecta un cambio para el futuro cercano donde se muestra la variabilidad de la precipitación ante el cambio climático, teniendo presente que en este futuro puede haber ciertas inundaciones posibles o un aumento del caudal del río por las fuertes precipitaciones que se tendrán en el futuro cercano y lejano.

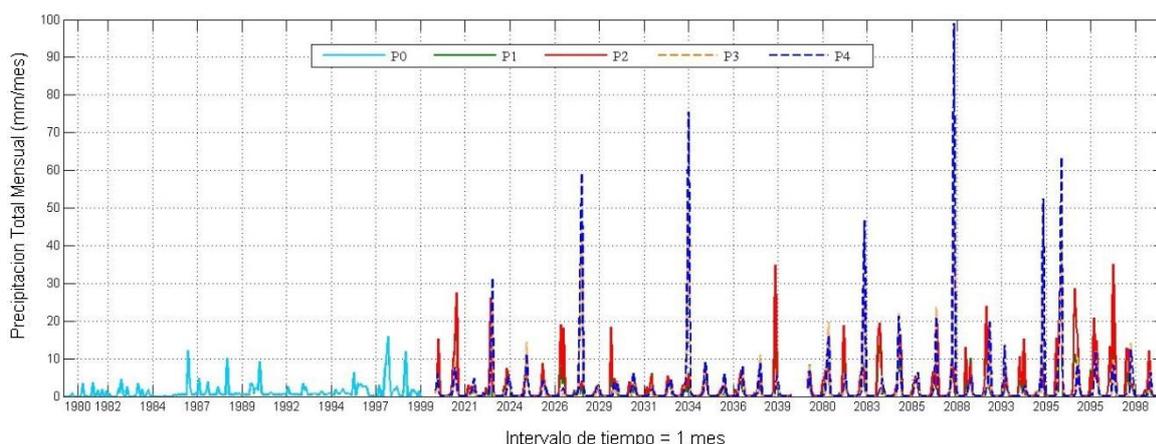


Figura 49. Gráfico de la precipitación a escala mensual de la estación pluviométrica Huayan para el periodo de análisis presente: 1980 a 1999. Y gráficos de la precipitación a escala mensual de los productos del modelo MRI – AGCM (P1, P2, P3, P4) para el futuro cercano y lejano para los periodos de análisis de 2020 a 2039 y 2080 a 2099, respectivamente.

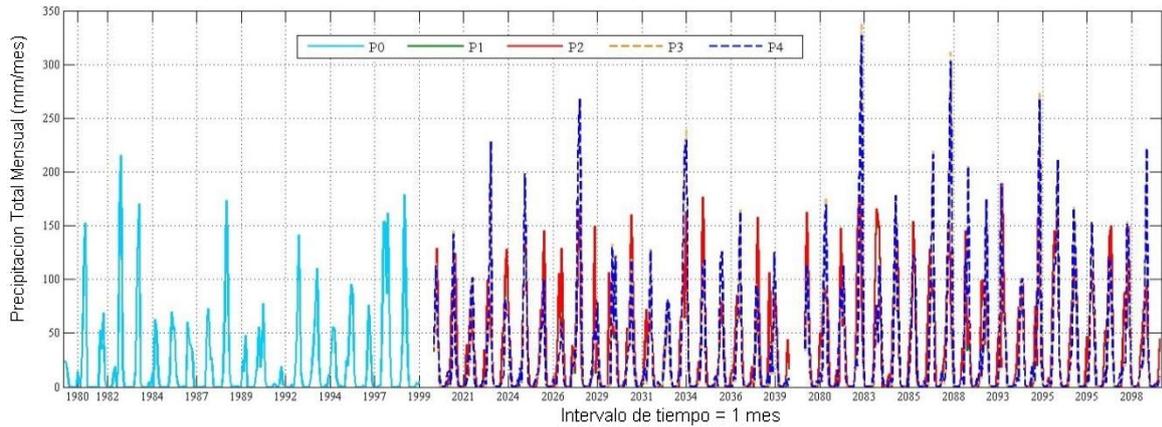


Figura 50. Gráfico de la precipitación a escala mensual de la estación pluviométrica Pallac para el periodo de análisis presente: 1980 a 1999. Y gráficos de la precipitación a escala mensual de los productos del modelo MRI – AGCM (P1, P2, P3, P4) para el futuro cercano y lejano para los periodos de análisis de 2020 a 2039 y 2080 a 2099, respectivamente.

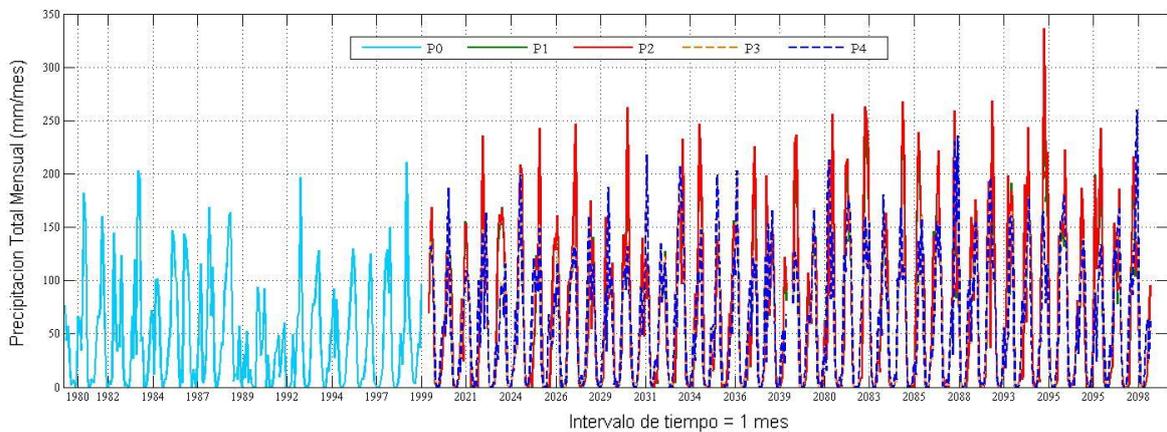


Figura 51. Gráfico de la precipitación a escala mensual de la estación pluviométrica Santa Cruz para el periodo de análisis presente: 1980 a 1999. Y gráficos de la precipitación a escala anual de los productos del modelo MRI – AGCM (P1, P2, P3, P4) para el futuro cercano y lejano para los periodos de análisis de 2020 a 2039 y 2080 a 2099, respectivamente.

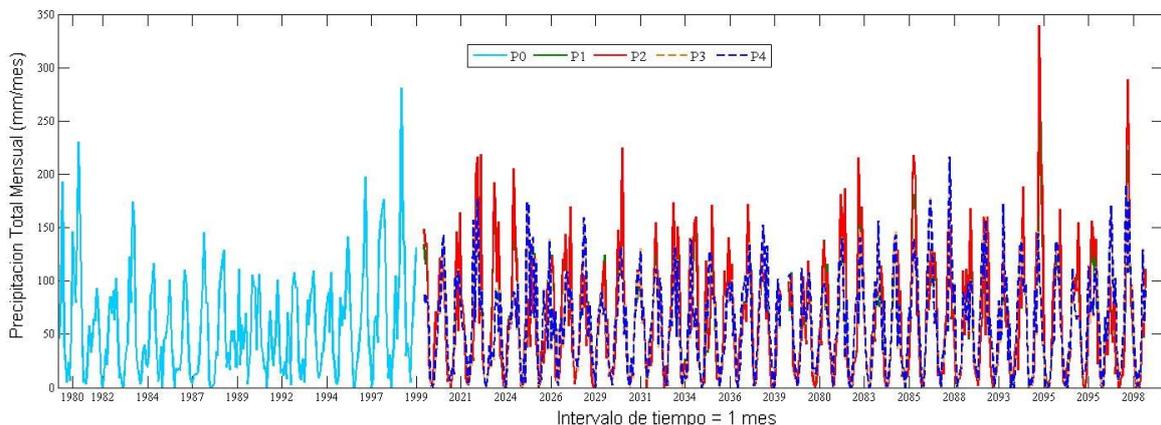


Figura 52. Gráfico de la precipitación a escala mensual de la estación pluviométrica Yantac para el periodo de análisis presente: 1980 a 1999. Y gráficos de la precipitación a escala anual de los productos del modelo MRI – AGCM (P1, P2, P3, P4) para el futuro cercano y lejano para los periodos de análisis de 2020 a 2039 y 2080 a 2099, respectivamente.

Es necesario por eso que se realice una mejora y eficiencia de la tecnificación del riego en la parte media de la cuenca, mejorar las estructuras de captación de la parte media y alta de la cuenca, desarrollar reservorios que permitan almacenar y regular los excedentes forma interanual en la parte media y alta, realizar un reforzamiento de las lagunas de la parte alta de la cuenca, mediante represas de mediana capacidad y rehabilitar las existentes (en subcuencas de Baños, Quiles y Vichaycocha). Además, mejorar la eficiencia de riego en el valle de la cuenca con estructuras hidráulicas modernas de distribución, mejoramiento de gestión de distribución y captación, revestimiento de canales principales, la aplicación de medidas administrativas-operativas y las buenas prácticas de operación y mantenimiento.

V. CONCLUSIONES

El estudio se basa en el análisis de las precipitaciones de la cuenca alto andina Chancay Huaral, se presenta la evaluación de la precipitación presente y futura, así como las anomalías e índices de sequías meteorológicas; permitiendo conocer la variabilidad de la precipitación.

1. La cuenca Chancay Huaral ha sido estudiada en cuatro zonas con características climáticas y altitudinales similares. Obteniendo un coeficiente de correlación de Pearson espacial positiva significativa en todos los productos del modelo MRI; a un nivel de significancia del cinco por ciento a nivel mensual. Esto debido a la alta resolución espacial del modelo (20km) que toma en cuenta la orografía del lugar y el clima local.
2. La correlación espacial de Pearson estacional representa una correlación positiva significativa que varía del 0.7 a 0.99 para primavera, 0.99 a 0.7 para otoño, entre 0.7 a 0.9 para verano, 0.2 a 0.8 para invierno en los cuatro productos MRI; sobre todo en verano en la parte media y alta de la cuenca, en el periodo lluvioso (segunda y tercera zona).
3. Los estadísticos de la tabla de contingencia para la primera, segunda y tercera zona muestran un comportamiento similar. Con el estadístico de probabilidad de detección (POD) es óptimo cuando el umbral es menor y el ratio de falsas alarmas (FAR) es óptimo cuando el umbral de precipitación es mayor. Además, se obtuvo que el estadístico de porcentajes de estimaciones correctas (PC) aumenta cuando se incrementa el umbral de precipitación. Para la cuarta zona, los estadísticos de probabilidad de detección (POD), ratio de falsas alarmas (FAR), índice de éxito crítico (CSI) y de porcentajes de estimaciones correctas (PC) alcanzan el óptimo, la zona más lluviosa de la cuenca esta mejor representada por los estadísticos cuando el umbral de lluvia es menor. Es así que la precipitación proyectada del modelo MRI – AGCM es precisa para toda la cuenca, porque define

adecuadamente el comportamiento de la precipitación en todas las zonas, sobre todo en la época lluviosa.

4. Las proyecciones futuras de cambio climático con el modelo MRI: futuro cercano, la lluvia aumenta para los meses de Enero a Abril en todas las zonas. Y, en los meses de Mayo a Agosto es con escasa lluvia en toda la cuenca. Similarmente se proyecta para el futuro lejano, y se obtiene meses de escasa lluvia de Mayo a Septiembre. La lluvia futura genera periodos de tiempo más húmedos y secos, que pueden causar eventos extremos que afectarían a la agricultura de secano.
5. Las anomalías de las precipitaciones a nivel espacial con respecto al futuro cercano y lejano, es que existirá un aumento de la precipitación en todas zonas de la cuenca en los meses de enero a marzo y se tendrá una escasez de precipitación en los meses de junio a agosto. La primera zona, es decir, la costa y valle de la cuenca Chancay-Huaral seguirá teniendo la ausencia de precipitaciones sobre todo en los meses de octubre a diciembre y en la segunda zona se tendrá un déficit regular de las precipitaciones en los meses de junio a agosto. Entonces, se debe tener en cuenta la optimización del uso de los recursos hídricos en la cuenca para un mejor aprovechamiento en cada época del año, sobre todo para la agricultura.
6. La diferencia porcentual de las precipitaciones en la cuenca, presenta un cambio en la primera zona y en la segunda zona, debido a que las lluvias comenzaría desde el mes de enero a marzo y no desde diciembre, modificando el periodo lluvioso y el periodo seco se estaría extendiendo hasta el mes de septiembre. En la tercera zona, el periodo lluvioso y el periodo seco no se desplaza, pero existe aumento en septiembre y marzo. En la cuarta zona predomina el aumento de la precipitación en todo el año. Por lo que en la media alta y alta de la cuenca no se estaría presentando cambios en el periodo lluvioso y seco.
7. Los índices de sequía meteorológica: porcentaje de precipitación normal (PPN), SPI de 3 y 6 meses, presentan el mismo comportamiento variable, aumento de la lluvia en el periodo húmedo (enero a marzo) y disminución de la lluvia en el periodo seco (junio a agosto), con algunos valores atípicos en los periodos

proyectados en toda la cuenca. El SPI de 12 meses y la precipitación de tendencia anual (PTA), se proyectarían los años 2034 y el 2094, como años muy húmedos, y los años 2036 y 2092 como años secos en la cuenca. Además, las prospecciones de precipitación con el índice de precipitación estandarizada (SPI), se tiene en la parte baja de la cuenca predomina la magnitud de sequía ligera, con una frecuencia aproximada del 80% y la intensidad promedio de -1.24, en la parte media y alta de la cuenca, predomina la magnitud de sequía ligera y moderada, con las frecuencias de aproximadamente el 60% y 20%, y la intensidad promedio aproximado de -1.50. De este modo en el futuro cercano y lejano será de vital importancia tener un adecuado manejo de los recursos hídricos, primero mejorando el sistema de riego para las épocas de sequía y las captaciones, como reservorios para las épocas húmedas.

8. En general, la agricultura de secano para el futuro se podría ver afectada, debido a la alta variabilidad de la lluvia los años venideros. Esta es la importancia de conocer las proyecciones de la lluvia, para brindar un mayor conocimiento de la variabilidad de la disponibilidad del recurso del hídrico en la cuenca; previniéndolo así de ciertas inundaciones por aumento de la lluvia, además de controlar las posibles sequías meteorológicas que se puedan avecinar en la cuenca, con los datos proyectados; mejorando y construyendo reservorios, represas, estructuras de captación para el mejoramiento y eficiencia del recurso de agua en la cuenca.

VI. RECOMENDACIONES

1. En la cuenca Chancay Huaral, se debe tener un uso y manejo adecuado de los recursos hídricos, así que se deberá tomar decisiones políticas gubernamentales para la prevención y concientizando a la población, para que no sea afectado su ámbito socio-económico. Asimismo brindar a la población el conocimiento de técnicas eficientes de riego, haciéndolos participar en capacitaciones técnicas. Además, se debería generar mayores estructuras hidráulicas para proveer la suficiente demanda hídrica para el riego de sus productos agrícolas en toda la época del año, mejorando su sistema de riego actual y futuro. Esto se deberá tomar en cuenta para los futuros consejos de cuenca que tomaran las provisiones para el futuro de corto y largo plazo
2. La data de precipitación presente extraída del moldeo de alta resolución MRI-AGCM es de una base de datos de veinte años del periodo de 1980 a 1999, esta base podría incrementarse con la base de datos actuales que tiene *Meteorological Reserch Institute* (MRI).
3. Analizar otro índices de sequía meteorológicas que puedan ampliar la investigación, y evaluar también otros índices de sequía que involucren sequias hidrologías, agrícolas y sociales.
4. Realizar una línea de investigación futura para la cuenca, incluyendo la variable de temperatura, para ser modelado higrológicamente; y obtener caudales futuros y un balance hídrico futuro. Así como obtener el modelo de calidad de agua futura de la cuenca.
5. Poder realizar en la cuenca otros estudios de escenarios climáticos presentando en la IPCC 2013, para tener un mayor conocimiento del cambio climático y la variabilidad de precipitación en la cuenca, así como de otras variables.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMBROSIO R. W (2001). Estudio de Máximas Avenidas y de Transporte de Sedimentos en el río Chancay – Huaral con fines de control de Inundaciones, Tesis para optar el Título de Ingeniero Agrícola, Universidad Nacional agraria La Molina, Lima – Perú. 51p.
- Autoridad Nacional del Agua, ANA (2002). Evaluación y ordenamiento de los recursos hídricos de la cuenca Chancay – Huaral. Hidrología superficial de la cuenca del río Chancay-Huaral. Lima – Perú.
- Autoridad Nacional del Agua, ANA (2013). Plan de gestión de recursos hídricos de la cuenca Chancay Huaral. Resumen Ejecutivo. Lima – Perú.
- BHALME H.N. & MOOLEY D. A (1980). Large Scale drought/flood and monsoon circulation, Monthly Weather Review, 108, 1179 – 1211.
- BLAZQUEZ, J.; NUÑEZ N.; KUSUNOKI S (2012) Climate projections and uncertainties over South America from MRI/JMA global model experiments. Atmospheric and Climate Sciences, 2: 381 – 400.
- BRASS, R.L. (1990). Hydrology: An introduction to hydrologic science. Reading, Mass: Addison-Wesley-Longman.
- CONTRERAS F. A. (2009). Diseño de obras de encauzamiento y defensas ribereñas en el río Chancay - Huaral: progresivas 11+000 - 17+000, Tesis para optar el Título de Ingeniero Agrícola, Universidad Nacional agraria La Molina, Lima – Perú. 18- 21p.

- DMC; DGA (2014). Indicadores de Sequía. Precipitación de tendencial anual y porcentaje precipitación normal de la Dirección meteorológica de Chile y la Dirección general de aguas de Chile. Monitoreo de Indicadores de Sequía - Climate Data Library. http://www.climatedatalibrary.cl/UNEA/maproom/Monitoring/Meteorological/PrecipitationTrend_DMC.html Último acceso: 10 de Diciembre del 2014.
- EROSKICONSUMER. Modelo climáticos: así se predice el calentamiento global. http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/naturaleza/2009/06/08/185806.php Último acceso: 19 de Noviembre del 2014.
- ESPINOZA, J.C. (2005). Manual escrito con motivo del curso taller: Utilización del método del Vector Regional con HYDRACCESS. SENAMHI – Perú.
- ESPINOZA J.C, RONCHAIL J, LAVADO W, CARRANZA J, COCHONNEAU G, DE OLIVEIRA5 E, POMBOSA R, VAUCHEL & LOUP GUYOT (2010). Variabilidad espacio-temporal de las lluvias en la cuenca amazónica y su relación con la variabilidad hidrológica regional. Un enfoque articular sobre la región andina. Revista Peruana Geo-Atmosférica (RPGA). Perú. Pag. 99 – 130.
- ESTCENA (2011). Programa coordinado para la generación de escenarios regionalizados de cambio climático: Regionalización estadística. España. Disponible en <https://gisclimatechange.ucar.edu/sites/default/files/users/Downscaling.pdf> Último acceso: 01 de Diciembre del 2014.
- FAO (2014). Modelo climático de Circulación General (GCM). Data CRU. Disponible en: http://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/gcm_guide.html Último acceso: 25 de Octubre del 2014.
- GARCÍA P.A. (2006). Sequías Teoría y Prácticas. Índice porcentaje de precipitación normal. Pag. 60 – 61. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medioambiente. Universidad Politécnica de Valencia (UPV.), España.

- GIBBS W & MAHER J. (1967). Rainfall defiles as drought indicators. Bureau of Meteorology Bulletin 48. Commonwealth of Australia, Melbourne.
- GUANUCHI J. (2015). Análisis comparativo de Downscaling estadístico y Dinámico en las cuencas de los Ríos paute y jubones. Facultad de Ciencias Químicas Escuela de Ingeniería Ambiental. Universidad de Cuenca. Ecuador.
- GUTIÉRREZ J. (2014). Instituto de Física de Cantabria – Universidad de Cantabria. Escenarios regionales de cambio climático: downscaling estadístico y dinámico. Disponible en <http://www.divulgameteo.es/uploads/Modelos-regionales.pdf> Último acceso: 01 de Diciembre del 2014.
- GUTIÉRREZ J, SAN MARTIN D, COFINO A, HERRERA S, MANZANAS R, FRIAS M. (2011). Guía de usuario del portal de conjuntos Downscaling. <http://www.meteo.unican.es/ensembles>. España.
- HYUN-SUK Shin et al. (2000). Regional drought analysis based on neural networks, Journal of Hydrologic Engineering, p 145 – 155.
- HOAR T.; NYCHKA D. (2008). Statistical downscaling of the Community Climate System Model (CCSM) monthly temperature and precipitation projections. Disponible en <https://gisclimatechange.ucar.edu/sites/default/files/users/Downscaling.pdf> Último acceso: 01 de Diciembre del 2014.
- IPCC, GTI (1996): Cambio Climático (1995). La Ciencia del Cambio Climático. Contribución del Grupo de Trabajo I (GTI) al Segundo Informe de Evaluación (SIE) del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- IPCC (2007). Escenarios de Emisiones 2000 a 2100. Disponible en: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/es/spms3.html Último acceso: 17 de Noviembre del 2014.

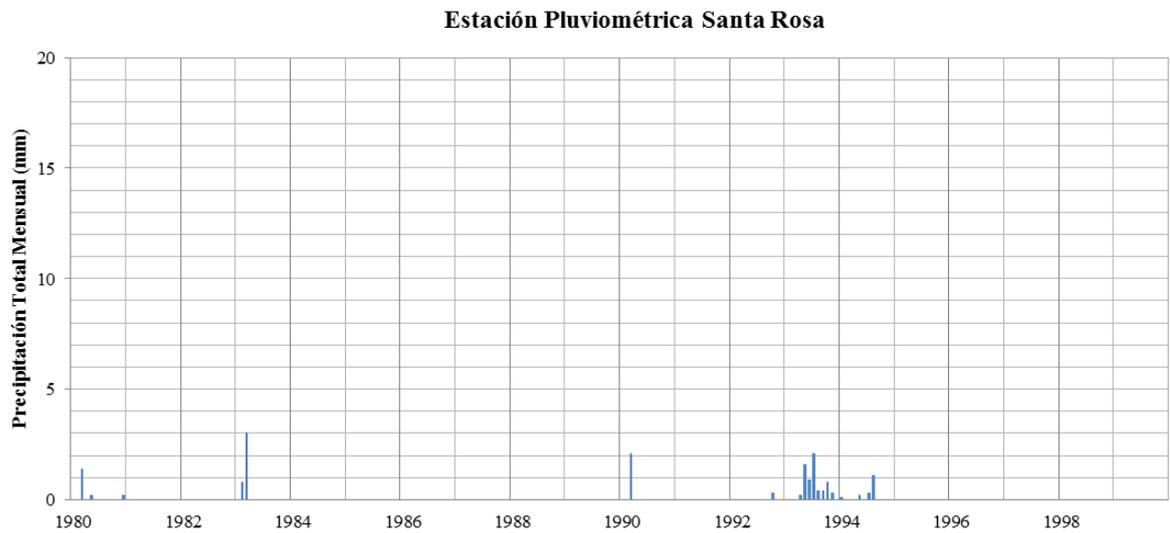
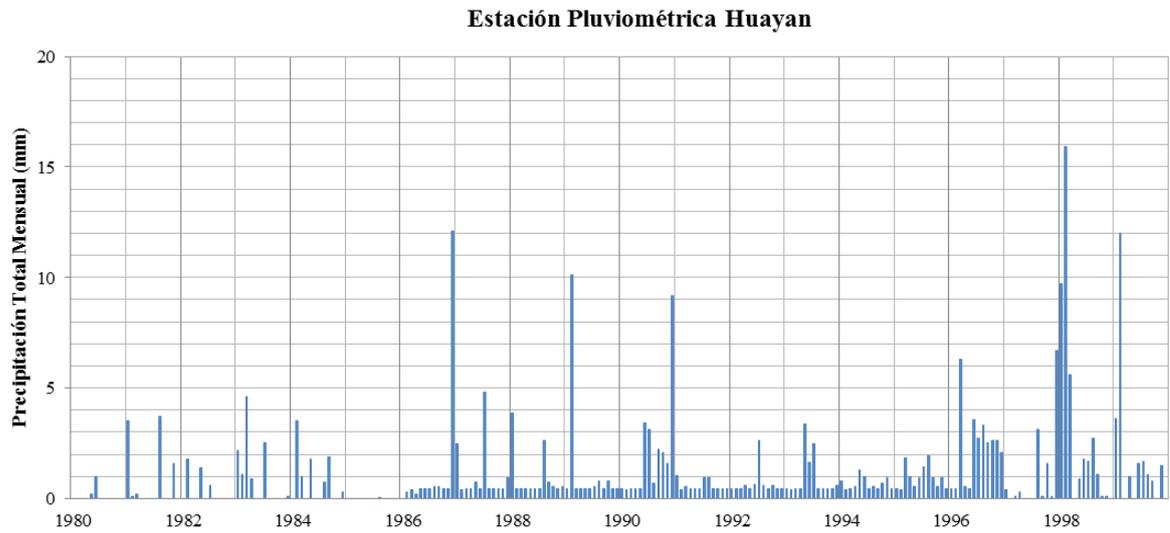
- IPCC (2007). Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, Suiza.
- IPCC (2013). Cambio climático 2013. Bases físicas. Resumen para responsables de políticas, resumen técnico y preguntas frecuentes. Ginebra, Suiza.
- LORENZO, J. (2012). Tesis Doctoral. «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.»
- MIZUTA R.; YOSHIMURA H. A.; KATAYAMA K.; YUKIMOTO M.; KAWAIH. (2006). Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol. 84, No. 1, pp. 165—185.
- MIZUTAR.; YOSHIMURAH.; MURAKAMIH.; MATSUEDAM.; ENDOH.; OSET.; KAMIGUCHIK.; HOSAKAM.; SUGIM.; YUKIMOTO M.; KUSUNOKI S.; KITOHA. (2012) Climate Simulations Using MRI-AGCM3.2 with 20-km Grid. Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol. 90A, pp. 233--258.
- Modelo de Clima Global. <http://cambioclimaticoglobal.com/modelo-de-clima-global-mcg>¹ Último acceso: 20 de Setiembre 2014.
- MONONIS M, FERRER J, SOLERA A, ESTRELA T y PAREDES-ARQUIOLA J. (2014). Water accounts and wáter stress indexes in the European context of wáter planning: the Jucar River Basin. España.
- NAKAEGAWA. T.; KITOHA A.; KUSUNOKI S.; MURAKAMIH.; ARAKAWAO (2014): Hydroclimate changes over Central America and the Caribbean in a global warming climate projected with 20-km and 60-km mesh MRI atmospheric general circulation models. Meteorology and Geophysics, 65, 15–33

- NÚÑEZ D, MUÑOZ C, REYES V, VELASCO I. Y GADSDEN H. (2007). Caracterización de la sequía a diversas escalas de tiempo en chihuahua, México. *Agrociencia*. Vol. 41, 2007, pp. 253-262.
- PICHARDO M. C. G. (2004). Comparación de dos metodologías para el cálculo del índice de severidad de sequía para doce reservas de la biosfera mexicana. México.
- TOMOAKI O.; MIZUTA R.; KIMURAKAMI H.; KUSUNOKI S.; KITO H. A.; KAYABU I. High-resolution AGCM Modeling and Application for AMIP-type Future Projection. Último acceso: 18 de Noviembre del 2014.
- OMM (2011). Guía del Usuario sobre el Índice normalizado de la precipitación (OMM N°1090). M. Svoboda, M. Hayes y D. Wood, Ginebra.
- SADC REGIONAL REMOTE SENSING UNIT (2000). SPI (Índice de Precipitación Estandarizada).
- SENAMHI (2007). Escenarios de cambio climático en la Cuenca del río Urubamba para el año 2100. Lima – Perú.
- SENAMHI (2014). Regionalización estadística de escenarios climáticos en Perú.
- RAMOS L. (2013). Estudio de la utilidad de la precipitación proyectada de satélite en la modelación hidrológica distribuida. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medioambiente. UPV. España.
- UNAM Postgrado. Determinación de los índices de sequías. Impacto Económico de las Sequías en el Estado de Sinaloa, en la Agricultura y Ganadería. Último acceso: 10 de Diciembre del 2014.

VIII. ANEXOS

Anexo 1. Histogramas de la precipitación total mensual de las estaciones pluviométricas para el periodo de análisis de 1980 a 1999.

Figura 53. Histogramas de Precipitación Total Mensual para el periodo de análisis de 1980 a 1999 – Primera zona



Estación Pluviométrica Alcantarilla

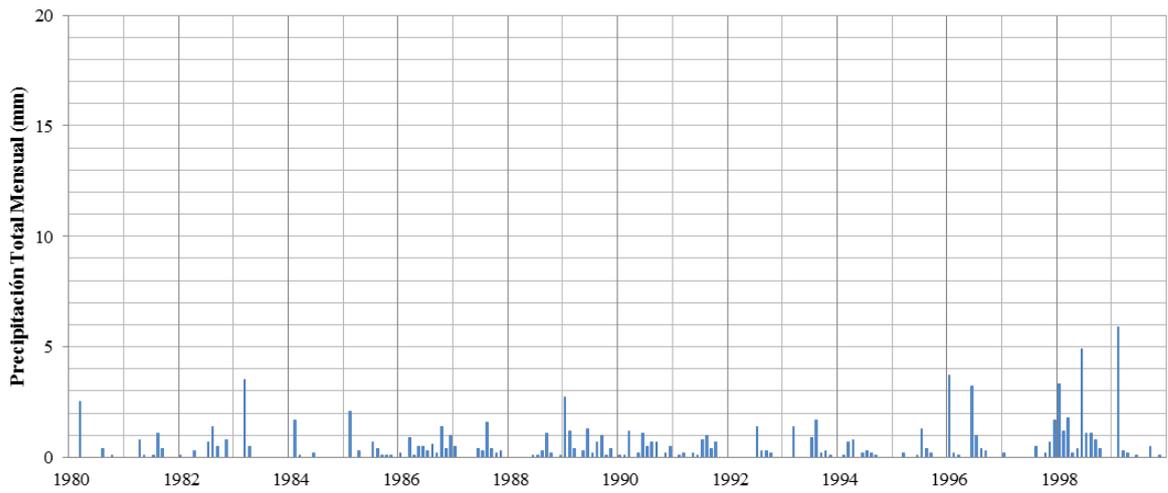
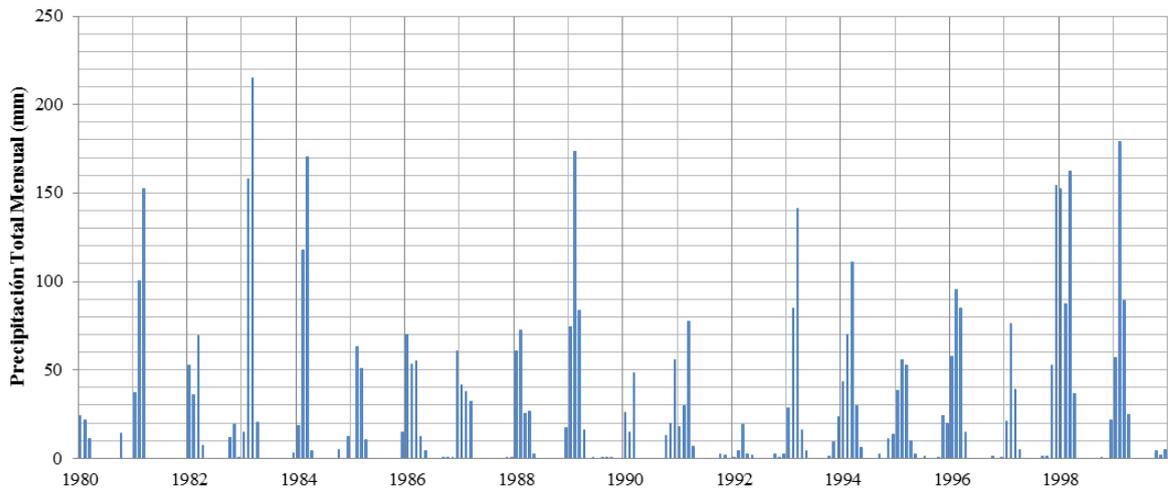
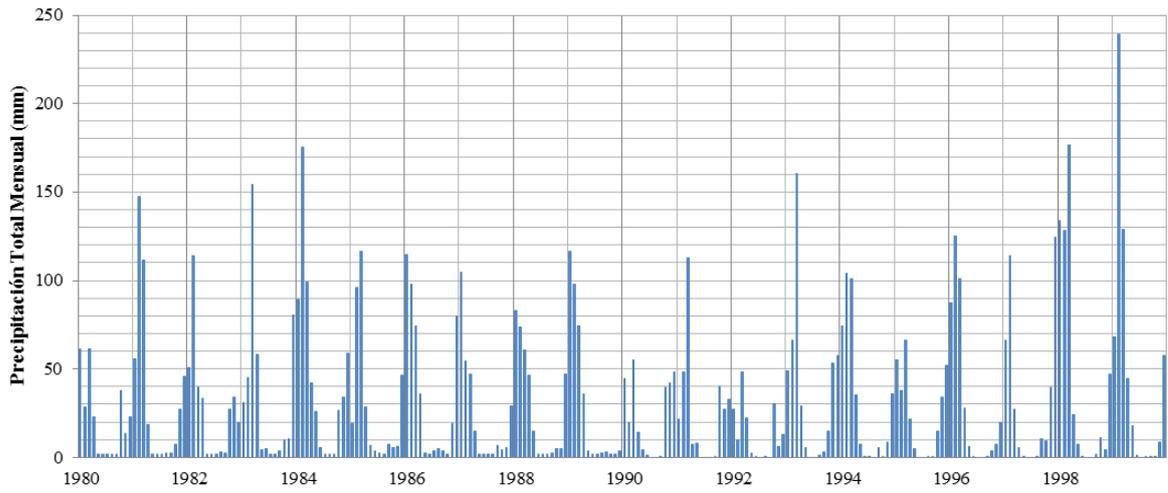


Figura 54. Histogramas de Precipitación Total Mensual para el periodo de análisis de 1980 a 1999 – Segunda zona

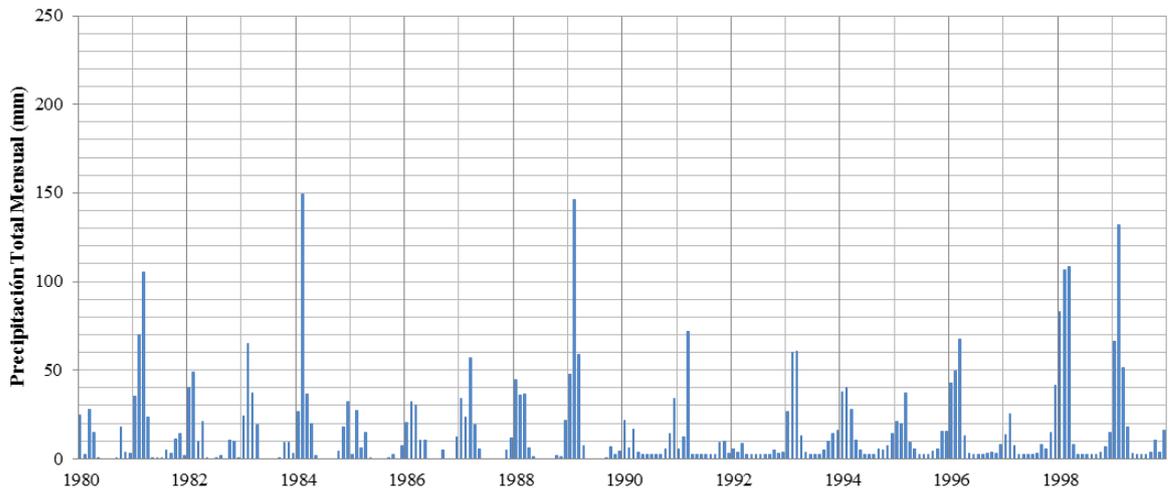
Estación Pluviométrica Pallac



Estación Pluviométrica Carac



Estación Pluviométrica Autisha



Estación Pluviométrica Matucana

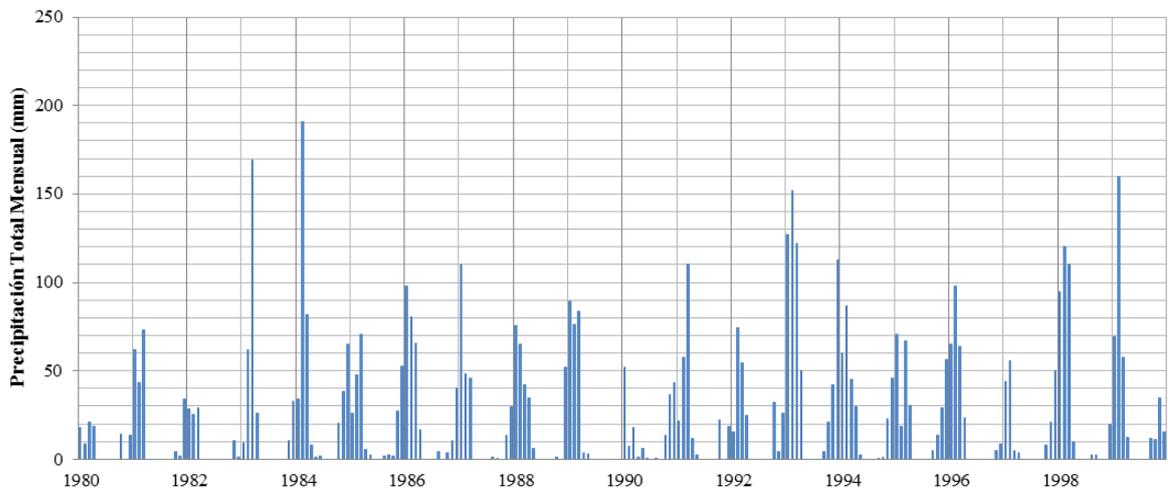
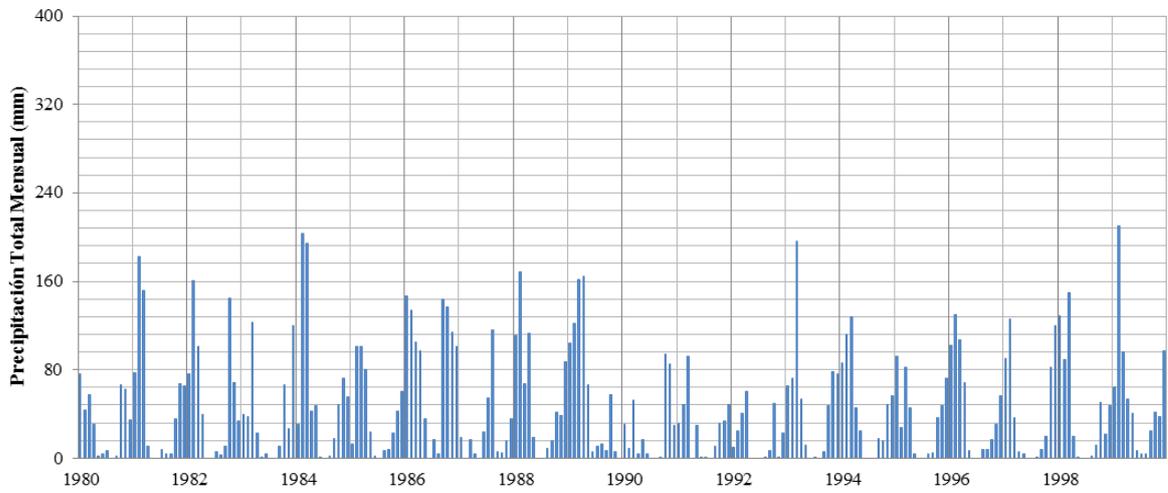
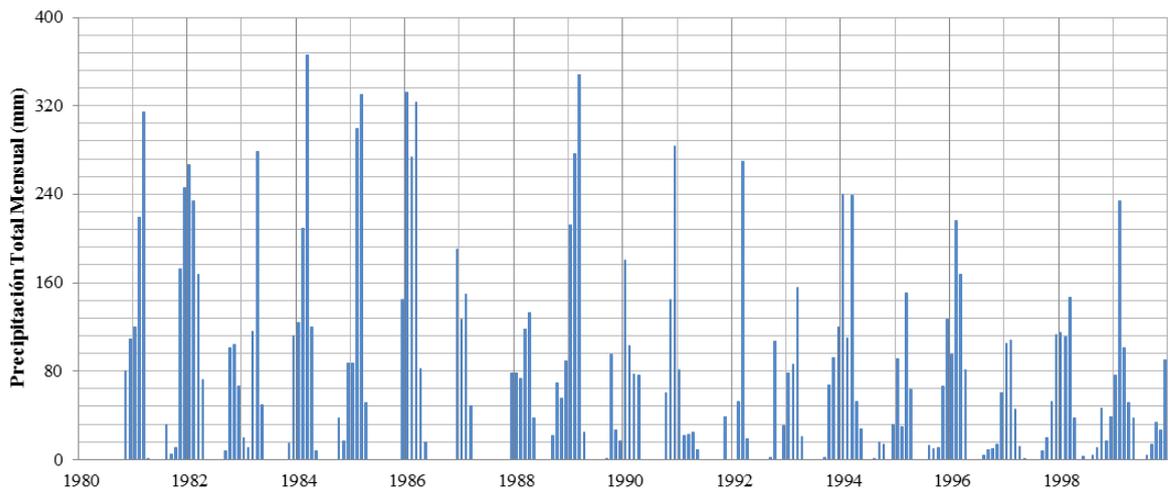


Figura 55. Histogramas de Precipitación Total Mensual para el periodo de análisis de 1980 a 1999
– Tercera zona

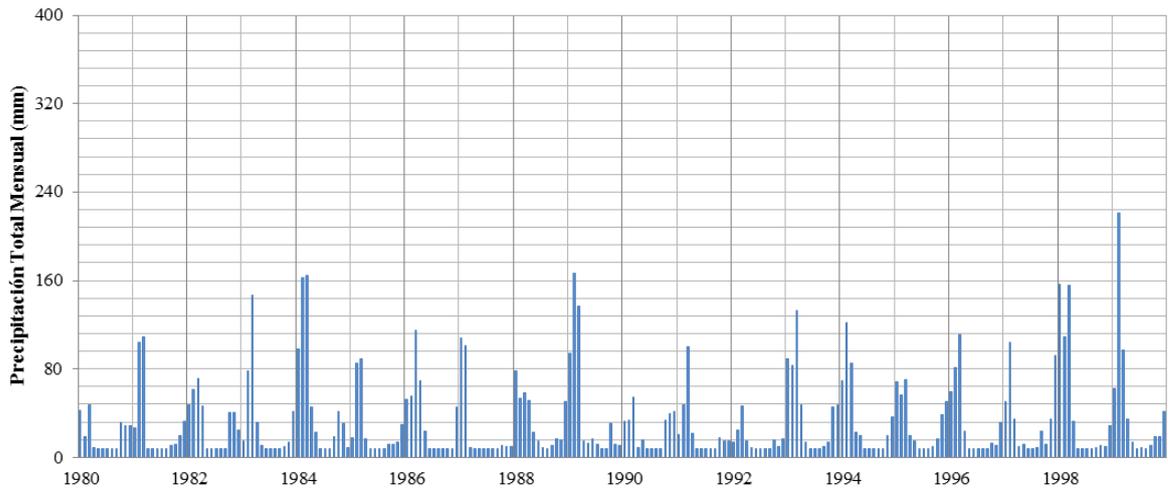
Estación Pluviométrica Santa Cruz



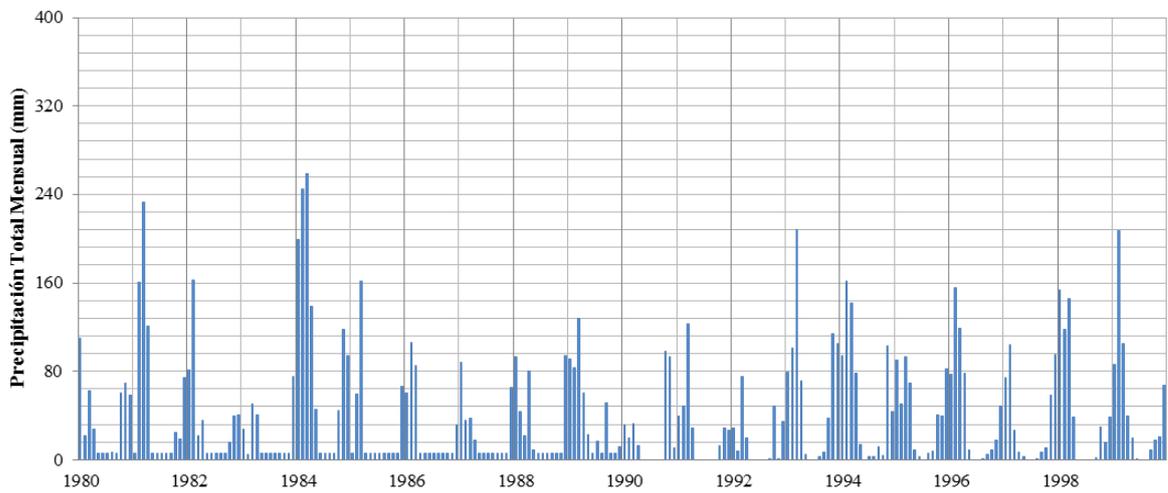
Estación Pluviométrica Pirca



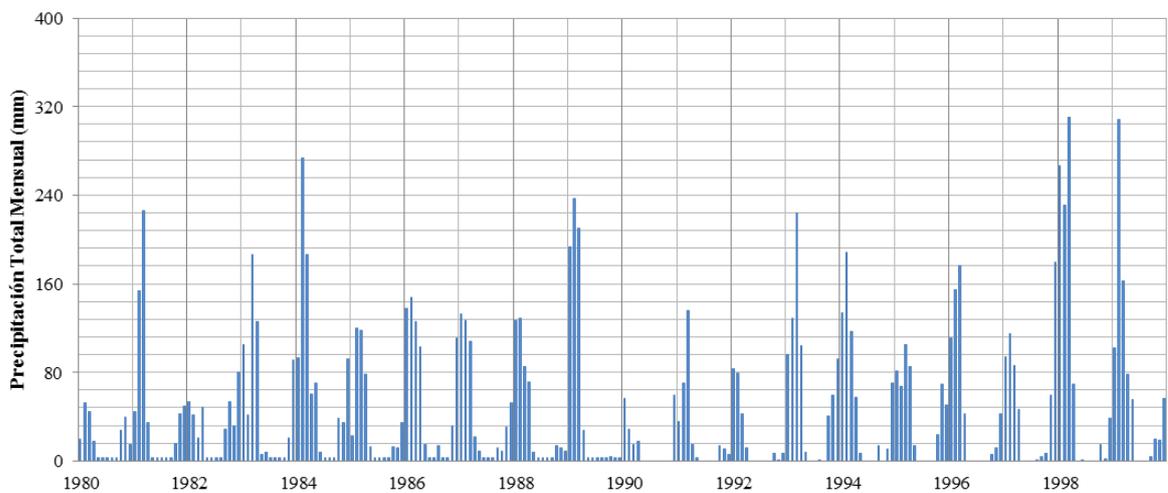
Estación Pluviométrica Huamantanga



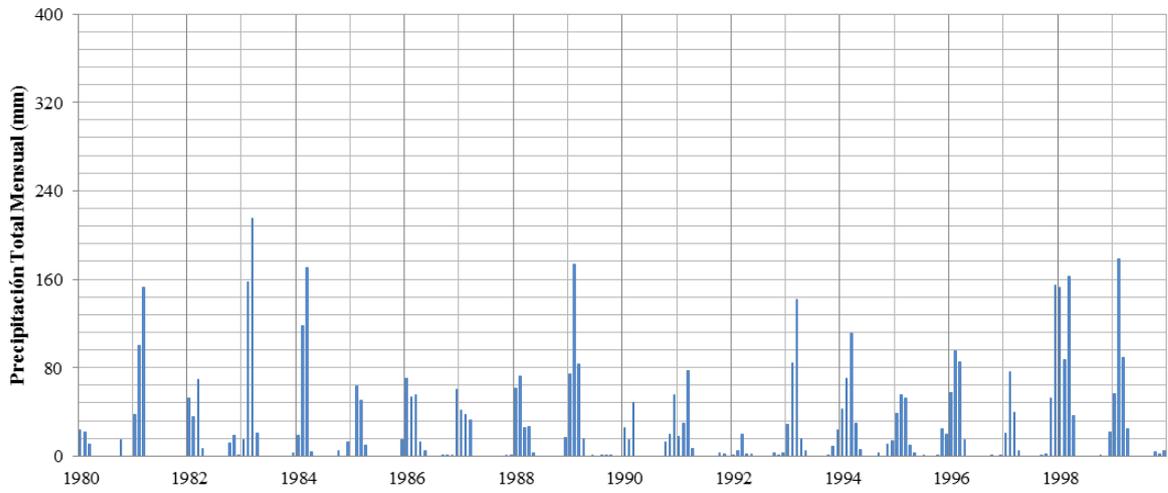
Estación Pluviométrica Huaros



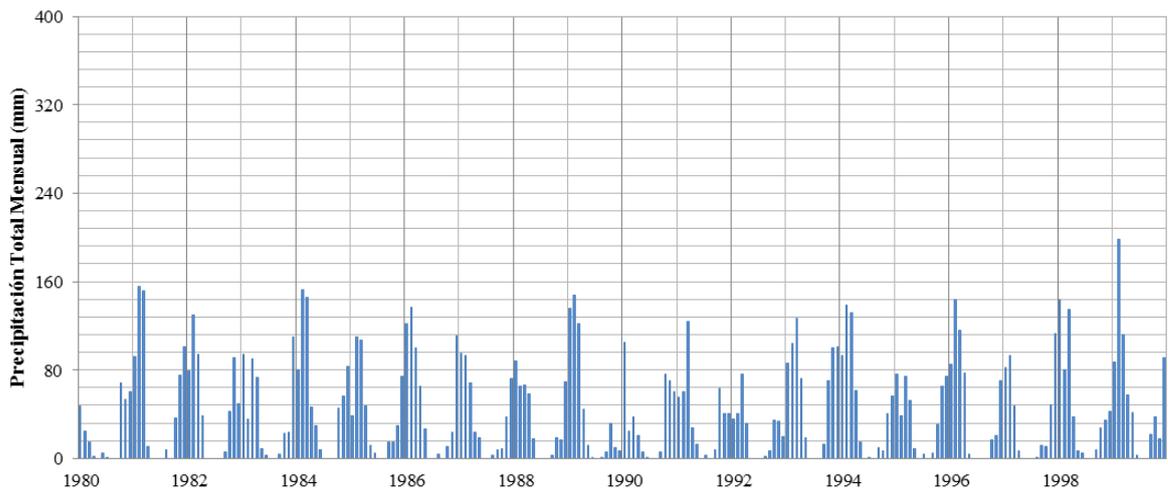
Estación Pluviométrica Paccho



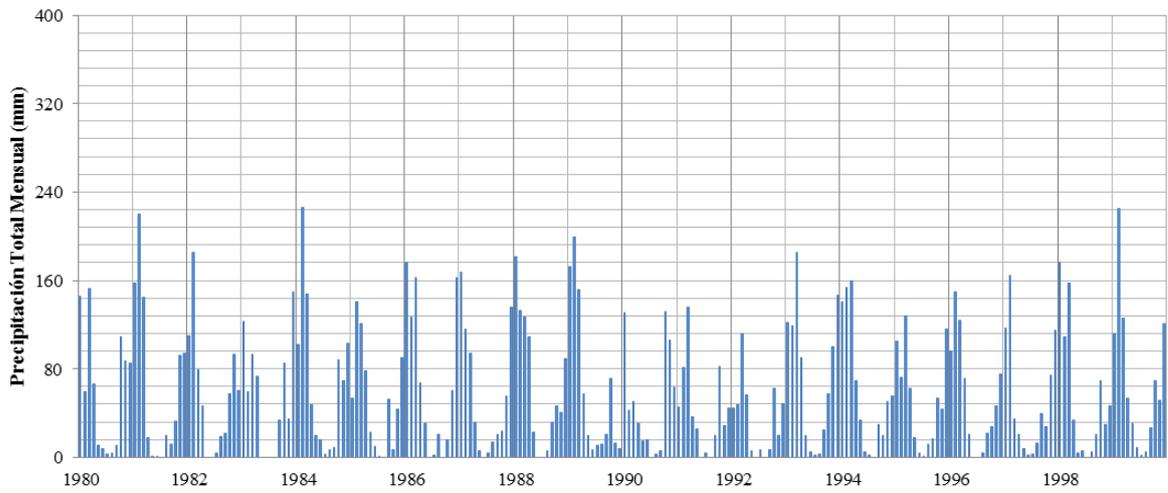
Estación Pluviométrica Parquin



Estación Pluviométrica Picoy



Estación Pluviométrica Pariacancha



Estación Pluviométrica Carampoma

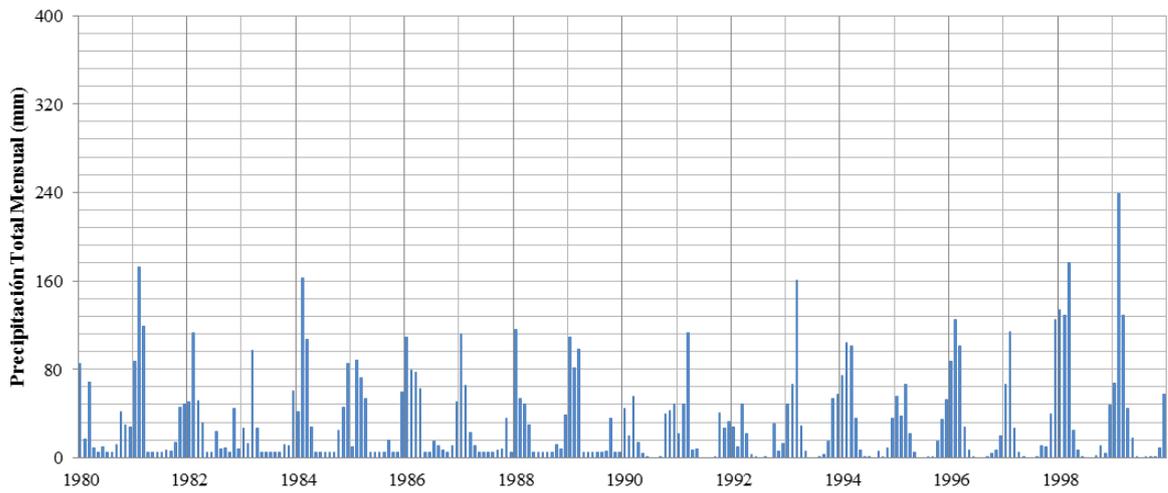
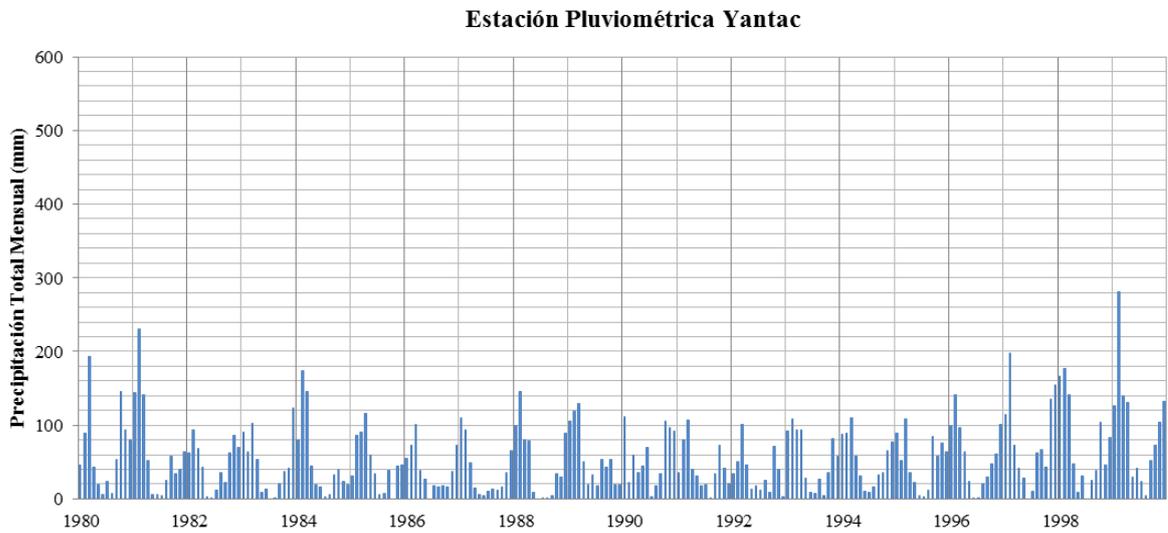


Figura 56. Histogramas de Precipitación Total Mensual para el periodo de análisis de 1980 a 1999
– Cuarta zona



Anexo 2: Regionalización de las estaciones con el método del vector regional

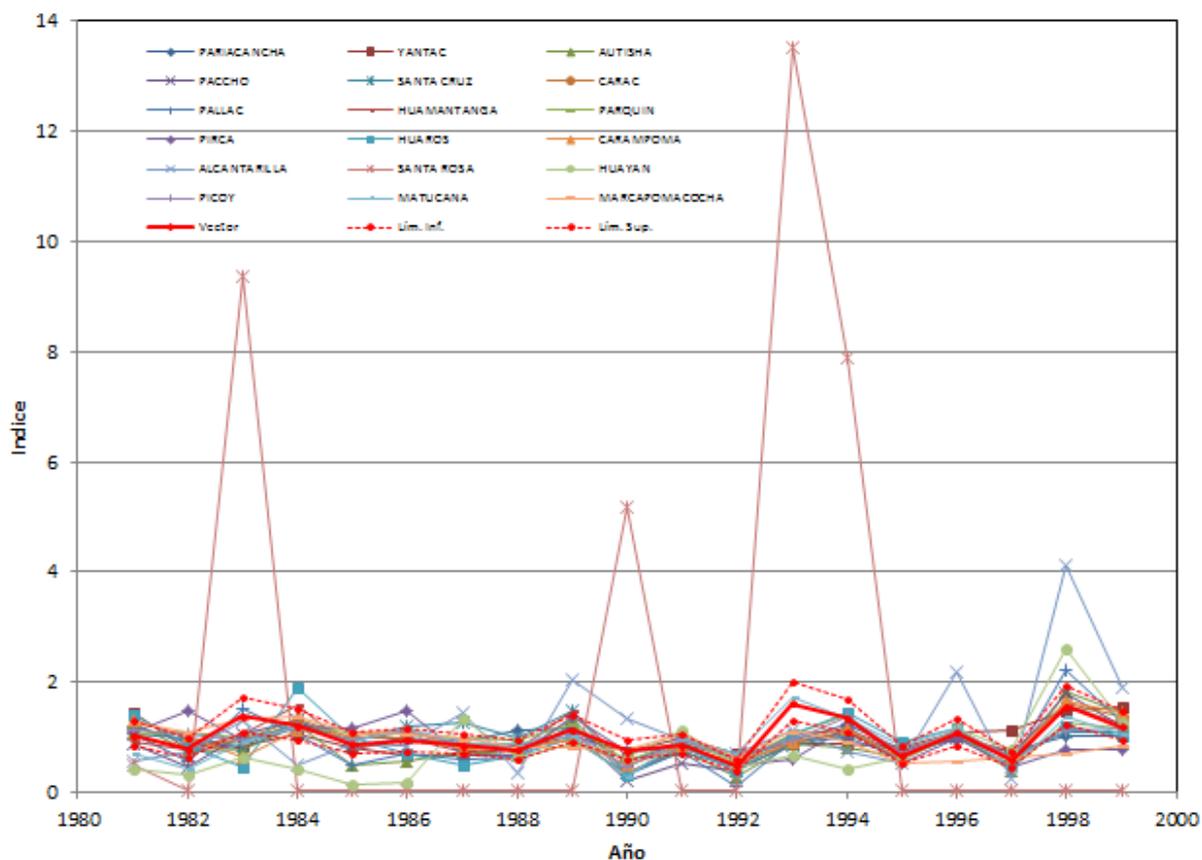


Figura 57. Variación anual del índice del vector regional con las estaciones pluviométricas de la zona de estudio por el método de BrunetMoret

.En la Tabla 22, se ubican las dieciocho estaciones y los índices del vector regional, se toma interés en la correlación con el vector y la desviación estándar (D.E) de desvíos. En la Figura 57 se observa que Santa Rosa, Huayan y Alcantarilla, cuyos valores escapan de los límites del vector regional. Además en la Figura 58 se muestra los quiebres que tienen estas tres estaciones distintas a alas de distintas a los demás. Estas tres estaciones se encuentran por debajo de los 500 m.s.n.m. y en la zona climática E (d) B'1 H3. Estos integran la primera zona climática (Grupo 1)

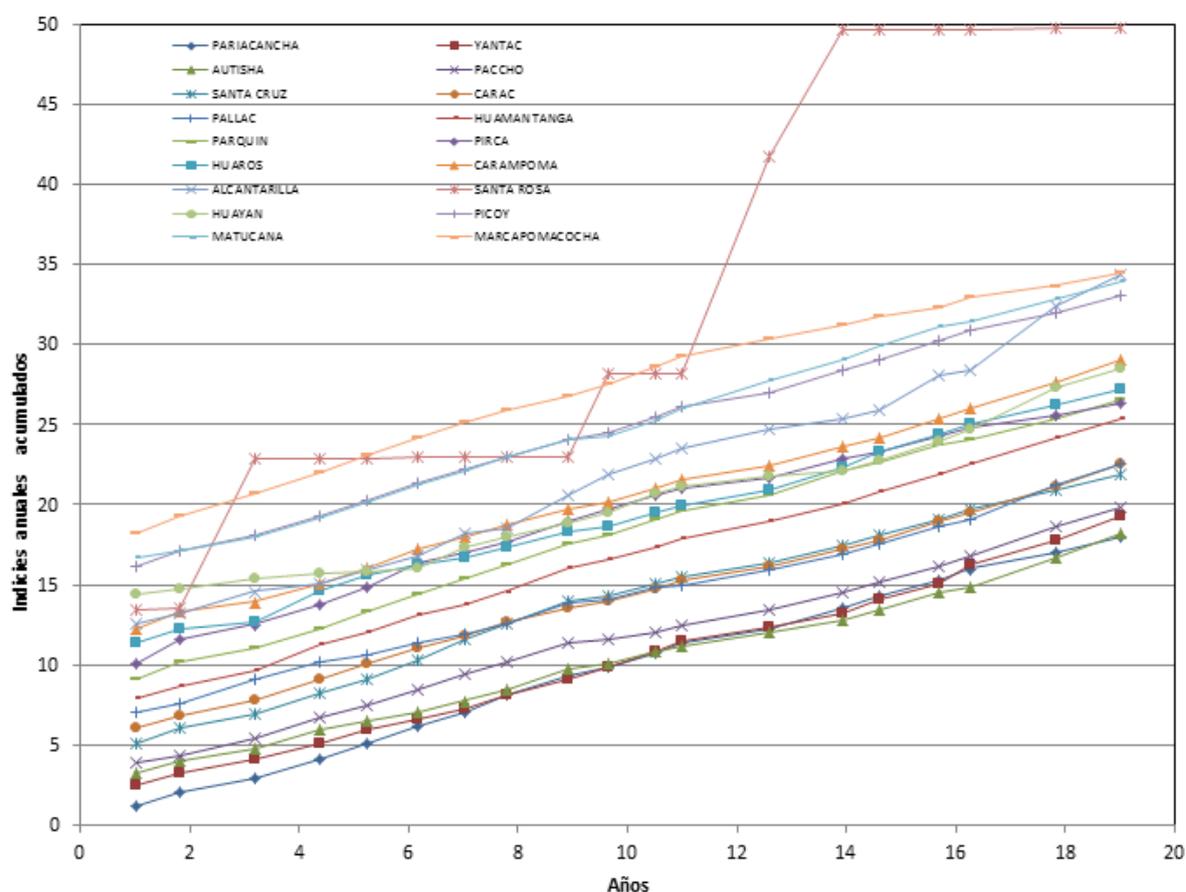


Figura 58. Variación anual del índice del vector regional en las estaciones pluviométricas de la zona de estudio.

Tabla 22. Índice anual del vector regional por cada estación pluviométrica de la zona de estudio.

Nº	Estación	Nº Años	D.E. Obs.	Coef. Variación	D.E. Desvíos	Correl. /Vector
1	PARIACANCHA	19	139.9	0.203	0.272	0.511
2	YANTAC	19	185	0.285	0.315	0.419
3	AUTISHA	19	87.2	0.486	0.321	0.711
4	PACCHO	19	229.3	0.411	0.258	0.764
5	SANTA CRUZ	19	162.2	0.302	0.308	0.47
6	CARAC	19	124.8	0.331	0.233	0.738
7	PALLAC	19	140	0.547	0.299	0.83
8	HUAMANTANGA	19	132.7	0.333	0.214	0.769
9	PARQUIN	19	184.4	0.268	0.211	0.74
10	PIRCA	19	263.7	0.364	0.397	0.248
11	HUARTOS	19	212	0.443	0.357	0.536
12	CARAMPOMA	19	124.7	0.332	0.277	0.608
13	ALCANTARILLA	19	3.7	0.769	0.779	0.547
14	SANTA ROSA	19	1.6	2.069	3.843	0.569
15	HUAYAN	19	10.2	0.742	0.574	0.37
16	PICOY	19	120.8	0.239	0.236	0.665
17	MATUCANA	19	107.2	0.377	0.225	0.786
18	MARCAPOMACOCHA	19	313.5	0.272	0.322	0.381

En la Tabla 23 se muestra los índices del vector de las quince estaciones. Con respecto a la correlación del vector y la desviación estándar (D.E) de desvíos y la Figura 59, se observa que existen 4 estaciones que están fuera de los límites. En la Figura 60 no se observa cambios notables en los índices acumulados de vector regional. Se toma la decisión de dividir en tres grupos por su relación con el vector, su altitud y zona climática. La segunda zona climática (Grupo 2) está conformado por las estaciones Autisha, Carac, Pallac y Matucana que se encuentran a una altitud menor de 2600 m.s.n.m. y en la zona climática C (o, i, p) B'2 H3, la tercera zona climática (Grupo 3) son las estaciones que se encuentran en el rango del vector, a la misma altitud e igual zona climática C (o, i, p) B'3, estos son Pariacancha, Paccho, Santa Cruz, Huamantanga, Parquin, Pirca, Huaros, Carampoma y Picoy. Finalmente, la cuarta zona climática (Grupo 4) de estaciones conformada por Yantac y Marcapomacocha que se ubican en una misma altitud menor de los 5000 m.s.n.m. y zona climática H3 B (i) D'H3.

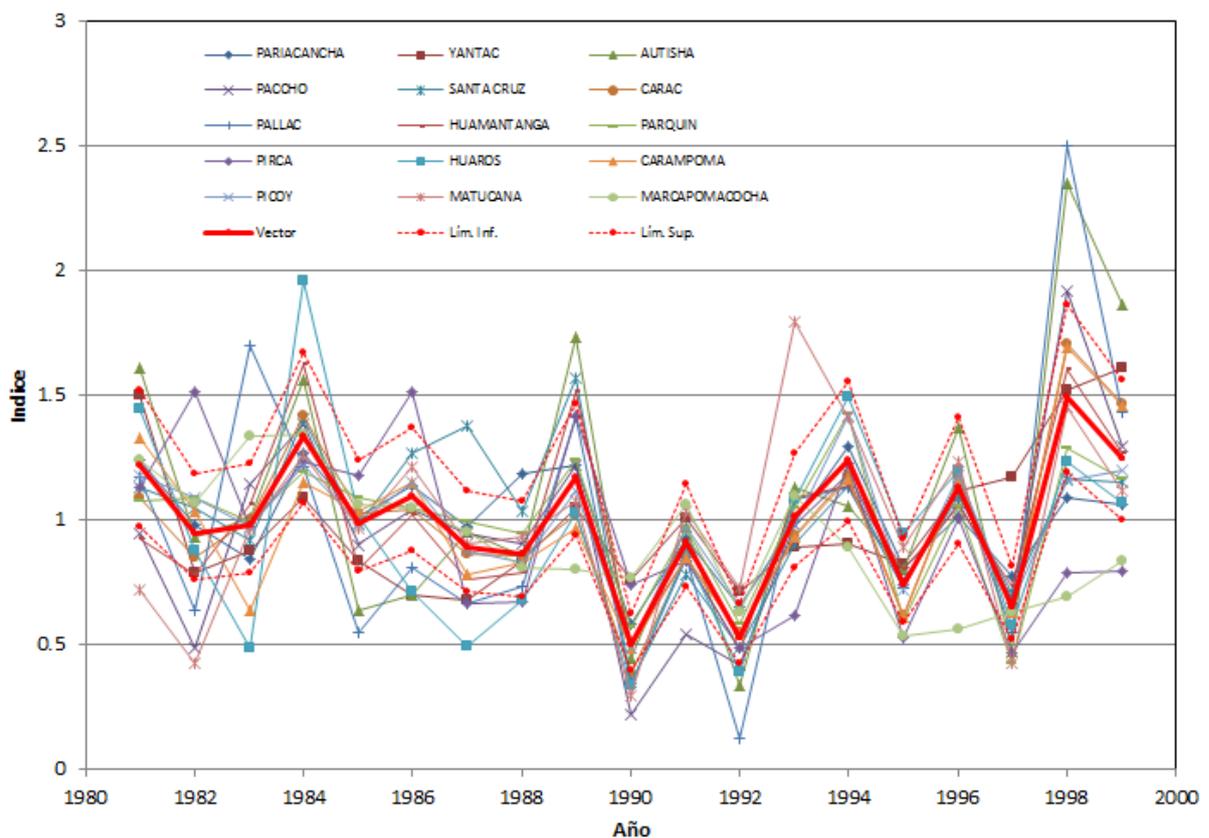


Figura 59. Variación anual del índice del vector regional con las quince estaciones pluviométricas de la zona de estudio por el método de Brunet Moret

Tabla 23. Índice anual del vector regional por cada estación pluviométrica de la zona de estudio.

Nº	Estación	Nº Años	D.E. Obs.	Coef. Variación	D.E. Desvíos	Correl. /Vector
1	PARIACANCHA	19	139.9	0.203	0.144	0.834
2	YANTAC	19	185	0.285	0.237	0.609
3	AUTISHA	19	87.2	0.486	0.333	0.87
4	PACCHO	19	229.3	0.411	0.2	0.883
5	SANTA CRUZ	19	162.2	0.302	0.186	0.788
6	CARAC	19	124.8	0.331	0.103	0.957
7	PALLAC	19	140	0.547	0.349	0.817
8	HUAMANTANGA	19	132.7	0.333	0.151	0.886
9	PARQUIN	19	184.4	0.268	0.118	0.897
10	PIRCA	19	263.7	0.364	0.3	0.529
11	HUAROS	19	212	0.443	0.265	0.785
12	CARAMPOMA	19	124.7	0.332	0.137	0.908
13	PICOY	19	120.8	0.239	0.105	0.914
14	MATUCANA	19	107.2	0.377	0.271	0.672
15	MARCAPOMACOCHA	19	313.5	0.272	0.298	0.35

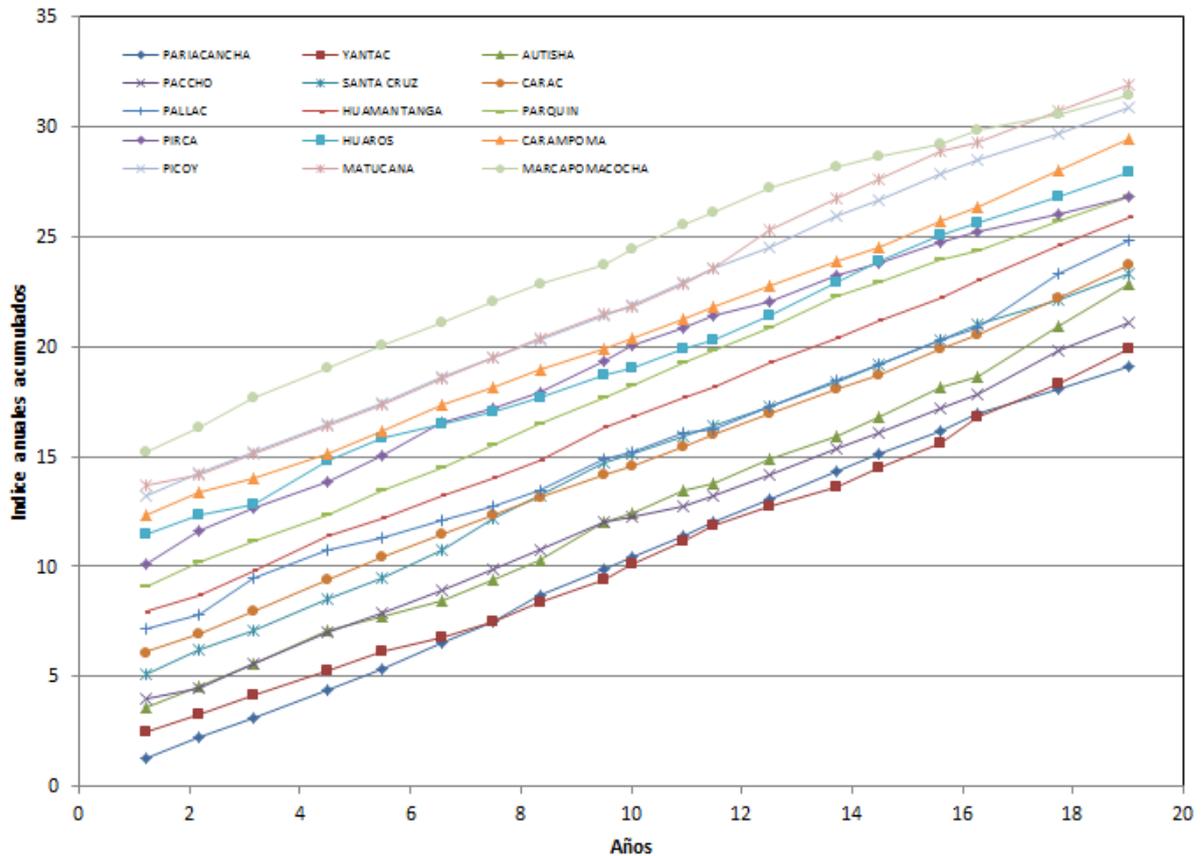


Figura 60. Variación anual del índice del vector regional en las quince estaciones pluviométricas de la zona de estudio.

Anexo 3: Variabilidad de la precipitación en la cuenca Chancay Huaral por zonas.

Tabla 24. Diferencia porcentual de la proyección de la precipitación del futuro cercano (2020 - 2039) y lejano (2080 - 2099) con el presente de la estación pluviométrica Huayan (1980 - 1999).

Meses	P1		P2		P3		P4	
Periodo	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano
Dic	-69.9	102.0	-29.1	282.7	-89.7	-97.2	-73.8	-76.5
Ene	179.8	261.4	320.4	426.6	-0.9	59.2	38.7	94.1
Feb	74.1	259.4	124.6	337.6	155.7	234.6	170.1	229.4
Mar	222.5	249.7	374.2	434.0	656.3	1054.4	890.7	1493.3
Abr	-20.3	77.5	96.1	353.7	-22.9	150.0	101.1	264.2
May	-93.2	-100.0	-78.9	-78.3	-100.0	-100.0	-79.2	-81.1
Jun	-100.0	-100.0	-96.0	-95.0	-100.0	-100.0	-91.8	-91.5
Jul	-100.0	-100.0	-98.2	-98.1	-100.0	-100.0	-93.9	-94.4
Ago	-100.0	-100.0	-98.0	-97.0	-100.0	-100.0	-93.4	-94.8
Sep	-100.0	-98.2	-93.7	-96.1	-87.5	-98.3	-74.9	-83.7
Oct	-68.2	-88.2	-60.3	-77.2	-90.8	-84.0	-59.3	-62.4
Nov	129.3	198.5	244.1	395.7	-88.4	-95.3	-60.4	-59.7

Tabla 25. Diferencia porcentual de la proyección de la precipitación del futuro cercano (2020 - 2039) y lejano (2080 - 2099) con el presente de la estación pluviométrica Santa Rosa (1980 - 1999).

Meses	P1		P2		P3		P4	
Periodo	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano
Dic	-100	-99	-98	-93	-100	-100	-100	-100
Ene	-100	-99	-98	-96	-100	-100	-99	-99
Feb	-100	-99	-99	-98	-100	-100	-99	-99
Mar	-100	-99	-98	-93	-99	-99	-97	-96
Abr	-100	-100	-99	-99	-100	-100	-99	-99
May	-100	-100	-97	-98	-100	-100	-98	-98
Jun	-100	-100	-89	-87	-100	-100	-92	-92
Jul	-100	-100	-90	-89	-100	-100	-90	-92
Ago	-100	-100	-94	-93	-100	-100	-94	-95
Sep	-100	-100	-98	-98	-100	-100	-97	-97
Oct	-100	-100	-99	-99	-100	-100	-99	-99
Nov	-100	-100	-99	-95	-100	-100	-99	-99

Tabla 26. Diferencia porcentual de la proyección de la precipitación del futuro cercano (2020 - 2039) y lejano (2080 - 2099) con el presente de la estación pluviométrica Alcantarilla (1980 - 1999).

Meses	P1		P2		P3		P4	
Periodo	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano
Dic	684	1110	1754	3962	517	587	1642	1627
Ene	117	275	1007	1426	74	221	594	716
Feb	119	312	548	1024	-17	22	301	315
Mar	75	121	543	599	-51	-33	285	311
Abr	74	80	1044	1008	31	-10	1072	1082
May	-91	-100	602	664	-73	-100	827	708
Jun	-100	-100	-64	-69	-97	-100	-50	-60
Jul	-100	-100	-61	-71	-100	-99	-64	-69
Ago	-100	-100	-43	-70	-100	-98	-28	-51
Sep	-55	-86	155	84	-48	-34	197	195
Oct	106	55	760	747	439	393	1708	1156
Nov	771	578	2665	2629	423	753	2040	1627

Tabla 27. Diferencia porcentual de la proyección de la precipitación del futuro cercano (2020 - 2039) y lejano (2080 - 2099) con el presente de la estación pluviométrica Pallac (1980 - 1999).

Meses	P1		P2		P3		P4	
	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano
Dic	34	179	42	190	-26	-22	-15	-14
Ene	64	118	68	122	17	68	22	72
Feb	8	44	10	48	35	54	36	55
Mar	12	22	15	24	34	92	34	90
Abr	168	257	187	274	36	195	61	219
May	6	12	109	130	-65	-45	65	92
Jun	-100	-100	3653	4446	-100	-100	6499	5760
Jul	-100	-100	235	169	-100	-100	289	247
Ago	-100	-100	1809	1151	2029	-100	5435	2081
Sep	358	440	586	623	551	1140	966	1415
Oct	5	28	31	48	60	-11	113	40
Nov	362	232	385	250	5	22	30	44

Tabla 28. Diferencia porcentual de la proyección de la precipitación del futuro cercano (2020 - 2039) y lejano (2080 - 2099) con el presente de la estación pluviométrica Carac (1980 - 1999).

Meses	P1		P2		P3		P4	
	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano
Dic	-12	58	-18	-86	-100	-34	-36	-37
Ene	28	80	22	-88	-98	47	7	44
Feb	27	54	26	-88	-93	46	38	48
Mar	49	64	49	-93	-90	80	44	83
Abr	63	94	44	-94	-99	129	37	113
May	-55	-44	-43	-98	-100	-20	-23	-8
Jun	-100	-78	-66	-97	-100	-90	-24	-50
Jul	-63	-89	-32	-97	-100	-66	-59	-35
Ago	-91	-29	-44	-97	-100	-82	-5	-55
Sep	-11	-7	5	-99	-97	27	37	58
Oct	-43	-53	-42	-99	-100	-56	-28	-50
Nov	114	85	110	-84	-100	-16	-16	-16

Tabla 29. Diferencia porcentual de la proyección de la precipitación del futuro cercano (2020 - 2039) y lejano (2080 - 2099) con el presente de la estación pluviométrica Matucana (1980 - 1999).

Meses	P1		P2		P3		P4	
	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano
Dic	-18	38	-11	53	-21	-21	-18	-16
Ene	-23	4	-19	11	-36	-9	-34	-5
Feb	-49	-38	-45	-34	-58	-55	-59	-55
Mar	-48	-41	-44	-40	-73	-73	-71	-72
Abr	-41	-36	-37	-33	-50	-59	-46	-55
May	-74	-54	-61	-38	-41	-45	-26	-29
Jun	-89	-99	-58	-65	13	-46	33	-14
Jul	-99	-60	-54	-25	-62	51	-28	81
Ago	-25	33	17	64	55	-37	85	-20
Sep	59	24	82	42	59	31	81	59
Oct	-11	-19	1	-11	21	-18	27	-10
Nov	31	28	40	35	-12	-33	-5	-26

Tabla 30. Diferencia porcentual de la proyección de la precipitación del futuro cercano (2020 - 2039) y lejano (2080 - 2099) con el presente de la estación pluviométrica Autisha (1980 - 1999).

Meses	P1		P2		P3		P4	
	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano
Dic	-55	-17	-48	10	-64	-72	-66	-69
Ene	-41	-34	-30	-22	-63	-55	-64	-51
Feb	-62	-53	-57	-41	-59	-57	-57	-53
Mar	-59	-58	-53	-53	-58	-52	-59	-54
Abr	-71	-72	-69	-69	-77	-71	-76	-70
May	-99	-93	-89	-83	-97	-97	-86	-86
Jun	-100	-100	-87	-88	-100	-96	-84	-81
Jul	-100	-100	-86	-90	-100	-100	-84	-84
Ago	-100	-100	-87	-90	-99	-100	-78	-90
Sep	-88	-86	-74	-77	-54	-53	-34	-24
Oct	-79	-76	-76	-68	-64	-69	-57	-59
Nov	-26	-39	-25	-12	-61	-64	-57	-57

Tabla 31. Diferencia porcentual de la proyección de la precipitación del futuro cercano (2020 - 2039) y lejano (2080 - 2099) con el presente de la estación pluviométrica Santa Cruz (1980 - 1999).

Meses	P1		P2		P3		P4	
	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano
Dic	29	105	35	117	35	42	35	43
Ene	69	120	69	130	56	93	56	95
Feb	35	52	39	67	21	25	21	26
Mar	48	67	51	74	25	46	24	46
Abr	75	104	74	101	40	82	39	78
May	-56	-41	-48	-33	-51	-47	-40	-38
Jun	-100	-88	-76	-65	-55	-82	-29	-58
Jul	-97	-99	-88	-92	-88	-95	-80	-88
Ago	-94	-95	-86	-90	-82	-86	-72	-81
Sep	-51	-63	-46	-58	10	-14	18	-7
Oct	-59	-60	-55	-59	-1	-11	1	-10
Nov	64	51	76	58	25	34	27	36

Tabla 32. Diferencia porcentual de la proyección de la precipitación del futuro cercano (2020 - 2039) y lejano (2080 - 2099) con el presente de la estación pluviométrica Pirca (1980 - 1999).

Meses	P1		P2		P3		P4	
	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano
Dic	-1	55	2	61	3	7	5	9
Ene	22	57	25	63	13	38	16	40
Feb	19	32	23	39	8	10	9	12
Mar	9	22	14	27	-7	6	-5	8
Abr	84	111	89	118	49	88	51	93
May	21	64	24	60	26	45	37	47
Jun	-90	163	199	462	895	337	1185	606
Jul	0	0	0	0	0	0	0	0
Ago	-66	-74	-56	-68	-22	-39	-6	-24
Sep	115	61	127	72	342	248	362	258
Oct	-18	-20	-14	-18	92	74	98	79
Nov	120	104	127	107	69	79	72	82

Tabla 33. Diferencia porcentual de la proyección de la precipitación del futuro cercano (2020 - 2039) y lejano (2080 - 2099) con el presente de la estación pluviométrica Huamantanga (1980 - 1999).

Meses	P1		P2		P3		P4	
	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano
Dic	102	222	98	280	96	76	68	55
Ene	70	90	91	118	33	46	31	54
Feb	6	16	20	48	5	5	10	13
Mar	16	24	22	38	12	19	8	22
Abr	153	178	99	111	121	152	42	72
May	-5	71	-28	8	-8	3	-24	-24
Jun	-95	-92	-34	-35	-90	-81	-49	-44
Jul	-94	-93	-36	-42	-87	-79	-57	-55
Ago	-66	-86	-15	-31	-28	-62	-14	-43
Sep	31	18	18	10	104	48	73	67
Oct	2	16	-13	3	92	94	47	50
Nov	209	190	200	192	114	113	75	82

Tabla 34. Diferencia porcentual de la proyección de la precipitación del futuro cercano (2020 - 2039) y lejano (2080 - 2099) con el presente de la estación pluviométrica Huaros (1980 - 1999).

Meses	P1		P2		P3		P4	
	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano
Dic	56	127	59	155	62	59	47	48
Ene	58	86	58	102	42	65	28	66
Feb	17	27	20	52	0	1	-19	-5
Mar	11	24	15	28	-8	-7	-24	-24
Abr	41	52	20	20	38	39	1	-1
May	6	69	-7	29	76	87	39	21
Jun	-82	-71	-7	-12	-12	-10	15	5
Jul	-80	-87	-36	-45	-54	-47	-36	-25
Ago	28	-47	38	-18	80	59	50	46
Sep	178	82	119	48	267	189	240	140
Oct	58	66	43	45	170	162	135	124
Nov	129	116	134	114	79	99	60	86

Tabla 35. Diferencia porcentual de la proyección de la precipitación del futuro cercano (2020 - 2039) y lejano (2080 - 2099) con el presente de la estación pluviométrica Pariacancha (1980 - 1999).

Meses	P1		P2		P3		P4	
	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano
Dic	25	86	33	101	26	26	29	27
Ene	21	45	26	55	5	28	6	29
Feb	6	18	11	29	-15	-11	-15	-9
Mar	19	34	25	42	-7	-5	-8	-6
Abr	43	55	51	58	33	33	34	34
May	-46	-11	-33	4	-5	-8	7	4
Jun	-92	-83	-68	-63	-48	-55	-26	-30
Jul	-80	-82	-43	-52	-47	-18	-15	8
Ago	-45	-78	-27	-65	-29	-21	-9	-12
Sep	3	-33	12	-26	43	6	54	17
Oct	-20	-17	-15	-11	38	32	39	33
Nov	91	80	106	89	41	62	47	65

Tabla 36. Diferencia porcentual de la proyección de la precipitación del futuro cercano (2020 - 2039) y lejano (2080 - 2099) con el presente de la estación pluviométrica Parquín (1980 - 1999).

Meses	P1		P2		P3		P4	
	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano
Dic	16	86	14	85	36	34	36	32
Ene	6	49	6	47	15	45	13	39
Feb	29	52	29	48	13	21	11	18
Mar	22	41	23	42	1	22	1	21
Abr	12	25	13	26	5	39	8	41
May	-36	-6	-31	-3	-10	-15	3	-2
Jun	-59	-22	-42	-7	57	-8	89	23
Jul	-37	-67	-22	-51	-32	-52	-4	-26
Ago	69	176	108	200	206	132	289	175
Sep	83	43	89	51	145	85	161	93
Oct	-26	-35	-26	-33	44	22	43	24
Nov	64	65	61	63	33	28	33	27

Tabla 37. Diferencia porcentual de la proyección de la precipitación del futuro cercano (2020 - 2039) y lejano (2080 - 2099) con el presente de la estación pluviométrica Carampoma (1980 - 1999).

Meses	P1		P2		P3		P4	
	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano
Dic	32	110	23	132	34	16	8	-2
Ene	23	39	31	59	0	15	-14	22
Feb	-18	-10	-16	7	-21	-21	-35	-29
Mar	-14	-6	-19	-11	-23	-22	-48	-46
Abr	4	9	-36	-40	2	0	-42	-47
May	-48	13	-77	-57	14	-7	-62	-55
Jun	-74	-71	-14	-20	-6	-3	-16	-14
Jul	-74	-75	8	7	-19	26	4	27
Ago	63	6	12	-9	90	-3	17	-14
Sep	178	122	34	29	184	148	49	118
Oct	49	62	0	3	93	75	23	12
Nov	139	134	103	99	68	42	16	-12

Tabla 38. Diferencia porcentual de la proyección de la precipitación del futuro cercano (2020 - 2039) y lejano (2080 - 2099) con el presente de la estación pluviométrica Picoy (1980 - 1999).

Meses	P1		P2		P3		P4	
	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano
Dic	25	107	25	109	49	49	48	47
Ene	-3	40	-2	41	8	38	6	33
Feb	-5	15	-4	15	-17	-10	-18	-12
Mar	-4	13	-2	16	-20	-2	-21	-3
Abr	-3	10	-2	12	-8	24	-6	24
May	-46	-22	-34	-12	-18	-25	-1	-9
Jun	-78	-54	-58	-29	8	-46	40	-13
Jul	-70	-86	-49	-63	-61	-67	-33	-41
Ago	-53	-12	-27	4	-1	-17	39	7
Sep	146	92	170	109	243	162	272	178
Oct	71	47	76	53	241	189	243	193
Nov	201	204	199	206	145	137	146	138

Tabla 39. Diferencia porcentual de la proyección de la precipitación del futuro cercano (2020 - 2039) y lejano (2080 - 2099) con el presente de la estación pluviométrica Paccho (1980 - 1999).

Meses	P1		P2		P3		P4	
	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano
Período								
Dic	13	70	0	55	34	-4	-4	-4
Ene	19	61	0	47	20	42	-2	43
Feb	15	21	0	9	11	14	-1	14
Mar	43	49	0	7	20	30	2	30
Abr	107	134	0	20	92	114	25	114
May	126	190	0	19	249	202	107	202
Jun	84	113	0	2	206	277	133	277
Jul	388	143	0	-49	10	63	-12	63
Ago	194	134	0	18	60	-20	51	-20
Sep	158	161	0	-3	125	32	44	32
Oct	-3	-20	0	-17	43	-12	-18	-12
Nov	108	64	0	-27	25	-8	-25	-8

Tabla 40. Diferencia porcentual de la proyección de la precipitación del futuro cercano (2020 - 2039) y lejano (2080 - 2099) con el presente de la estación pluviométrica Yantac (1980 - 1999).

Meses	P1		P2		P3		P4	
	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano
Período								
Dic	69	113	80	134	73	72	75	75
Ene	17	23	23	33	9	29	11	31
Feb	-25	-26	-22	-17	-40	-35	-39	-34
Mar	-21	-21	-17	-16	-41	-41	-40	-41
Abr	7	-6	9	-4	22	11	23	12
May	60	70	56	60	180	169	194	179
Jun	121	128	115	119	337	319	388	367
Jul	294	150	282	167	212	169	259	223
Ago	714	307	677	308	672	415	724	450
Sep	799	460	783	441	748	638	787	680
Oct	287	246	298	253	376	352	396	356
Nov	256	176	282	187	184	241	192	253

Tabla 41. Diferencia porcentual de la proyección de la precipitación del futuro cercano (2020 - 2039) y lejano (2080 - 2099) con el presente de la estación pluviométrica Marcapomacocha (1980 - 1999).

Meses	P1		P2		P3		P4	
	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano	Cercano	Lejano
Período								
Dic	188	260	196	274	200	198	202	201
Ene	98	107	105	114	89	118	90	119
Feb	27	26	29	29	6	13	7	14
Mar	34	34	36	36	5	4	7	5
Abr	86	66	87	66	115	96	117	98
May	207	232	189	202	428	394	442	406
Jun	380	368	307	316	773	712	823	770
Jul	706	422	616	377	508	458	561	512
Ago	1472	704	1365	644	1357	861	1415	897
Sep	1516	938	1495	897	1404	1227	1430	1263
Oct	571	509	573	517	721	686	731	696
Nov	508	380	529	387	404	492	410	497