

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**“PRECIPITACIÓN ESTIMADA Y SEQUÍA METEOROLÓGICA
FUTURA EN LA CUENCA RÍO GRANDE MEDIANTE EL MODELO
DE CIRCULACIÓN GLOBAL MRI”**

Presentada por:

KERLY SILVANA SEGOVIA INGA

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE:

Ingeniero Agrícola

Lima – Perú

2016

DEDICATORIA

A mi madre:

Por su incondicional apoyo y enseñanza de perseverancia en la vida.

AGRADECIMIENTO

Mis agradecimientos a la Dra. Lía Ramos y al Ing. Ricardo Apacla, por su apoyo y guía durante la realización de la presente investigación. Igualmente un especial agradecimiento al Ing. Carlos Bravo por su gran apoyo y contribución en mi formación profesional.

A mis amigas de la carrera por los conocimientos compartidos y el apoyo durante esta etapa.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO.....	ii
ÍNDICE GENERAL.....	iii
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVOS.....	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1 SISTEMA CLIMÁTICO.....	3
2.2 CIRCULACIÓN GENERAL ATMOSFÉRICA.....	4
2.3 MODELOS DE SIMULACIÓN ATMOSFÉRICA	6
2.3.1 TIPOS DE MODELOS	7
2.4 REDUCCIÓN DE ESCALA ESTADÍSTICO	10
2.5 MODELO MRI-AGCM	13
2.6 ESCENARIOS CLIMATICOS	17
2.7 SEQUÍA	19
2.7.1 CARACTERIZACIÓN DE SEQUÍAS.....	20
2.7.2 ÍNDICES DE SEQUÍAS	21
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	23
3.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	23
3.1.1 PRECIPITACIÓN REGISTRADA.....	25
3.1.2 PRECIPITACIÓN ESTIMADA DEL MODELO MRI-AGCM	25
3.2 MATERIALES Y PROGRAMAS DE CÓMPUTO.....	26
3.3 METODOLOGÍA	26
3.3.1 ANÁLISIS EXPLORATORIO Y CONSISTENCIA DE DATOS	28
3.3.2 REDUCCIÓN DE ESCALA DE LA PRECIPITACIÓN ESTIMADA DEL MODELO MRI-AGCM.....	31

3.3.3 ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LA PRECIPITACIÓN REGISTRADA Y ESTIMADA DE MODELO MRI-AGCM	34
3.3.4 EVALUACIÓN DE LA SEQUÍA METEOROLÓGICA FUTURA	36
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
4.1 ANÁLISIS EXPLORATORIO Y CONSISTENCIA DE DATOS.....	38
4.2 REDUCCIÓN DE ESCALA DE LA PRECIPITACIÓN ESTIMADA DEL MODELO MRI-AGCM	42
4.3 ANÁLISIS DE LA PRECIPITACION REGISTRADA Y ESTIMADA DEL MODELO MRI	45
4.3.1 DEPENDENCIA PUNTUAL	45
4.3.2 DEPENDENCIA ESPACIAL.....	46
4.4 EVALUACIÓN DE LA SEQUÍA METEOROLÓGICA FUTURA	55
4.2.1 PORCENTAJE DE PRECIPITACIÓN NORMAL (PPN).....	55
4.2.2 ÍNDICE DE PRECIPITACIÓN ESTANDARIZADA (SPI).....	58
4.2.3 ÍNDICE Z-SCORE.....	75
V. CONCLUSIONES.....	79
VI. RECOMENDACIONES.....	80
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81
VIII. ANEXOS.....	86

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Especificaciones del anterior y nuevo modelo, MRI 3.1S y MRI 3.2S.....	15
Cuadro 2: Categorización de los índices de sequía utilizados en el estudio.....	21
Cuadro 3: Valores del Índice Estandarizada de Precipitación.....	22
Cuadro 4: Estaciones meteorológicas de la cuenca de estudio.....	25
Cuadro 5: Descripción de los programas de cómputo a utilizar.....	26
Cuadro 6: Características del archivo Raster para generar los archivos ASCII.....	32
Cuadro 7: Notación usada en el tratamiento de los productos del modelo MRI.....	36
Cuadro 8: Intensidades promedio de sequía meteorológica para una escala de tiempo de 3, 6 y 12 meses en la estación Córdova.....	70

Cuadro 9: Intensidades promedio de sequía meteorológica para una escala de tiempo de 3, 6 y 12 meses en la estación Llauta	71
Cuadro 10: Intensidades promedio de sequía meteorológica para una escala de tiempo de 3, 6 y 12 meses en la estación Lucanas	72
Cuadro 11: Frecuencia de ocurrencia de los eventos de sequía para una escala de tiempo de 3, 6 y 12 meses.....	74
Cuadro 12: Índices de calidad de las estaciones.....	87

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de los componentes del sistema climático, sus procesos e interacciones	3
Figura 2: Célula convectiva resultado de considerar un modelo de Tierra homogénea y la radiación solar incidente sobre ella	4
Figura 3: Modelo de tres células en una Tierra rodante. 1: Célula Hadley, 2: Célula Ferrel, 3: Célula Polar.....	5
Figura 4: Esquema de los procesos ocurridos dentro de cada cuadrícula tridimensional representados por un Modelo Global de Atmósfera.....	8
Figura 5: Rejilla global utilizada por GCM. Izquierda: modelo truncado a 144 nodos con una resolución horizontal de 2.5°. Derecha: resolución vertical expresado en niveles o presión (mb)	9
Figura 6: Precipitaciones monzónicas observadas y simuladas en China por un Modelo Climático Regional (MCR) y Modelo Climático Global (GCM)	9
Figura 7: Esquema de la reducción de escala adaptadas a los modelos globales.....	11
Figura 8: Función de distribución acumulada	13
Figura 9: Diseño del experimento mediante el método del Time Slice, en base a la Temperatura Superficial de Mar (TSM).....	16
Figura 10: Cambios en la temperatura media global de la superficie bajo un escenario de bajas emisiones RCP 2.6 y de altas emisiones RCP8.5.....	17
Figura 11: Cambio de la precipitación media anual expresado en porcentaje (2081-2100) para los cuatro escenarios RCP	19
Figura 12: Altimetría de la cuenca río Grande, ubicación de las estaciones pluviométricas y la red hidrográfica.....	24

Figura 13: Esquema metodológico empleado en el presente estudio para lograr los objetivos planteados	27
Figura 14: Proceso de obtención de datos MRI y reducción de escala	32
Figura 15: Esquema de conversión de la información pluviométrica a archivos ASCII	33
Figura 16. Diagrama de flujo del Modelo builder para la interpolación, recorte de la cuenca y conversión a archivos ASCII, usando el software ArcGIS	34
Figura 17: Izquierda: Regionalización de estaciones según el Mapa de Clasificación Climática realizada por el SENAMHI: E (d) B'1 H3, árido con deficiencia de lluvias, de temperatura semicalido y húmedo; C (o,i,p) B'2 H3, semiseco con otoño, invierno y primavera seca, con temperatura templado y húmedo; y, B (o,i) D' H3, lluvioso con otoño e invierno seco, semifrigido y húmedo. Margen Derecho: Regionalización de estaciones según altimetría de la zona de estudio.....	40
Figura 18: Índices anuales del Vector y las estaciones del Grupo 2 (Panel superior) y Grupo 3 (Panel inferior)	41
Figura 19: Suma de los Índices anuales del Vector y las estaciones del Grupo 2 (Panel superior) y Grupo 3 (Panel inferior).....	42
Figura 20: Histogramas de Función de densidad de probabilidad para las comparaciones: a) S1, b) S2, c) S3 y d) S4 - Estación Córdova	43
Figura 21: Histogramas de Función de densidad de probabilidad para las comparaciones: a) S1, b) S2, c) S3 y d) S4 - Estación Llauta	44
Figura 22: Histogramas de Función de densidad de probabilidad para las comparaciones: a) S1, b) S2, c) S3 y d) S4 - Estación Lucanas.....	44
Figura 23: Coeficiente de correlación mensual de Pearson entre la precipitación registrada y estimada del modelo MRI. Periodo de análisis: Enero de 1980 a Diciembre de 1999.....	45
Figura 24. Correlación entre los campos de precipitación mensual de la precipitación registrada y estimada del modelo MRI para las comparaciones S1, S2, S3 y S4.....	46
Figura 25: Histogramas de la precipitación mensual observada y estimada de Modelo de Circulación Global (GCM) MRI en la estación Córdova a una altitud de 3069 msnm	47

Figura 26: Histogramas de la precipitación mensual observada y estimada de Modelo de Circulación Global (GCM) MRI en la estación Llauta a una altitud de 3043 msnm	48
Figura 27: Histogramas de la precipitación mensual observada y estimada de Modelo de Circulación Global (GCM) MRI en la estación Lucanas a una altitud de 3297 msnm	49
Figura 28. “Box plot” de la correlación mensual espacial para las comparaciones S1, S2, S3 y S4, con la mediana (línea roja), los cuartiles a 25 y 75 por ciento (caja), el valor máximo y mínimo (línea de color negro), y valores “outliers” (cruces rojas).....	50
Figura 29: Campos de precipitación mensual To (Pluviómetro), T1 (MRI 3.1S) y T2 (MRI 3.2S) de la mejor correlación S1 (To – T1) y S2 (To – T2)	53
Figura 30: Campos de precipitación mensual pluviométrica To (Pluviómetro), T3 (MRI 3.1S-CDF) y T4 (MRI 3.2S-CDF) de la mejor correlación S3 (To – T3) y S4 (To – T4).....	54
Figura 31: Correlación promedio mensual para la comparación S1, S2 S3 y S4.....	52
Figura 32: Histogramas del Porcentaje de Precipitación Normal (PPN) para una escala 12 meses en la estación Córdova: a) Presente (1980 a 1999), b) Futuro cercano (2020 a 2039) y c) Futuro lejano (2080 a 2099); para los productos T3 y T4.	56
Figura 33: Histogramas del índice Porcentaje de precipitación normal (PPN) para una escala 12 meses en la estación Llauta: a) Presente (1980 a 1999), b) Futuro cercano (2020 a 2039) y c) Futuro lejano (2080 a 2099)	57
Figura 34: Histogramas del índice Porcentaje de precipitación normal (PPN) para una escala 12 meses en la estación Lucanas: a) Presente (1980 a 1999), b) Futuro cercano (2020 a 2039) y c) Futuro lejano (2080 a 2099)	58
Figura 35: Evolución del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) para 3, 6 y 12 meses en la estación Córdova. Periodo presente (1980-1999) y futuro cercano (2020-2039)	63
Figura 36: Evolución del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) para 3, 6 y 12 meses en la estación Córdova. Periodo presente (1980-1999) y futuro lejano (2080-2099)	64

Figura 37: Evolución del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) para 3, 6 y 12 meses en la estación Llauta. Periodo presente (1980-1999) y futuro cercano (2020-2039)	65
Figura 38: Evolución del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) para 3, 6 y 12 meses en la estación Llauta. Periodo presente (1980-1999) y futuro cercano (2080-2099)	66
Figura 39: Evolución del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) para 3, 6 y 12 meses en la estación Lucanas. Periodo presente (1980-1999) y futuro cercano (2020-2039)	67
Figura 40: Evolución del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) para 3, 6 y 12 meses en la estación Lucanas. Periodo presente (1980-1999) y futuro lejano (2080-2099)	68
Figura 41: Frecuencia de eventos de sequía (%) según magnitud para el periodo a) futuro cercano (2020-2039) y b) futuro lejano (2080-2999), para las estaciones del grupo 2 y 3: Córdova, Llauta y Lucanas (Izquierda a Derecha).....	73
Figura 42: Diagramas de dispersión de SPI y Z score para la estación Córdova para 3, 6 y 12 meses (de izquierda a derecha); y el periodo a) presente (1980), b) futuro cercano (2020-2039) y c) futuro lejano (2080-2099)	76
Figura 43: Diagramas de dispersión de SPI y Z score para la estación Llauta para 3, 6 y 12 meses (de izquierda a derecha); y el periodo a) presente (1980), b) futuro cercano (2020-2039) y c) futuro lejano (2080-2099)	77
Figura 44: Diagramas de dispersión de SPI y Z score para la estación Lucanas para 3, 6 y 12 meses (de izquierda a derecha); y el periodo a) presente (1980), b) futuro cercano (2020-2039) y c) futuro lejano (2080-2099)	78
Figura 45: Índices anuales del Vector y las estaciones	86
Figura 46: Suma de los Índices anuales del Vector y las estaciones.....	86
Figura 47: Histogramas de Función de densidad de probabilidad para (a) S1, (b) S2, (c) S3 y (d) S4 – Estación Malluchimpana	88
Figura 48: Histogramas de Función de densidad de probabilidad para. (a) S1, (b) S2, (c) S3 y (d) S4 – Estación Otoa.....	88
Figura 49: Histogramas de Función de densidad de probabilidad para. (a) S1, (b) S2, (c) S3 y (d) S4 – Estación Pampa Blanca	89
Figura 50: Histogramas de Función de densidad de probabilidad para (a) S1, (b) S2, (c) S3 y (d) S4 – Estación Puquio.....	89

Figura 51: Histogramas de Función de densidad de probabilidad para (a) S1, (b) S2, (c) S3 y (d) S4 – Estación San Juan de Huirpachanca.....	90
Figura 52: Histogramas de Función de densidad de probabilidad para (a) S1, (b) S2, (c) S3 y (d) S4 – Estación Santiago de Chocorvos	90
Figura 53: Histogramas de la lluvia observada y estimada del modelo MRI, a escala mensual - estación Malluchimpana.	91
Figura 54: Histogramas de la lluvia observada y estimada del modelo MRI, a escala mensual - estación Otoa.....	92
Figura 55: Histogramas de la lluvia observada y estimada del modelo MRI, a escala mensual - estación Pampa Blanca.	93
Figura 56: Histogramas de la lluvia observada y estimada del modelo MRI, a escala mensual - estación Puquio.	94
Figura 57: Histogramas de la lluvia observada y estimada del modelo MRI, a escala mensual - estación San Juan de Huirpachanca.	95
Figura 58: Histogramas de la lluvia observada y estimada del modelo MRI, a escala mensual - estación Santiago de Chocorvos	96
Figura 59: Evolución del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) para 3, 6 y 12 meses en la estación Malluchimpana. Periodo presente (1980-1999) y futuro cercano (2020-2039).....	97
Figura 60: Evolución del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) para 3, 6 y 12 meses en la estación Malluchimpana. Periodo presente (1980-1999) y futuro lejano (2080-2099)	98
Figura 61: Evolución del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) para 3, 6 y 12 meses en la estación Otoa. Periodo presente (1980-1999) y futuro cercano (2020-2039)	99
Figura 62: Evolución del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) para 3, 6 y 12 meses en la estación Otoa. Periodo presente (1980-1999) y futuro lejano (2080-2099)	100
Figura 63: Evolución del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) para 3, 6 y 12 meses en la estación Pampa Blanca. Periodo presente (1980-1999) y futuro cercano (2020-2039).....	101
Figura 64: Evolución del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) para 3, 6 y 12 meses en la estación Pampa Blanca. Periodo presente (1980-1999) y futuro lejano (2080-2099)	102

Figura 65: Evolución del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) para 3, 6 y 12 meses en la estación Puquio: Periodo presente (1980-1999) y futuro cercano (2020-2039)	103
Figura 66: Evolución del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) para 3, 6 y 12 meses en la estación Puquio. Periodo presente (1980-1999) y futuro lejano (2080-2099)	104
Figura 67: Evolución del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) para 3, 6 y 12 meses en la estación San Juan de Huirpachanca. Periodo presente (1980-1999) y futuro cercano (2020-2039)	105
Figura 68: Evolución del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) para 3, 6 y 12 meses en la estación San Juan de Huirpachanca. Periodo presente (1980-1999) y futuro lejano (2080-2099).....	106
Figura 69: Evolución del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) para 3, 6 y 12 meses en la estación Santiago de Chocorvos. Periodo presente (1980-1999) y futuro cercano (2020-2039)	107
Figura 70: Evolución del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) para 3, 6 y 12 meses en la estación Santiago de Chocorvos. Periodo presente (1980-1999) y futuro lejano (2080-2099).....	108
Figura 71: Diagramas de dispersión de SPI y Z score para la estación Malluchimpana para 3, 6 y 12 meses (de izquierda a derecha); y el periodo a) presente (1980-1999), b) futuro cercano (2020-2039) y c) futuro lejano (2080-2099).....	109
Figura 72: Diagramas de dispersión de SPI y Z score para la estación Otoa para 3, 6 y 12 meses (de izquierda a derecha); y el periodo a) presente (1980-1999), b) futuro cercano (2020-2039) y c) futuro lejano (2080-2099)	110
Figura 73: Diagramas de dispersión de SPI y Z score para la estación Pampa Blanca para 3, 6 y 12 meses (de izquierda a derecha); y el periodo a) presente (1980-1999), b) futuro cercano (2020-2039) y c) futuro lejano (2080-2099).....	111
Figura 74: Diagramas de dispersión de SPI y Z score para la estación Puquio para 3, 6 y 12 meses (de izquierda a derecha); y el periodo a) presente (1980-1999), b) futuro cercano (2020-2039) y c) futuro lejano (2080-2099)	112
Figura 75: Diagramas de dispersión de SPI y Z score para la estación San Juan de Huirpachanca para 3, 6 y 12 meses (de izquierda a derecha); y el periodo a) presente (1980-1999), b) futuro cercano (2020-2039) y c) futuro lejano (2080-2099).....	113

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1 : Regionalización de las estaciones con el Método del Vector Regional.	86
ANEXO 2: Histogramas de probabilidad para las comparaciones S1, S2, S3 y S4.; a escala mensual.....	88
ANEXO 3. Histogramas de la lluvia observada y MRI 3.1S, 3.2S, 3.1S-CDF y 3.2S-CDF, a escala mensual.	91
ANEXO 4: Evolución del índice de precipitación estandarizada (SPI) para 3, 6 y 12 meses.	97
ANEXO 5: Diagramas de dispersión de SPI y Z score para 3, 6 y 12 meses (de izquierda a derecha). Periodo presente (1980-1999), futuro cercano (2020-2039) y futuro lejano (2080-2099).....	109

RESUMEN

En la actualidad se han realizado diversos estudios enfocados al desarrollo de Modelos de Circulación Global con el fin de obtener una estimación de la lluvia a escala regional principalmente en cuencas poco o nada instrumentalizadas. Es así, que el Instituto de Investigación Meteorológica (MRI) y la Agencia Meteorológica de Japón (JMA) desarrollaron un modelo de alta resolución MRI-AGCM 20 km que contribuye en las simulaciones del clima y predicciones meteorológicas (Mizuta et al., 2006).

En el presente estudio se realizó una reducción de escala estadística con el fin de comparar y evaluar la precipitación estimada del modelo MRI AGCM 20 km 3.1S y 3.2S con la precipitación registrada en la cuenca río Grande (Ica) para el periodo presente (1980-1999), mediante herramientas estadísticas a escala puntual y espacial para determinar su utilidad en la zona de estudio.

Finalmente, se empleó dicho modelo para estimar un escenario futuro para los periodos cercano (2020-2039) y lejano (2080-2099); y así, evaluar los cambios en las características de la sequía meteorológica mediante tres índices de sequía; Porcentaje de Precipitación Normal, Índice de Precipitación Estandarizada, y Z-score. Los resultados indican que las correlaciones entre la lluvia estimada a partir del modelo y la lluvia de referencia, es aceptable a escala mensual. En invierno (estación seca) la correlación mensual es más fuerte con los productos T3 (MRI 3.1S-CDF) y T4 (MRI 3.2S-CDF), debido a que la presencia de días sin lluvia (valor cero) favorece una mayor correlación. Para la estación lluviosa, los productos T3 y T4 presentan una correlación promediada más débil, debido a que las lluvias se concentran más en la zona montañosa y ese efecto orográfico no está bien detectado por el modelo hidrostático. Sin embargo la lluvia de T3 y T4 se ajustan mejor a la registrada. Mientras que T1 y T2 alcanzan una sobreestimación con valores que superan el 100 por ciento, pero logran diferenciar la marcada estacionalidad.

Palabras claves: precipitación, modelo de circulación global, escenario futuro, índices de sequia

ABSTRACT

At present, there have been various studies approached on the development of Global Circulation Models in order to obtain an estimation of rain at regional scale mainly in little or no instrumented basins. Thus, the Meteorological Research Institute (MRI) and the Japan Meteorological Agency (JMA) develop a model of high resolution MRI-AGCM 20 km contribute in simulations of climate and weather predictions (Mizuta et al., 2006).

In this study, was performed a statistical downscaling in order to compare and evaluate the estimated precipitation MRI AGCM 20 km 3.1S and 3.2S with the rainfall recorded in the basin Río Grande (Ica) for the current period (1980-1999), using statistical tools to timely and spatial scale to determine its usefulness in the study area.

Finally, the model was used to estimate a future scenario for the near future periods (2020-2039) and distant future (2080-2099); and thus, assess changes in the characteristics of meteorological drought through three drought indexes; Percentage of Normal Rainfall, Standardized Precipitation Index and Z-score.

The results indicate that the correlations between estimated rainfall from the model and reference rainfall are acceptable on a monthly scale.

In winter (dry season) the monthly correlation is stronger with T3 (MRI 3.1S-CDF) and T4 (3.2S-CDF MRI) products, because the presence of rainless days (zero) favors a higher correlation. For the rainy season, the products T3 and T4 have a weaker average correlation, because the rains are concentrated more in the mountainous area and that orographic effect is not well detected by the hydrostatic model. However, the rainfall of T3 and T4 are better adjusted than recorded. While T1 and T2 are overestimated with values that exceed 100 percent, but they manage to differentiate the marked seasonality.

Keywords: precipitation, global circulation model, future scenario, drought index

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, las condiciones extremas del clima han generado diversos eventos, como: inundaciones, sequías, huracanes, tifones, friajes, heladas, entre otros; los cuales no pueden ser estudiados en su totalidad debido a que la falta de redes de medición de precipitación obstaculiza el desarrollo y uso de modelos, estudios o proyectos de tales fenómenos climáticos; por lo tanto, existe la necesidad de lograr estimaciones alternativas de precipitación con suficiente densidad de muestreo y precisión para permitir su utilización en aplicaciones operativas. En este sentido, el uso de modelos climáticos GCM de alta resolución permite la simulación de fenómenos a gran escala que poseen estructuras de pequeña escala. (Mizuta et al. 2012).

Recientemente, varios Centros de investigación unieron esfuerzos para mejorar la resolución de sus modelos globales; es así que el Instituto de Investigación Meteorológica (MRI) y la Agencia Meteorológica de Japón (JMA) desarrollaron un modelo GCM de alta resolución MRI-AGCM 20 km que contribuye en las simulaciones del clima y predicciones meteorológicas, la misma que se llevó a cabo en el Simulador de la Tierra (ES) (Mizuta et al. 2006). Es un modelo que posee una resolución lo suficientemente alta, comparable a la de los modelos regionales de 20 km y 60 km, como para investigar las características mundiales de los fenómenos de pequeña escala y eventos extremos en detalle.

El Panel Gubernamental del Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) señaló que los sistemas costeros y las zonas bajas experimentarán cada vez más impactos adversos como inmersión, inundación y erosión costera. Se prevé que algunos países en desarrollo tendrán que afrontar impactos muy fuertes, que podrían acarrear costos por concepto de daños y adaptación de varios puntos porcentuales del Producto Bruto Interno (IPCC 2014). Por ello, persiste la necesidad de realizar un seguimiento al evento de sequía en diversas regiones del Perú, considerado el tercer país más vulnerable a los riesgos climáticos (PNUD 2013).

El presente estudio pretende comparar y evaluar la precipitación estimada del modelo de circulación global MRI-AGCM con la información registrada, mediante indicadores estadísticos, para la región que conforma la cuenca río Grande, la cual representa una zona de producción agrícola. Y, a partir de ello, obtener una precipitación estimada futura del modelo MRI que permita valorar los índices de sequía meteorológica.

1.1 OBJETIVOS

Objetivo general

- a. Estimar la precipitación y sequía meteorológica actual y futura en la cuenca del río Grande sobre la base del modelo de alta resolución MRI-AGCM.

Objetivos específicos

- a. Realizar la reducción de escala para la obtención de la precipitación a partir del modelo de circulación global de alta resolución MRI.
- b. Analizar comparativamente la precipitación registrada y estimada del modelo MRI, a través de indicadores estadísticos.
- c. Evaluar la sequía meteorológica futura: del 2020 al 2039 y del 2080 al 2099; a través del Porcentaje de Precipitación Normal (PPN), Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) y el Z-score.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 SISTEMA CLIMÁTICO

Sistema muy complejo que consta de cinco componentes principales: atmósfera, hidrósfera, criósfera, litósfera y biósfera, y de las interacciones entre ellos. El sistema climático evoluciona en el tiempo bajo la influencia de su propia dinámica interna por efecto de forzamientos externos, como las erupciones volcánicas o las variaciones solares; y forzamientos inducidos por el hombre, como el cambio de composición de la atmósfera o el cambio de uso del suelo (IPCC 2013).

El sistema climático es alimentado por la radiación solar (Figura 1), el Sol proporciona la energía para la Tierra principalmente en los trópicos y los subtropicos, y se redistribuye en parte a las latitudes medias y altas por procesos de transporte atmosférico y oceánico. La actividad humana cambia las emisiones de gases y aerosoles, que están implicados en las reacciones químicas atmosféricas, lo que resulta en el ozono (O_3) y cantidades de aerosoles modificados.

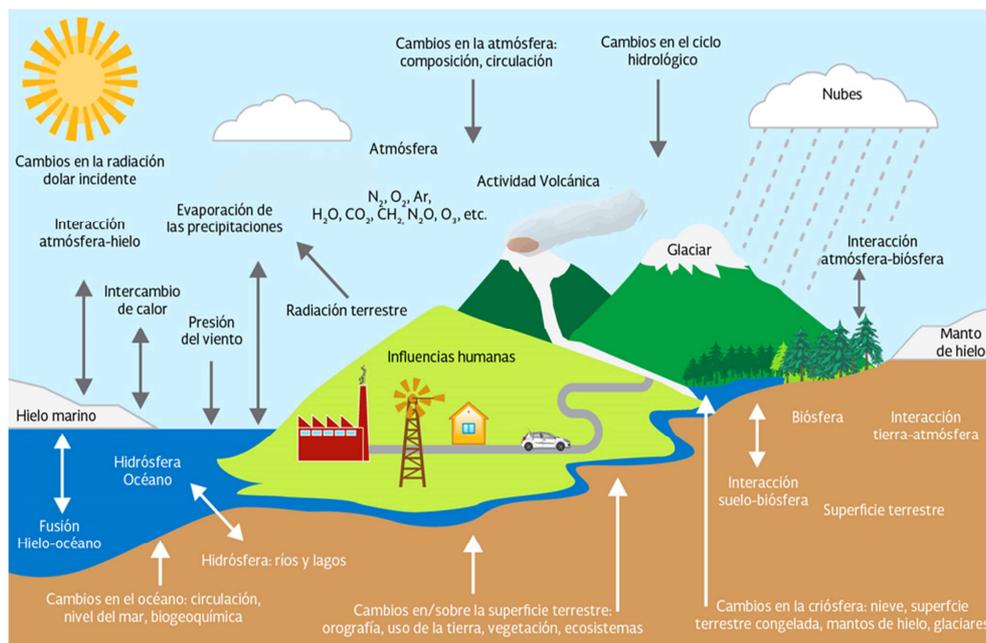


Figura 1: Esquema de los componentes del sistema climático, sus procesos e interacciones

FUENTE: IPCC (2007)

El sistema climático se puede representar mediante modelos de diversos grados de complejidad; en otras palabras, para cada componente o conjunto de componentes es posible identificar un espectro o jerarquía de modelos que difieren en aspectos, tales como el número de dimensiones espaciales; el grado en que aparecen representados explícitamente los procesos físicos, químicos o biológicos; o el grado de utilización de parametrizaciones empíricas (IPCC 2013).

2.2 CIRCULACIÓN GENERAL ATMOSFÉRICA

Son movimientos del océano y de la atmósfera en gran escala como consecuencia del diferente grado de calentamiento ocasionado por la rotación de la Tierra que tienden a restablecer el balance energético del sistema, mediante el transporte de calor y de cantidad de movimiento. La circulación atmosférica es responsable de la formación de las precipitaciones y las características climáticas (Sendiña et al. 2006).

Los primeros resultados determinaron un modelo de circulación de una célula, propuesto por primera vez por Edmond Halley en 1686, que consistió en una única célula de circulación que sube desde los trópicos hacia los polos y desciende desde los polos hacia el ecuador en la superficie (Figura 2).

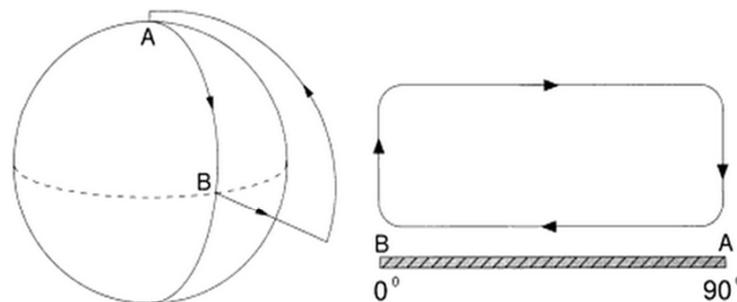


Figura 2: Célula convectiva resultado de considerar un modelo de Tierra homogénea y la radiación solar incidente sobre ella

FUENTE: Sendiña et al. (2006)

Por la rotación de la Tierra, el eje está inclinado y hay más masa de tierra en el hemisferio norte que en el hemisferio sur, entonces el patrón global actual es mucho más complicado. En lugar de un modelo de una célula, la circulación global consiste en un modelo de tres células tanto para el hemisferio norte como para el sur. Estas tres células descritas en la Figura 3 son la célula tropical, conocida como la célula Hadley, la célula de latitud media y la célula polar:

- i. Célula tropical (célula Hadley): El aire de latitudes bajas que fluye hacia el ecuador, se eleva verticalmente debido al calor, con sentido hacia los polos en la parte alta de la atmósfera. Esto forma una célula de convección que domina los climas tropicales y subtropicales.
- ii. Célula de latitud media (célula Ferrel): Una célula de circulación atmosférica de latitudes medias fue descubierta por Ferrel en el siglo XIX. En esta célula, el aire cercano a la superficie fluye hacia los polos y hacia el este, y el aire de niveles más altos en sentido hacia el ecuador y al oeste.
- iii. Célula Polar: El aire se eleva, diverge y viaja hacia los polos. Una vez que se encuentra encima de los polos, el aire se hunde y forma las zonas polares de altas presiones. En la superficie, el aire diverge hacia fuera de esas zonas de altas presiones. Los vientos superficiales de la célula polar son vientos del este (del este polar).

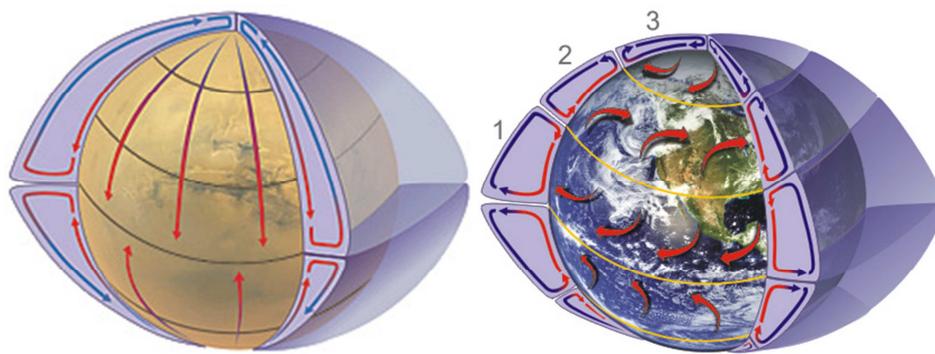


Figura 3: Modelo de tres células. 1: Célula Hadley, 2: Célula Ferrel, 3: Célula Polar
 FUENTE: National Weather Service, NOAA

Según Rau (2010), este modelo de tres células explica las siguientes características principales:

- i. Las masas de aire son puestas en movimiento por los notables gradientes de presión que resultan de los cambios bruscos de temperatura meridional y por el momento angular impartido por la rotación de la superficie de la Tierra. El momento angular se define como la cantidad resultante de multiplicar la masa por la velocidad.
- ii. Los vientos en superficie (movimiento en sentido horizontal) siempre divergen de los centros de alta presión y convergen en los centros de baja presión.
- iii. Los movimientos verticales son ascendentes en zonas de baja presión y son descendentes en zonas de alta presión.

- iv. Los fenómenos siempre ocurren en la tropósfera (faja inferior de la atmósfera), la cual posee una altitud en el ecuador de 18 km y en los polos alrededor de 9 km. Como característica de la tropósfera, se encuentran movimientos continuos en sentido horizontal (vientos) y en sentido vertical (corrientes de aire).

2.3 MODELOS DE SIMULACIÓN ATMOSFÉRICA

Un modelo, en general es una parte de un conjunto obtenido por métodos que permiten considerarlo como representativo del mismo. Esta porción extraída debe sustituir en pequeño a todo el conjunto. Para ello, los cálculos de los componentes atmosféricos se realizan en los nudos de una tupida red que debe ser lo más densa posible pues son muchos los factores considerados: la dirección y fuerza del viento, temperatura, vapor de agua, nubosidad, tipos de precipitaciones, radiación, etc. (Ledema 2011).

Dada la no linealidad y complejidad de las ecuaciones primitivas climáticas, se recurre a distintas aproximaciones que simplifican la resolución numérica y eliminan inestabilidades numéricas (Gutiérrez 2004). Las técnicas modernas de discretización intentan obtener un incremento en la precisión sin tanto coste computacional; estas técnicas son los esquemas semi-implícitos y semi-lagrangiano en el tiempo, y se obtiene con una mayor aplicación de los súper ordenadores. Además, estos esquemas poseen condiciones de estabilidad menos estrictas. Aun así, se busca aumentar la resolución para obtener una predicción mejor y más detallada.

A pesar de los avances logrados en cuanto a la modelización física de la atmósfera y a la resolución numérica de los modelos, la notable mejora en la capacidad de predicción se debe principalmente a otros factores. Por ejemplo, Kalnay (2003) describe los siguientes factores:

- i. Por un lado, el aumento de la potencia de los súper-ordenadores permitiendo resoluciones mucho más finas y menos aproximaciones en los modelos atmosféricos operacionales.
- ii. El aumento de la disponibilidad de datos, especialmente procedentes de satélites y aviones sobre los océanos y el hemisferio Sur.
- iii. El uso de métodos más exactos de asimilación de datos, lo que resulta en una mejor condición inicial para los modelos.

- iv. La mejora en la representación de procesos físicos de escala pequeña en los modelos (nubes, precipitación, transferencia de calor en régimen turbulento, humedad, radiación, etc.).

2.3.1 TIPOS DE MODELOS

a. Modelo Climático Global (GCM)

Es una representación numérica del sistema climático basado en propiedades físicas, químicas y biológicas de sus componentes, sus interacciones y procesos de retroalimentación, y contabilización de algunas de sus propiedades conocidas (IPCC 2014).

Los principales componentes del sistema climático tratados en un modelo climático son:

- i. Componente atmosférico, que simula las nubes y aerosoles; y, juega un papel importante en el transporte de calor y agua en todo el mundo.
- ii. Componente de la superficie de la tierra, que simula la vegetación, la cubierta de nieve y almacenamiento de carbono.
- iii. Componente oceánico, que simula el movimiento y la mezcla actual y biogeoquímica, ya que el océano es el reservorio de calor y carbono en el sistema climático.
- iv. Componente de hielo marino, que modula el intercambio de absorción de la radiación solar y de calor-aire-mar y los cambios de agua.

Los modelos de circulación general atmósfera-océano (AOGCM) acoplados proporcionan la más completa representación del sistema climático actualmente disponible. Se está evolucionando hacia modelos más complejos que incorporan química y biología interactivas. Estos modelos se utilizan como herramienta de investigación para estudiar y simular el clima y para fines operativos, en particular predicciones climáticas mensuales, estacionales e interanuales (IPCC 2013).

Los modelos climáticos son tridimensionales, es decir dividen el planeta en una cuadrícula de 3 dimensiones que representan ubicaciones y elevaciones geográficas específicas (Figura 4), dentro de cada cuadrícula se calculan las ecuaciones diferenciales basados en las leyes básicas de la física, el movimiento del fluido y la

química. Los modelos atmosféricos recrean los procesos físicos y químicos que manejan la Tierra: vientos, transferencia de calor, radiación, humedad relativa, y la hidrología superficial.

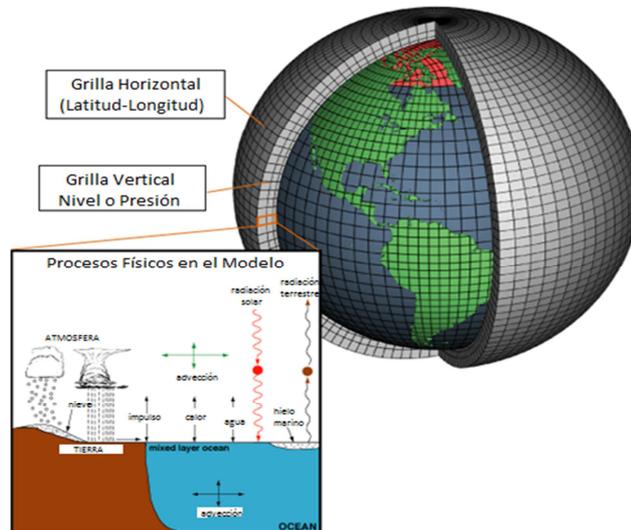


Figura 4: Esquema de los procesos ocurridos dentro de cada cuadrícula tridimensional representados por un Modelo Global de Atmósfera
 FUENTE: National Weather Service, NOAA

Las resoluciones de estas cuadrículas, generalmente varía en el orden de 1 a 5 grados en la horizontal y 10 niveles en la vertical. La Figura 5 muestra un ejemplo de la resolución horizontal de un modelo, caracterizada por el número de nodos esféricos que se considera en el desarrollo de las soluciones; así, un modelo truncado a 144 nodos se denomina T144 y tiene una resolución horizontal de 2.5 grados, que corresponde aproximadamente a 250 km. Este truncamiento también influye en la resolución vertical que habría de ser consistente con la resolución espacial y temporal. Se muestra dos perfiles verticales con 31 y 60 niveles de altura geopotencial (expresado en milibares y en números de nivel del modelo, respectivamente). La altura máxima mostrada (0.1 mb) es de aproximadamente 64 km.

Dada su escasa resolución espacial, estos modelos utilizan la aproximación hidrostática de la atmósfera (los movimientos verticales están parametrizados) y capturan su dinámica sinóptica. Normalmente son utilizados en la predicción mensual y estacional, y también en las simulaciones de escenarios de cambio climático.

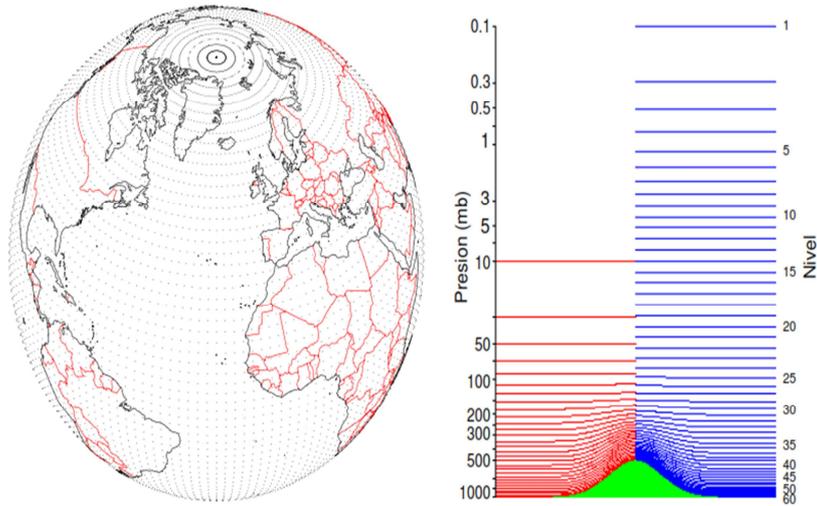


Figura 5: Rejilla global utilizada por GCM. Izquierda: modelo truncado a 144 nodos con una resolución horizontal de 2.5°. Derecha: resolución vertical expresado en niveles o presión (mb)
 FUENTE: Gutiérrez (2004)

b. Modelo Climático Regional (RCM)

Debido a que los modelos climáticos globales trabajan con resoluciones espaciales muy altas, estos no permiten detectar cambios en áreas como costas, regiones de topografía pronunciada ni fenómenos de escala pequeña, como lluvias intensas en valles; por lo que resulta muy útil trabajar con modelos climáticos regionales (RCM, por sus siglas en inglés) con mayor resolución espacial (grillas más pequeñas aproximadamente 50 km de largo y ancho).

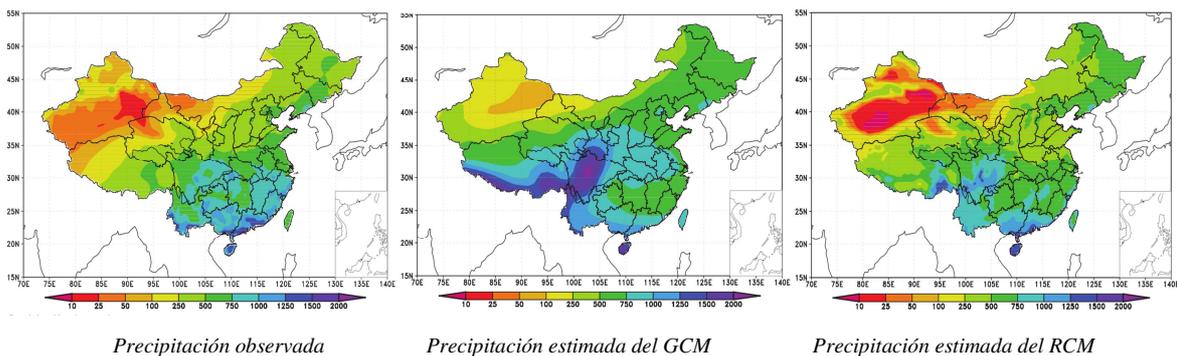


Figura 6: Precipitaciones monzónicas observadas y simuladas en China por un Modelo Climático Regional (MCR) y Modelo Climático Global (GCM)
 FUENTE: Gao et al. (2008)

La Figura 6 muestra la mejora conseguida por el modelo regional (RCM) en comparación con el modelo global (GCM) (Gao et al. 2008). Debido a su mayor resolución, los modelos regionales tienen una mayor exactitud para reproducir

fenómenos de pequeña escala como las tormentas, y también tienen mejores forzamientos orográficos que los modelos globales.

El proceso de generar proyecciones climáticas usando modelos regionales es llamado regionalización. Esta técnica, muy usada en la generación de escenarios futuros de clima con alta resolución espacial, se basa en el uso de los modelos climáticos regionales que son corridos usando las condiciones de frontera de un modelo global, es decir las proyecciones regionalizadas heredan todos los defectos y debilidades de los modelos “padre” globales (Rodríguez 2006).

2.4 REDUCCIÓN DE ESCALA ESTADÍSTICO

Para adaptar las proyecciones globales a las características regionales o locales se utilizan diferentes técnicas de regionalización o reducción de escala (*downscaling*) que adaptan las salidas de los modelos globales a las características fisiográficas de una determinada región. Estas técnicas implican distintos niveles de complejidad, se pueden agrupar en dos grandes categorías: (i) regionalización dinámica y (ii) regionalización estadística.

- i. Las técnicas de *downscaling dinámico*, que se basan en el uso de modelos regionales o de área limitada, tienen la ventaja de ser físicamente consistentes y la clara desventaja de necesitar un gran volumen de cálculo, lo que limita las simulaciones a resoluciones no superiores a los 20 km. Además, el hecho de que las condiciones de contorno no sean un problema matemático.
- ii. Las técnicas de *downscaling estadístico* agrupan multitud de algoritmos entre los que se incluyen los métodos de clasificación, los modelos de regresión y los generadores de tiempo (IPCC 2007). Estos métodos se basan en modelos que relacionan de forma empírica las variables de circulación a gran escala, proporcionadas por los modelos numéricos de circulación global, con las variables locales/regionales observadas en superficie, relacionadas con el fenómeno de estudio, típicamente, la temperatura y la precipitación en superficie. Se ajustan utilizando el clima presente y son utilizados posteriormente para proyectar las predicciones futuras suponiendo la estacionariedad del modelo (Wilby et al. 2004).

A través de estas técnicas se trasladan los resultados obtenidos en las celdas de los GCM a regiones con escalas de mayor resolución y detalle, teniendo en cuenta las características locales como son la orografía, los usos del suelo, etc. Así, a partir de las técnicas de

regionalización se puede pasar de celdas con resolución de por ejemplo 100-300 km, a celdas de unos 25-50 km de lado. Todas las técnicas de regionalización son una fuente de incertidumbre que se debe estimar (Rodríguez 2006).

La ventaja de estas técnicas es que son simples y requieren poco cálculo; además utilizan la climatología real observada de la variable local de interés durante el período de referencia y, por tanto, calibran y corrigen estadísticamente las posibles deficiencias y desajustes sistemáticos de los modelos globales.

La Figura 7 indica las diferentes técnicas de regionalización o reducción de escala (*downscaling*) adaptan las salidas de los modelos globales GCMs a las características fisiográficas (topográfica, vegetación, etc.) de una determinada región.

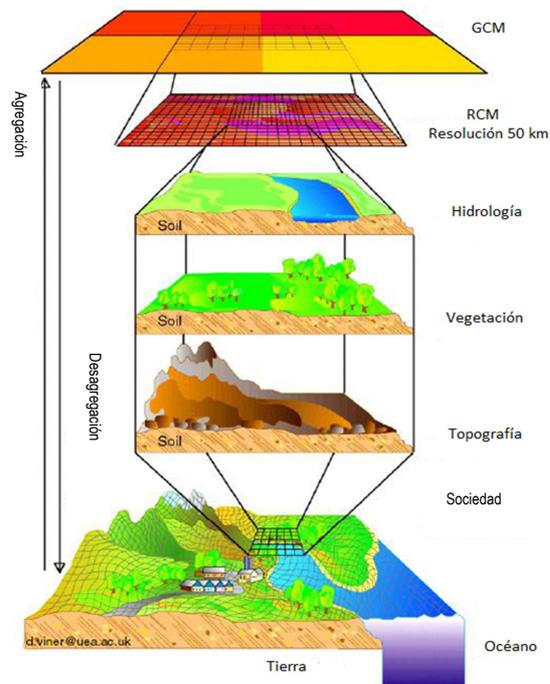


Figura 7: Esquema de la reducción de escala adaptadas a los modelos globales
FUENTE: Climate Research Unit (2000)

El proceso que utilizan los GCMs implica utilizar técnicas de reducción de escala y corrección de sesgos para que los modelos de circulación global sean más aplicables a nivel regional o local (Gaertner et al. 2012). Estos métodos permiten la comparación de los datos observados y simulados durante el período de referencia histórico, y para una transición sin problemas en el futuro. En ese sentido, se desarrolla dos tipos de corrección de sesgo:

a. Reducción de escala paramétrica

Este método emplea la corrección de sesgo paramétrica “*Bias correction*”, la cual asume que la precipitación observada se ajusta a una distribución normal, es decir se aplica una corrección de la media y desviación estándar.

$$amp_1 = \frac{\mu_{FO}}{\mu_{GCM}} \qquad amp_2 = \frac{\sigma_{FO}}{amp_1 \sigma_{GCM}}$$

$$rain_{mod}' = amp_1 \times rain_{GCM} \qquad rain_{mod} = amp_2 \times (rain_{mod}' - \mu_{FO}) + \mu_{FO}$$

Donde:

- $rain_{mod}$: Primer ajuste de los datos del GCM
- $rain_{GCM}$: Datos de la lluvia GCM
- amp_1 : Coeficiente de la corrección de la media
- amp_2 : Coeficiente de la corrección de la desviación estándar
- μ_{FO} , μ_{GCM} : Media de los datos observados y los datos de salida del GCM
- σ_{FO} , σ_{GCM} : Desviación estándar de los datos observados y los datos del GCM

b. Reducción de escala no paramétrica

Este método emplea la Función de Distribución Acumulada (CDF, por sus siglas en inglés), en la que asume que las distribuciones de probabilidad de los dos conjuntos de datos observados y simulados pueden aproximarse por una distribución teórica específica (gamma, gaussiano, exponencial, etc.) ajustando los parámetros correspondientes (Piani et al. 2010).

$$rain_{mod} = amp \times rain_{GCM} \qquad amp = \frac{rain_{PNE_{FO}}}{rain_{PNE_{GCM}}}$$

Donde:

- $rain_{PNE_{FO}}$: Probabilidad de no excedencia de los datos observados
- $rain_{PNE_{GCM}}$: Probabilidad de no excedencia de los datos GCM
- PNE: Probabilidad de no excedencia

La Figura 8 muestra el ajuste de la precipitación estimada del modelo GCM a la precipitación observada mediante el coeficiente de corrección de la media

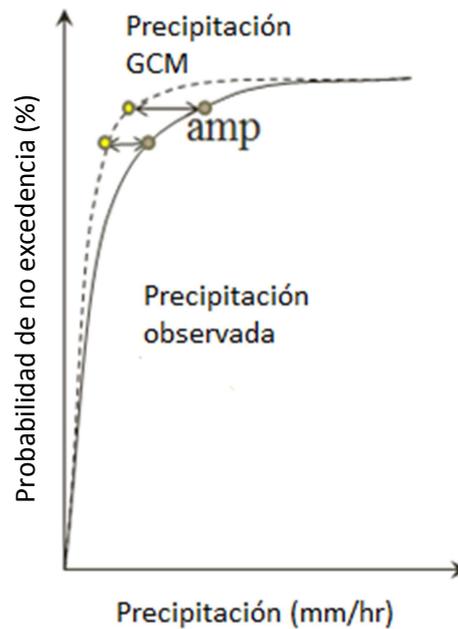


Figura 8: Función de distribución acumulada
FUENTE: Ramos (2014)

2.5 MODELO MRI-AGCM

Numerosos estudios se han publicado sobre el cambio climático en América del Sur, ya sea usando simulaciones regionales o simulaciones de modelos globales. La mayoría de los trabajos han analizado proyecciones climáticas a partir de modelos climáticos regionales debido a que las proyecciones realizadas con modelos globales carecen de la suficiente resolución espacial y temporal que se demanda para los estudios de impacto y adaptación frente al cambio climático (Blázquez et al. 2012). Sin embargo, los modelos de área limitada (LAM) requieren no sólo las condiciones iniciales, sino también de condiciones de contorno que se obtienen de los modelos globales. Esto implica que la exactitud de las simulaciones de los modelos regionales se ve limitada por la precisión de los modelos globales, es decir las proyecciones regionalizadas heredan todos los defectos y debilidades de los modelos “padre” globales (Rodríguez 2006).

El Instituto de Investigación Meteorológica (MRI) y la Agencia Meteorológica de Japón (JMA) se unieron en colaboración para desarrollar un modelo de alta resolución MRI-AGCM 20 km que contribuya en las simulaciones del clima y predicciones meteorológicas, la misma que se llevó a cabo en el Simulador de la Tierra (ES). El propósito de este proyecto fue desarrollar un Modelo Atmosférico Global de la Circulación General (AGCM) con una resolución horizontal de 20 km y un Modelo regional No-Hidrostático (NHM) de nube con una resolución horizontal de pocos kilómetros con la

finalidad de investigar los efectos del calentamiento global en los tifones (ciclones tropicales), el Baiu y fenómenos de meso-escala tales como nevadas y precipitación intensas (Kusunoki et al. 2005).

El modelo 20 km MRI/JMA es un modelo atmosférico de circulación general (AGCM) hidrostática global, la cual posee una resolución lo suficientemente alta, comparable a la de los modelos regionales de 20 km y 60 km, como para investigar las características mundiales de los fenómenos de pequeña escala y eventos extremos en detalle. Este modelo se basa en la predicción numérica del tiempo mundial (PNT), sobre la que se han implementado la dinámica quasi-conservadora semi-Lagrange, un esquema de radiación y un esquema de la superficie terrestre desarrollado para un modelo climático, para que se pueda simular un clima realista con gran precisión.

En el Cuadro 1, se observa nuevos esquemas de parametrización, técnica de representación de procesos dentro de la malla o celda, a fin de obtener mejoras en el modelo anterior, las cuales se reflejan en MRI-AGCM 3.2S. Es así, que mediante la incorporación de un esquema semi-lagrangiano fueron posibles las simulaciones en un truncamiento triangular 959 con rejilla lineal Gaussiano (T959) en el horizontal, en el que la transformada de rejilla utiliza 1920×960 celdas de la cuadrícula que corresponde a un tamaño de cuadrícula de unos 20 km.

La estabilidad de cálculo del régimen semi-lagrangiano se implementa en el nuevo modelo, lo que permite un aumento en el periodo de 6 a 10 minutos. El modelo cuenta con 60 capas en la vertical con el modelo superior a 0,1 hPa superada en el modelo MRI 3.2S. Además se ha representado el efecto directo de los aerosoles, para cinco tipos: sulfato, carbono negro, carbono orgánico, polvo mineral y de sal marina (Mizuta et al. 2012). Los aerosoles pueden influir en el clima directamente, dispersando y absorbiendo radiación, e indirectamente, actuando como núcleos de condensación de nube o núcleos de hielo o modificando las propiedades ópticas y el período de vida de las nubes (IPCC 2013).

Experimentos de alta resolución en modelos de circulación global atmosférica (AGCM) fueron logrados adoptando el método del “Time-Slice”, el cual da una proyección del calentamiento global usando dos modelos en conjunto; un modelo acoplado de circulación general océano – atmósfera (AOGCM) y un AGCM con una resolución horizontal que es mucho mayor que el de la parte atmosférica del AOGCM (Figura 9).

Cuadro 1: Especificaciones del anterior y nuevo modelo, MRI 3.1S y MRI 3.2S.

Especificación	MRI-AGCM 3.1S	MRI-AGCM 3.2S
Resolución horizontal	TL959 (20 km, 1920 X 960)	TL959 (20 km, 1920 X 960)
Niveles verticales	60 (superior a 0.1 hPa)	64 (superior a 0.01 hPa)
Periodo	6 minutos	10 minutos
Cúmulos convección	Pronostico Arakawa-Shubert	Yoshimura
Nube	Smith (1990)	Tiedtke (1993)
Radiación	Shibata and Aoki (1989); Shibata and Uchiyama (1992)	JMA (2007)
Gravedad fricción de onda	Iwasaki et al. (1989)	Iwasaki et al. (1989)
Superficie de la tierra	Hirai et al. (2007)	Hirai et al. (2007)
Capa límite	Mellor Yamada (level 2)	Mellor Yamada (level 2)
Aerosol (directo)	Sulfato	Cinco especies de aerosol

FUENTE: Mizuta et al. (2012)

El método del “*Time-Slice*” consiste en forzar un modelo atmosférico de alta resolución con concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI, por sus siglas en inglés) correspondiente a un determinado intervalo de tiempo en el futuro (normalmente se considera la concentración del CO₂ duplicado). A su vez, ajustarse a un Modelo regional No hidrostático (NHM) de nube con una resolución horizontal de pocos kilómetros. Toma como condiciones iniciales la temperatura superficial del mar (TSM) y la distribución de hielo de un Modelo Acoplado Océano-Atmosférico de Circulación General (AOGCM) de baja resolución (Kitoh et al. 2011).

El tiempo de integración para el clima presente fue llevado a cabo para 10 años con una resolución de TL959L60 sobre el modelo atmosférico global y su habilidad de representar el clima fue examinado a través de sus resultados. Como condición de frontera se usó la Temperatura Superficial del Mar (TSM) promedio climatológico y el promedio de concentración del hielo del mar suministrado por Reynolds y Smith entre noviembre de 1981 y noviembre de 1993.

El “*Time-Slice*” para el futuro, fue integrado para 10 años teniendo en cuenta la proyección de Temperatura Superficial del Mar y el escenario de concentración de Gases de Efecto Invernadero proyectado entre 2080 y 2099. La proyección de la TSM usada para el experimento fue una superposición de la TSM observada y la diferencia entre el presente

(1979-1998) y el futuro (2080-2099), los cuales fueron obtenidos de la simulación del modelo de cambio climático MRI-GCM2.3 basado en el escenario A1B del IPCC.

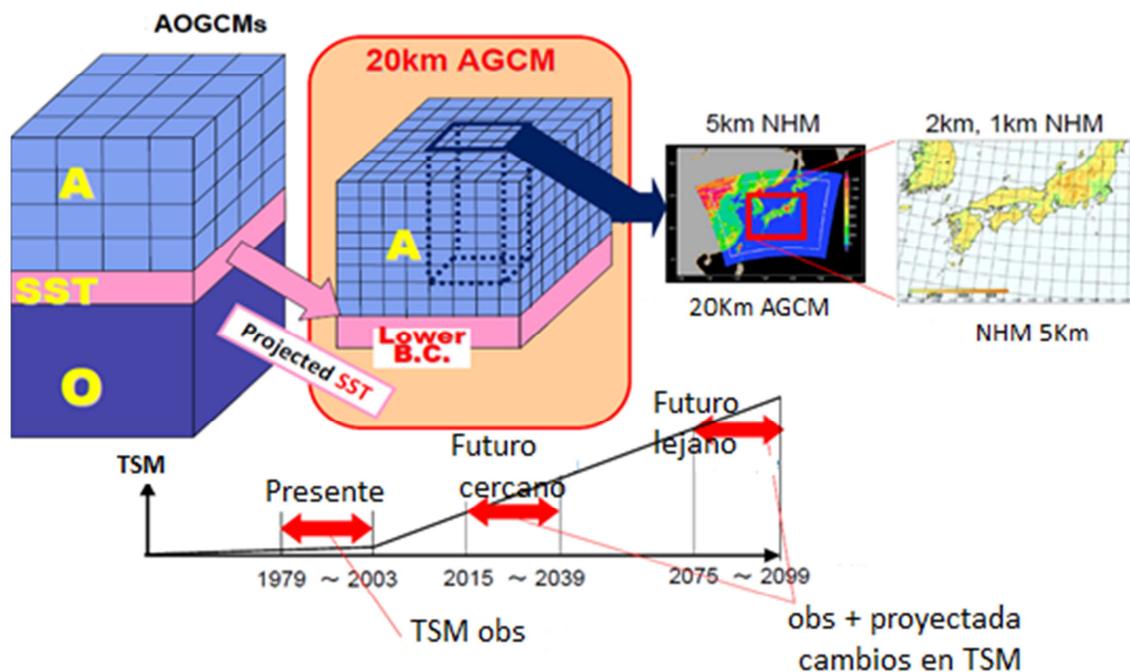


Figura 9: Diseño del experimento mediante el método del *Time Slice*, en base a la Temperatura Superficial de Mar (TSM)

FUENTE: Kitoh et al. (2011)

El uso de modelos de alta resolución (resolución horizontal de hasta 20 km) permite la simulación de fenómenos a gran escala que poseen estructuras de pequeña escala, tales como ciclones tropicales y fenómenos localizados regionalmente asociados con la orografía de pequeña escala. La resolución horizontal empleada en el modelo (20 km) es tan fina que la empleada por los modelos climáticos regionales (MCR) en estudios recientes. Por lo tanto, este modelo proporciona información sobre las regiones que están cubiertas por algunos modelos de circulación regional (MCR), incluyendo la descarga del río en una cuenca hidrográfica en Colombia, América Latina y el Caribe, y la precipitación y la temperatura en Bangladesh (Mizuta et al. 2012).

Diversos autores indican que el modelo MRI-AGCM representa bastante bien el clima actual de América del Sur; sin embargo, se requiere realizar una evaluación del error de la estimación de la precipitación debido a la presencia de errores del modelo a utilizar (Blázquez et al. 2012; Kitoh et al. 2011; Nakaegawa et al. 2014).

Ruiz (2007) realizó un estudio en el que detalla que el modelo de alta resolución MRI presenta una simulación aceptable de clima presente para áreas llanas de Colombia, en

zonas montañosas el modelo tiende a sobreestimar la lluvia con valores que pueden superar el 400 por ciento.

2.6 ESCENARIOS CLIMATICOS

Es una representación plausible y a menudo simplificada del clima en el futuro, sobre la base de un conjunto internamente coherente de relaciones climatológicas que se ha construido para el uso explícito en la investigación de las posibles consecuencias del cambio climático antropogénico, sirviendo a menudo como entrada para impactar modelos. Las proyecciones climáticas sirven a menudo como la materia prima para la construcción de escenarios climáticos, pero los escenarios climáticos generalmente requieren información adicional, como clima actual observado. Un escenario climático de cambio es la diferencia entre un escenario climático y el clima actual (IPCC 2013).

La Figura 10 muestra las proyecciones de la media de los múltiples modelos de la CMIP5 de los cambios en la temperatura media anual para 2081-2100 con arreglo a los escenarios de mitigación de bajas emisiones y un escenario de altas emisiones RCP2.6 y RCP8.5 (trayectorias de concentración representativas (RCP) 2,6 y 8,5), en relación con 1986-2005.

Se observa un aumento proyectado de la temperatura global en los próximos decenios. Durante este período a corto plazo, los riesgos irán variando conforme interactúen las tendencias socioeconómicas con el clima cambiante.

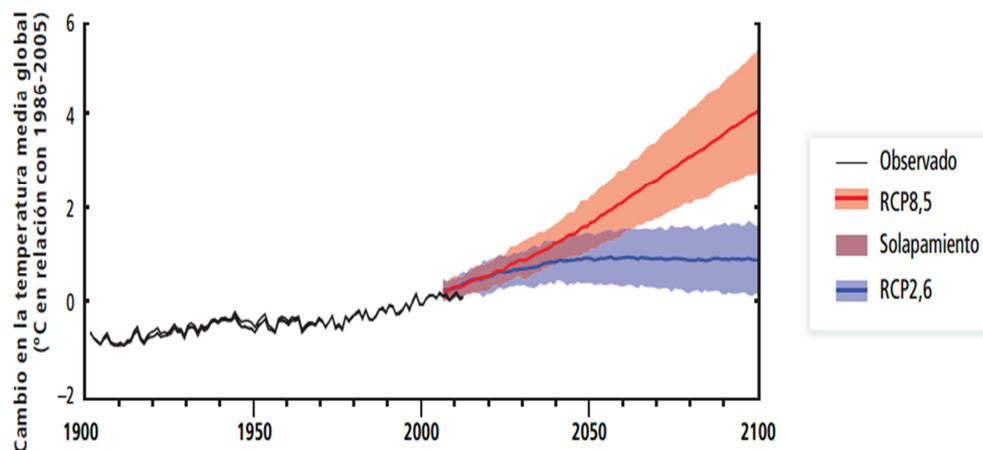


Figura 10: Cambios en la temperatura media global de la superficie bajo un escenario de bajas emisiones RCP 2.6 y de altas emisiones RCP8.5.

FUENTE: IPCC (2013)

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático señala que existe un riesgo de cambio climático global entre alto y muy alto con un aumento de la temperatura media global de 4°C o más (según un escenario RCP8.5), cambio que conlleva impactos graves y generalizados en sistemas únicos y amenazados, importantes extinciones de especies, grandes riesgos para la seguridad alimentaria global y regional, y una combinación de alta temperatura y humedad que pone en riesgo las actividades humanas normales, entre ellas actividades de producción de alimentos o el trabajo en el exterior en algunas zonas durante ciertos períodos del año (nivel de confianza alto).

Los cambios en el promedio de precipitaciones para los cuatro escenarios RCP (Figura 11) proyectan un mundo más cálido con una variación espacial significativa en el escenario RCP8.5. Algunas regiones experimentarán aumentos, y otras, disminuciones, e incluso habrá regiones que no experimenten cambios significativos. Existe un nivel de confianza alto en que, conforme aumenten las temperaturas globales, se agudizará el contraste de la precipitación media anual entre las regiones secas y las húmedas y el contraste entre la estación húmeda y la seca en la mayor parte del mundo.

Según el escenario RCP8.5, el patrón general de cambio indica que en latitudes altas es muy probable que a finales de siglo se produzcan precipitaciones más abundantes debido al aumento de la humedad específica en una troposfera más cálida, así como al aumento del transporte de vapor de agua desde los trópicos. Además, es probable que a finales de siglo muchas regiones áridas y semiáridas de latitudes medias y subtropicales experimenten menos precipitaciones y es probable que en muchas regiones húmedas de latitudes medias aumenten las precipitaciones (IPCC 2013).

Cabe mencionar que el modelo MRI simula el clima bajo escenarios de cambio climático A1B, crecimiento medio alto de emisiones de gases de efecto invernadero GEI forzada por la climatología de la temperatura superficial del mar (TSM). El IPCC (2007) señaló que el aumento en la cantidad de precipitaciones es muy probable en las latitudes altas, mientras que la disminución, en la mayoría de las regiones subtropicales terrestres para el escenario A1B.

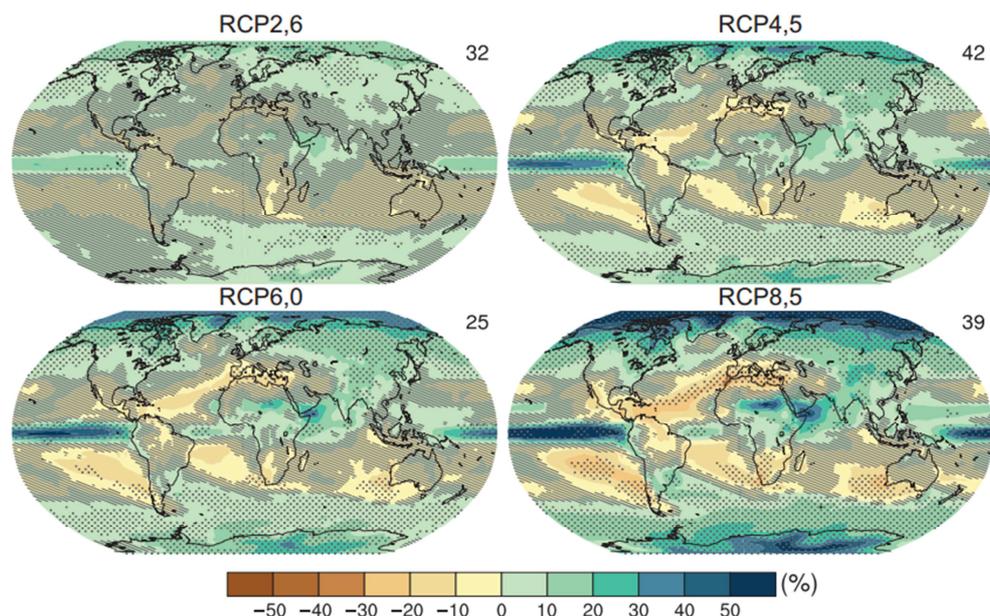


Figura 11: Cambio de la precipitación media anual expresado en porcentaje (2081-2100) para los cuatro escenarios RCP
FUENTE: IPCC (2013)

2.7 SEQUÍA

Para los propósitos del presente estudio se adopta el uso de la definición de sequía meteorológica en los términos expuestos por Wilhite y Glantz (1985), la cual es: “La sequía es un proceso natural errático, que se origina como resultado de una deficiencia de precipitación durante un período de tiempo extenso, generalmente de una estación o más, provocando en consecuencia un desbalance hídrico, afectando con ello las actividades humanas y ambientales; se trata de una situación deficiente de precipitación en relación a un comportamiento promedio considerado como normal”.

Wilhite y Glantz (1985), establecen cuatro tipos principales de sequías, a saber: meteorológica, agrícola, hidrológica y social o económica.

- i. Sequía meteorológica, cuando la precipitación es muy inferior a lo esperado en una amplia zona y para un largo período.
- ii. Sequía hidrológica, cuando hay un déficit continuo en la escorrentía en superficie inferior a las condiciones normales o cuando disminuye el nivel de las aguas subterráneas.

- iii. Sequía agrícola, cuando la cantidad de precipitación y su distribución, las reservas en agua del suelo y las pérdidas debidas a la evaporación se combinan para causar disminuciones considerables del rendimiento de los cultivos y del ganado.
- iv. Sequía social o económica, se define cuando la misma repercute sobre la estructura social, el balance alimentario, de mercado o financiero de una región determinada.

La variabilidad del clima y el cambio climático amenazan con provocar un mayor aumento de las temperaturas, una mayor evaporación y una alteración de los regímenes de la precipitación en los años siguientes. En tal sentido, es necesario identificar y evaluar este fenómeno, con ayuda de los instrumentos tecnológicos como satélites o modelos climáticos.

2.7.1 CARACTERIZACIÓN DE SEQUÍAS

La caracterización de las sequías se realiza en base a tres características principales como son: magnitud, duración y área afectada (Lorenzo 2012):

a. Extensión de la sequía

La caracterización espacial de un evento de sequía, nos 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.

b. Duración de la sequía

La duración de un evento de sequía, es el tiempo (número total de días, meses o años consecutivos) durante el cual las precipitaciones son inferiores a la precipitación media de ese mismo período.

c. Magnitud de la sequía

Este término hace referencia al déficit del volumen acumulado de agua faltante en una secuencia ininterrumpida de meses que delimita un evento de sequía, el cual se cuantifica mediante la sucesión negativa acumulada.

La intensidad es un parámetro muy usual en la caracterización de sequías, la cual es una medida de severidad del evento, se calcula como la magnitud entre la duración de la sequía y corresponde a la intensidad promedio, en otros casos se define como el máximo valor del déficit ocurrido durante el evento, conocido como intensidad máxima.

2.7.2 ÍNDICES DE SEQUÍAS

Existen diferentes índices para evaluar e identificar las sequías, en el presente trabajo se utilizaron 3 índices de sequía: el Índice de Precipitación Estandarizada (SPI), Porcentaje de Precipitación Normal (PPN) y el índice Z-score. Una característica común que poseen todos los índices es que están calculados utilizando únicamente datos de precipitación, en tal sentido se usará la categorización de los índices de sequía del Cuadro 2.

Cuadro 2: Categorización de los índices de sequía utilizados en el estudio.

Categoría	SPI,Z-score	PPN
Húmedo	≥ 100	>100
Normal	-0.99 a 0.99	80 a 100
Sequia moderada	-1.49 a -1.0	55 a 80
Sequia severa	-1.99 a -1.5	40 a 55
Sequia extrema	<-2.0	<40

FUENTE: McKee et al. (1993) y Dogan et al. (2012)

a. Porcentaje de Precipitación Normal (PPN)

El porcentaje de la precipitación normal (PPN) es una de las medidas más directas del desvío de la precipitación respecto a su promedio de largo plazo (Morid et al. 2006). Debido a su cálculo simple, el PPN es adecuado para la radiodifusión del tiempo y el público en general (Dogan et al. 2012).

Cabe señalar que el Porcentaje de Precipitación Normal es limitado cuando se trabaja para amplias zonas (Hayes 2000), sin embargo presenta buenos resultados para una región en particular o estaciones pluviométricas específicas.

b. Índice de Precipitación Estandarizada (SPI)

El Índice de Precipitación Estandarizada (SPI, por sus siglas en inglés) es el número de desviaciones estándar que la precipitación acumulada se desvía del promedio climatológico. Esto 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 (McKee et al. 1993). El Cuadro 3 muestra la clasificación del SPI desarrollada por McKee et al. (1993).

Un aspecto relevante para el cálculo e interpretación de los índices de sequía es el uso de escalas temporales. Las escalas de tiempo indican la cantidad de meses de precipitación a partir de los cuales se calcula el índice de sequía. Estas escalas de tiempo permiten realizar una separación de los distintos tipos de sequía, dado que un déficit en la precipitación en escala de tiempo corta es importante para la agricultura, mientras que en escala de tiempo larga posee relevancia en el manejo de los recursos hídricos. Sin embargo, Guttman (1999) mostró que el uso del SPI en escalas de tiempo largas, superiores a 24 meses, no es aconsejable dado que el tamaño de la muestra se reduce, incluso con series de datos extensas.

Cuadro 3: Valores del Índice Estandarizada de Precipitación

Rango	Identificación
2.0 y mas	Extremadamente húmedo
1.5 a 1.99	Húmedo
1.0 a 1.49	Moderadamente húmedo
-0.99 a 0.99	Normal
-1.0 a -1.49	Moderadamente seco
-1.5 a -1.99	Severamente seco
-2 y menos	Extremadamente seco

FUENTE: McKee et al. (1993)

c. Índice Z-score

El Z-Score indica cuántas desviaciones estándar un valor de precipitación se encuentra por encima o por debajo del promedio.

De acuerdo a las investigaciones de Wu et al. (2001), en la que señala que el Z score es un índice de sequía menos sensible a los cambios meteorológicos (condiciones extremadamente húmedas y secas); además, se puede utilizar para controlar las sequías para climas húmedos y secos, proporcionando resultados similares al SPI. Asimismo señala que dispone de simplicidad en el cálculo y la capacidad de permitir datos faltantes, lo cual lo hace más flexible en regiones donde los datos de precipitación suelen ser incompletos.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

Este capítulo presenta una descripción de la zona de estudio que incluye información hidrológica con base en tierra (precipitación registrada), información de precipitación estimada de Modelo de Circulación General Atmosférica MRI-AGCM 3.1S y 3.2S de alta resolución de 20 km y la evaluación de los índices de sequía, para tres periodos de análisis que comprenden: presente, 1980-1999; futuro cercano, 2020-2039; y futuro lejano, 2080-2099. Además, se detallan las técnicas y procedimientos de análisis empleados para cumplir con el objetivo general planteado.

3.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La cuenca del río Grande (Figura 12), cuenta con una extensión de 10 991 km² y una altitud media de 2 123 msnm. Se encuentra ubicada en la zona meridional del departamento de Ica, comprendiendo parte de las regiones de costa y sierra. Geográficamente sus puntos extremos se encuentran entre los paralelos 13°44' y 15°04' latitud sur y los meridianos 74°22' y 75°26' de longitud oeste de Greenwich. Políticamente, forma parte de las provincias de Palpa, Nazca, Lucanas y Castrovirreyna, pertenecientes las dos primeras al departamento de Ica y las dos últimas a los departamentos de Ayacucho y Huancavelica, respectivamente. Altitudinalmente, se extiende desde el nivel del mar hasta la línea de las cumbres de la cordillera occidental de los Andes, cuyos puntos más altos están sobre los 4000 msnm.

De acuerdo con los registros de las estaciones climatológicas seleccionadas (Cuadro 4), la precipitación media anual en la cuenca del río Grande varía desde escasos milímetros anuales (2.4 mm en promedio) en la costa árida y desértica próxima al mar, hasta alrededor de 500 mm anuales y con picos que llegan a 700 mm en ciertas regiones por encima de los 3000 msnm, lo cual indica la gran variabilidad de la lluvia en la región. Las lluvias presentan una marcada estacionalidad durante los meses de octubre a enero.

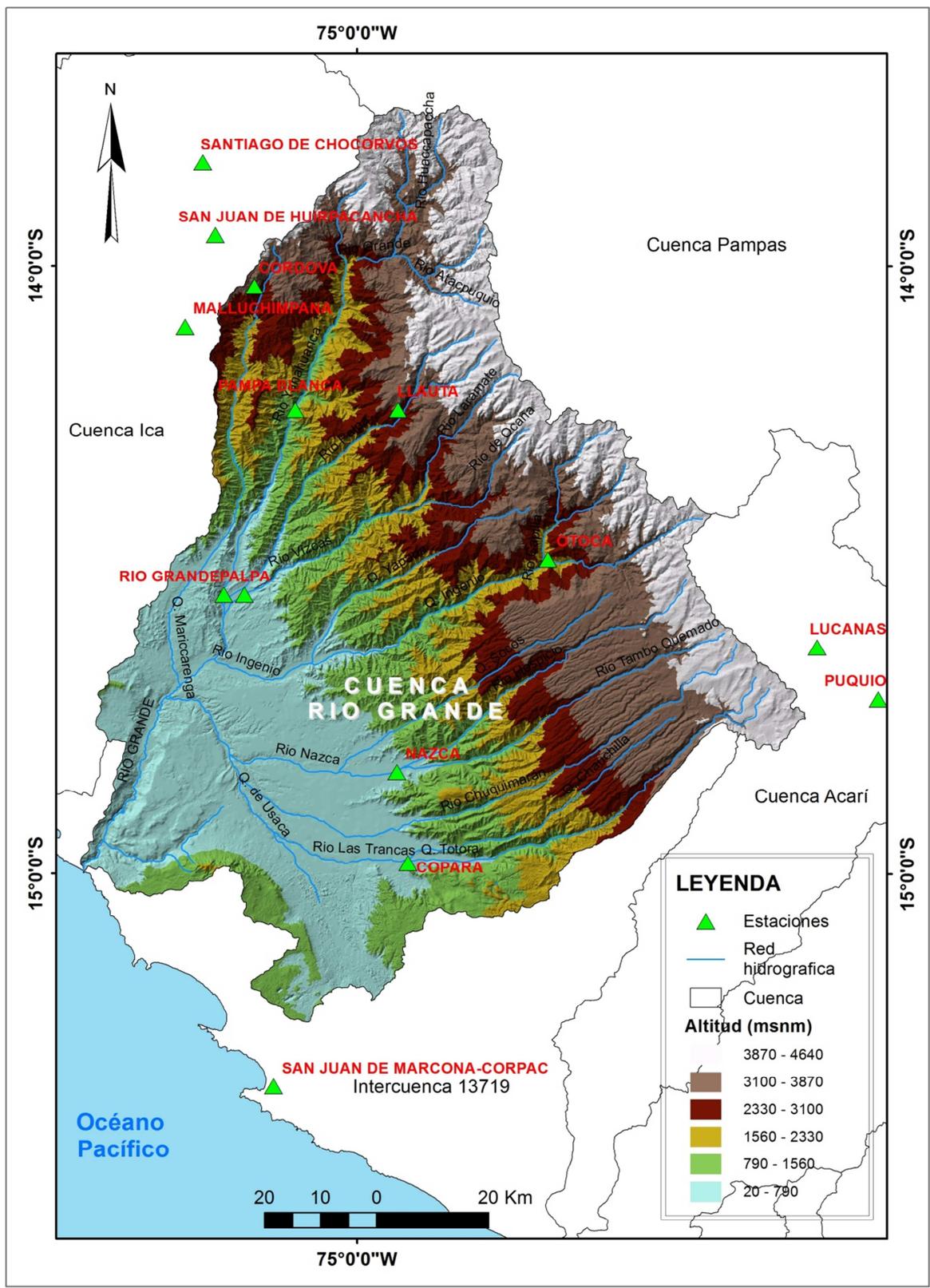


Figura 12: Altimetría de la cuenca río Grande, ubicación de las estaciones pluviométricas y la red hidrográfica
 FUENTE: Elaboración propia usando el Modelo Digital de Terreno

3.1.1 PRECIPITACIÓN REGISTRADA

La información pluviométrica ha sido obtenida a partir de las estaciones meteorológicas proporcionadas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) para el periodo 1980-1999. Se ha recolectado información mensual de catorce estaciones meteorológicas (Cuadro 4): 3 estaciones ubicadas en el departamento de Huancavelica, 4 estaciones en el departamento de Ayacucho y 7 en el departamento de Ica.

Para tener mayor información que aporte a la caracterización de la cuenca, se realizó una selección a partir del límite de la cuenca para encontrar estaciones que cumplan con el periodo de datos.

Cuadro 4: Estaciones meteorológicas de la cuenca de estudio.

N°	Nombre	Departamento	Cuenca	Latitud (°S)	Longitud (°W)	Altitud (msnm)
1	Córdova	Huancavelica	Grande	14° 02' 2"	75° 10' 10"	3069
2	LLauta	Ayacucho	Grande	14° 14' 14"	74° 55' 55"	3043
3	Lucanas	Ayacucho	Acari	14° 37' 37"	74° 14' 14"	3297
4	Malluchimpana	Ica	Ica	14° 06' 1"	75° 17' 1"	2525
5	Otoca	Ayacucho	Grande	14° 29' 1"	74° 41' 1"	2055
6	Pampa Blanca	Ica	Grande	14° 14' 14"	75° 06' 6"	1025
7	Puquio	Ayacucho	Acari	14° 42' 42"	74° 08' 8"	2977
8	San Juan de Huirpachanca	Huancavelica	Ica	13° 57' 1"	75° 14' 1"	3650
9	Santiago de Chocorvos	Huancavelica	Ica	13° 49' 48"	75° 15' 15"	2794
10	San Juan de Marcona	Ica	Intercuenca 13719	15° 22' 1"	75° 11' 1"	30
11	Palpa	Ica	Grande	14° 32' 32"	75° 11' 11"	340
12	Rio Grande	Ica	Grande	14° 32' 32"	75° 13' 13"	317
13	Nazca	Ica	Grande	14° 50' 0"	74° 56' 0"	593
14	Copara	Ica	Grande	14° 58' 58"	74° 54' 54"	600

FUENTE: Elaboración propia con información de SENAMHI.

3.1.2 PRECIPITACIÓN ESTIMADA DEL MODELO MRI-AGCM

La precipitación estimada del modelo de alta resolución MRI-AGCM se obtiene extrayendo los datos en torno a la estación de destino (Ver Sección 3.3.2).

Se ha trabajado con los modelos de alta resolución MRI-AGCM 3.1S y MRI-AGCM 3.2S desarrollados por la Agencia Meteorológica de Japón (JMA) para el periodo

presente, 01 de enero de 1980 al 31 de diciembre de 1999; y, posteriormente, se proyectó para el periodo: futuro cercano, 01 de enero de 2020 al 31 de diciembre de 2039; y futuro lejano, 01 de enero de 2080 al 31 de diciembre de 2099.

3.2 MATERIALES Y PROGRAMAS DE CÓMPUTO

Para desarrollar el presente trabajo ha sido necesario el apoyo de materiales, equipos y ciertos programas de cómputo detallados en el Cuadro 5, los cuales han permitido automatizar el desarrollo de los datos.

Cuadro 5: Descripción de los programas de cómputo a utilizar

Materiales y Equipos	Descripción
Matlab R2009a	Lenguaje de cálculo para la extracción de datos MRI, la reducción de escala estadística y facilitar la visualización de datos mediante gráficos.
SPI_L_6	Programa desarrollado por el Centro Nacional de Mitigación de Sequia (NDMC, por sus siglas en inglés) que permite calcular el índice de precipitación estandarizada de una manera sencilla y rápida.
ArcGis 9.3	Programa para la generación de mapas de lluvia espacial y la obtención de mapas de la cuenca de estudio.
HYDRACCES	Software de hidrología que permitió la regionalización de las estaciones de estudio mediante el Método del Vector regional
Microsoft Word 2010	Programa para realizar trabajos de escritorio.

FUENTE: Elaboración propia

3.3 METODOLOGÍA

El procedimiento metodológico desarrollado posee la siguiente secuencia para cumplir los objetivos planteados (Figura 13).

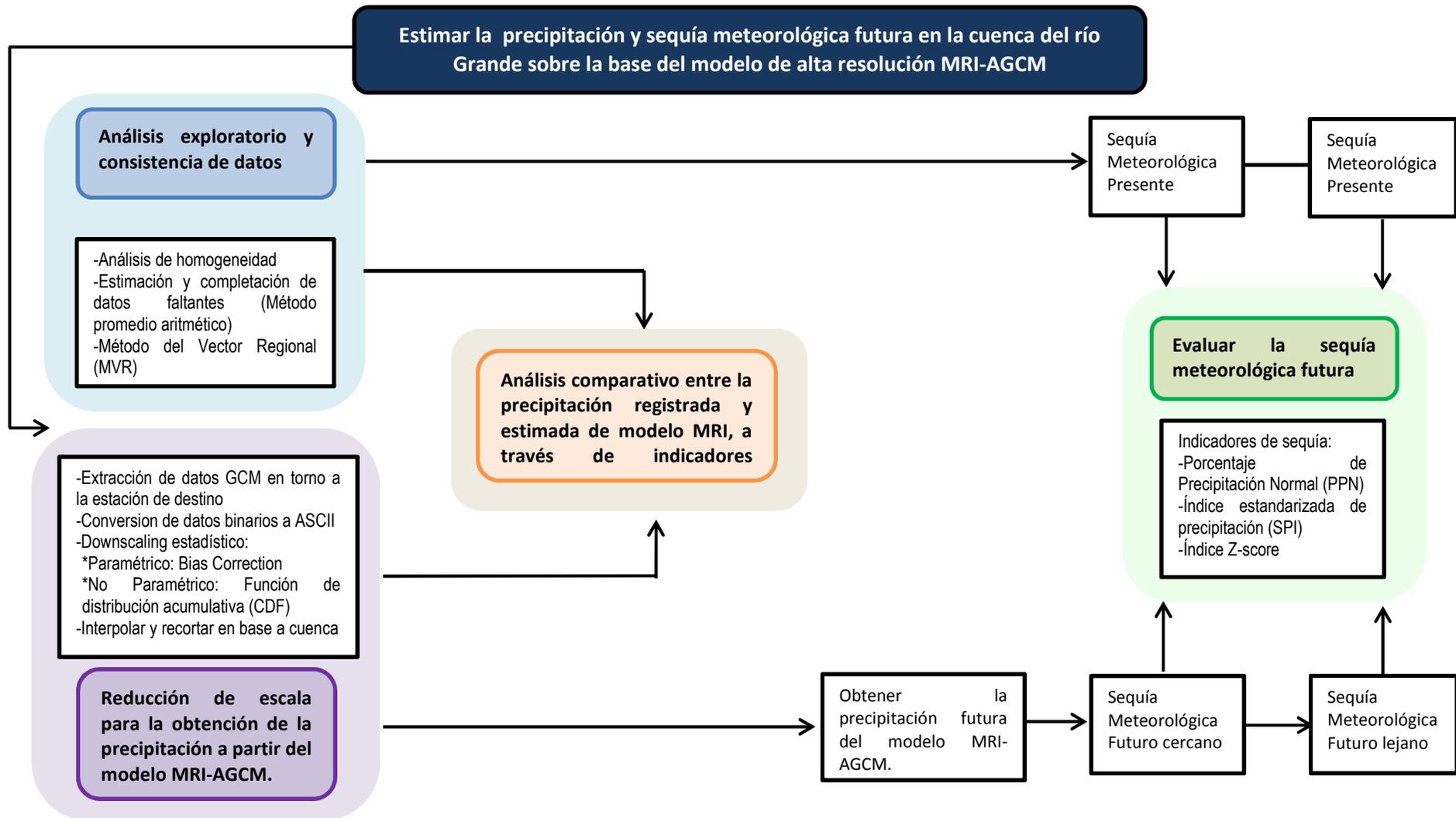


Figura 13: Esquema metodológico empleado en el presente estudio para lograr los objetivos planteados
 FUENTE: Elaboración propia

3.3.1 ANÁLISIS EXPLORATORIO Y CONSISTENCIA DE DATOS

El registro de la precipitación se realiza en estaciones de medición puntual, mediante instrumentos de medición discreta o continua, por lo que la disponibilidad de datos confiables es un requisito indispensable para el tratamiento de datos. Por lo mismo, se ha realizado un análisis exploratorio, de consistencia y homogeneidad para su incorporación en los procedimientos de análisis.

Con el fin de evaluar la consistencia de la base de datos de la precipitación registrada se realiza la prueba T de student y H. Cramer, previo una identificación y descarte de aquellas estaciones que no cuentan con registros en todos los años requeridos. Asimismo, se considera las estaciones con la mayor cantidad de información disponible. Finalmente, se determinaron las estaciones homogéneas mediante el Método del Vector Regional.

a. Análisis de consistencia

Una de las técnicas que se aplica para comprobar la consistencia de una serie de datos es la prueba T de Student, la cual permite detectar la inconsistencia de la media. El test o prueba estadística de homogeneidad, presenta una hipótesis nula y una regla para aceptarla o rechazarla en base a su probabilidad de ocurrencia. Si dicha probabilidad es pequeña se concluirá que la serie no es homogénea, si la decisión es grande significa que es homogénea.

Además, es conveniente comparar la media de toda la serie y la media de una cierta parte del registro, para verificar la consistencia u homogeneidad, para tal propósito la prueba de H. Cramer es bastante útil, y es complementaria de la prueba T de Student.

b. Análisis de saltos

Un análisis de saltos permite identificar los cambios abruptos en la media y la desviación estándar de series temporales y en base a dicha identificación se puede proseguir con la corrección de la información mediante las siguientes ecuaciones:

Los saltos son formas determinísticas transitorias que permiten a una serie periódica o no periódica pasar desde un estado a otro, como respuesta a cambios hechos por el hombre o a cambios naturales continuos en la cuenca.

$$\hat{X}_{(t)} = \left(\frac{X_t - \bar{X}_1}{S_1} \right) S_2 + \bar{X}_2 \qquad \hat{X}_{(t)} = \left(\frac{X_t - \bar{X}_2}{S_2} \right) S_1 + \bar{X}_1$$

Donde:

- \hat{X}_t = Valor corregido de saltos primer periodo
- \hat{X}_t = Valor a ser corregido segundo periodo.

c. Completación de datos faltantes

Cuando no se tiene datos de precipitación en una estación o las existentes no cuentan con información suficiente, se puede estimar el valor mensual faltante mediante el método Racional Deductivo, que permitirá estimar los registros mensuales faltantes (como máximo once) apoyándose en la información que brindan los años completos, mediante la siguiente ecuación:

$$P_i = \left(\frac{\sum P}{1200 - \sum S_i} \right) S_i$$

Donde:

- i: Cada uno de los meses desconocidos, como máximo once
- P_i : Precipitación mensual desconocida en cada año incompleto, en mm
- $\sum S_i$: Suma de los porcentajes promedio de los meses cuya precipitación se desconoce, en %
- $\sum P$: Suma de las precipitaciones mensuales conocidas en los años incompletos, en mm
- S_i : Porcentaje promedio asignado a cada uno de los meses desconocidos o faltantes

d. Método del Vector Regional

El Método del Vector Regional (MVR) es un método de cálculo orientado a tres tareas definidas: La crítica de datos, la homogenización y la completación de datos de precipitación. La idea básica del método, es la siguiente: en lugar de comparar dos estaciones por correlación o doble masa, como se realiza en los métodos clásicos, se elabora 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 evitar los problemas de peso de las estaciones más lluviosas sobre las menos lluviosas y la

existencia de datos faltantes, emplea el concepto de “Precipitación media extendida” para el cálculo de la estación “Vector” (Espinoza 2005).

Existen dos métodos para desarrollar el Método del Vector Regional, G. Hiez y Y. Brunet-Moret, elaborados en el Instituto Francés de Investigación Científica para el Desarrollo en Cooperación (ORSTOM, por sus siglas en francés). El método Y. Brunet-Moret se basa en el promedio, eliminando los valores demasiado alejados del promedio para evitar contaminar demasiado las estimaciones con datos evidentemente erróneos, mediante el método de Mínimos Cuadrados para encontrar los Índices Pluviométricos Regionales Anuales “Zi” y la Precipitación Media Extendida “Pj”. Esto se logra al minimizar la sumatoria de la siguiente expresión:

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

Donde:

- I: índice del año
- J: índice de la estación
- N: Número de años
- M: Número de estaciones
- Pij: Precipitación anual de la estación j para el año i
- Pj: Promedio de precipitaciones en N años
- Zi: Índice pluviométrico regional para el año i
- Eij: Fluctuación aleatoria del año i de la estación j

Las series temporales de precipitación total mensual de 14 estaciones meteorológicas con un registro de 20 años, para el periodo 1980-1999, fueron analizadas por el método de Brunet-Moret, mediante el paquete computacional HYDRACCES. La ejecución del HYDRACCES da como resultado los Índices anuales del Vector Regional y de las estaciones trabajadas, y se evalúan en base a los siguientes parámetros:

- La correlación de las estaciones respecto al Vector; las estaciones que muestran un incremento y decremento los mismos años que el Vector, tendrán una buena correlación.

- La Desviación Estándar de las Desviaciones (D.E.D); según qué tan alejados están los índices de las estaciones respecto al Vector, o qué tan alejadas se encuentran de los límites (superior e inferior) establecidos para el cálculo.

3.3.2 REDUCCIÓN DE ESCALA DE LA PRECIPITACIÓN ESTIMADA DEL MODELO MRI-AGCM

Para la utilización de los datos de precipitación en crudo del modelo MRI se realiza el procedimiento que se detalla en la Figura 14.

- i. Datos binarios GCM
- ii. Extracción de datos de GCM en torno a la estación de destino
Para el clima presente se hicieron comparaciones de lluvia registrada y estimada en las estaciones meteorológicas, buscando el punto de grilla más cercano que ofreció el modelo de alta resolución con el punto geográfico de la estación meteorológica.
- iii. Convertir los datos binarios a ASCII alrededor de la estación de destino.
Estos datos binarios deben ser cambiados a ASCII, para lo cual se emplea una función y su script en Matlab. De este modo los datos binarios son cambiados a ASCII para los modelos 3.1S y 3.2S.
- iv. Obtención de parámetros de reducción de escala
Se realiza la reducción de escala (*downscaling*) de los datos ASCII según la estación elegida, para lo cual se emplea una función para *Bias correction* y *CDF mapping*.

La metodología empleada para la corrección de sesgo paramétrica y no paramétrica en el proceso de reducción de escala se basa en la relación entre las variables de circulación a gran escala, proporcionadas por los modelos de circulación global con las variables locales/regionales observadas en superficie, en este caso la precipitación. Se ajustan utilizando el clima presente y son utilizados posteriormente para proyectar las predicciones futuras suponiendo la estacionariedad del modelo (Wilby et al. 2004).

a. Reducción de escala paramétrica

Este método emplea la corrección de sesgo paramétrica “*Bias correction*”, el cual asume que la precipitación registrada se ajusta a una distribución normal.

b. Reducción de escala no paramétrica

Este método emplea la Función de Distribución Acumulada (CDF, por sus siglas en inglés), en la que asume que las distribuciones de probabilidad de los dos conjuntos de datos observados y simulados pueden aproximarse por una distribución teórica específica (gamma, gaussiano, exponencial, etc.) ajustando los parámetros correspondientes (Piani et al. 2010).

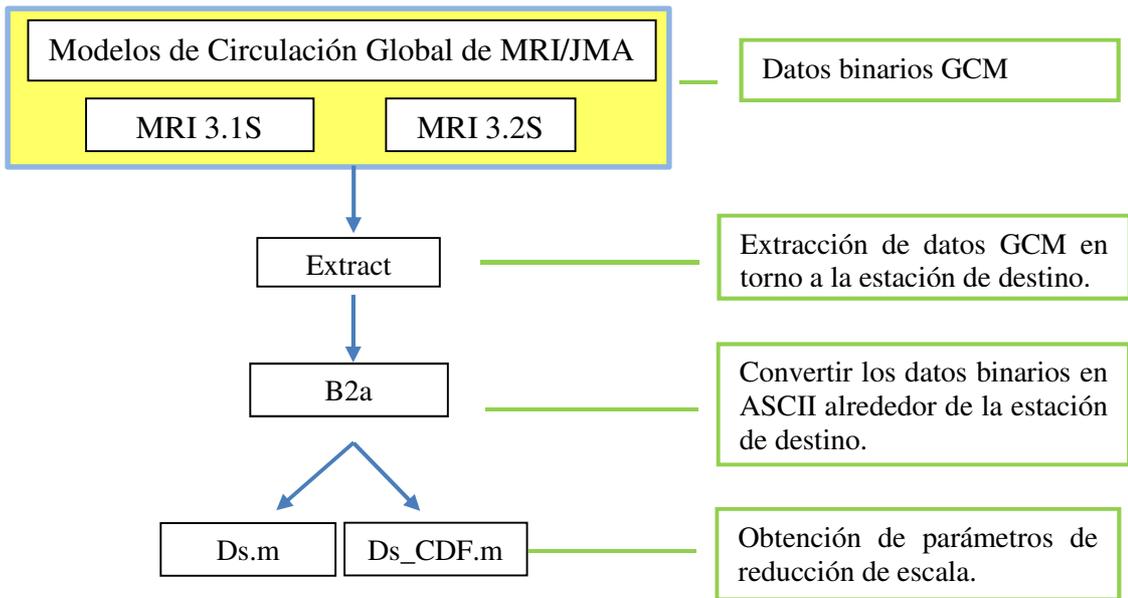


Figura 14: Proceso de obtención de datos MRI y reducción de escala

FUENTE: Elaboración propia

Primero se proyecta la cuenca de estudio a coordenadas UTM (Zona 18S, DATUM WGS-84) en una malla raster con tamaño de celda de 50 m; con geometría de 2474 columnas y 3401 filas y características que se detallan en el Cuadro 6.

Cuadro 6: Características del archivo Raster para generar los archivos ASCII.

n columnas	2474
n filas	3401
xllcorner	469360.83
yllcorner	8301054.29
celda	50

FUENTE: Elaboración propia

Al convertir las estaciones (input) de la cuenca de punto a *raster*, se divide la cuenca en celdas de 50 m (Figura 15), en la que a cada estación le corresponde una

ubicación Fila-Columna (output). Para definir el ancho de celda con el que se visualiza la malla de precipitación (raster) se verifica la distancia entre estaciones puntuales con la finalidad de que 2 o más estaciones no se encuentren dentro de una misma celda.

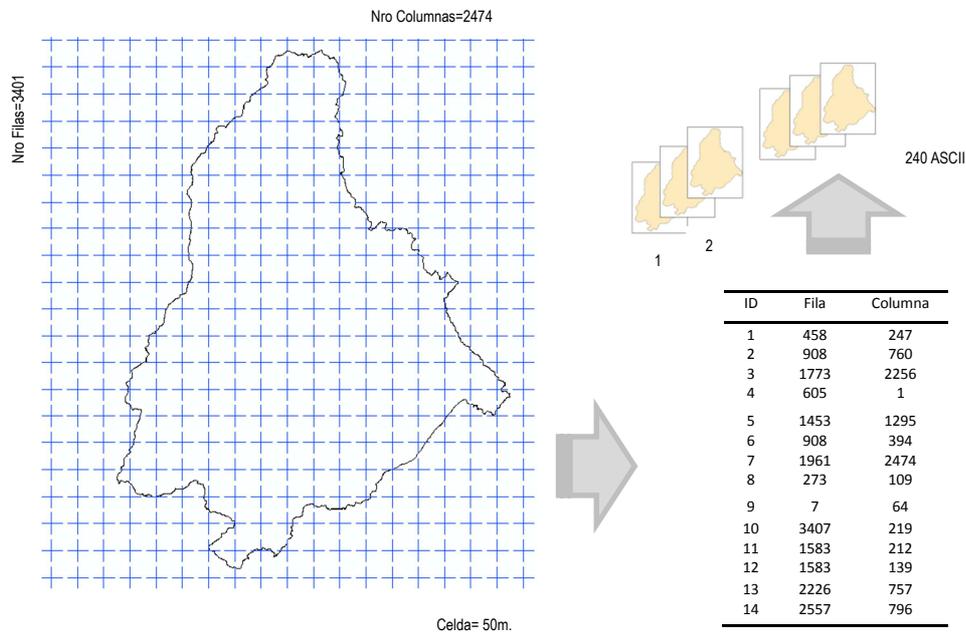


Figura 15: Esquema de conversión de la información pluviométrica a archivos ASCII
FUENTE: Elaboración propia

Con ayuda del software MATLAB se elaboraron 240 archivos ASCII a partir de la información de la ubicación Fila-Columna de las estaciones (output) y; la precipitación registrada y estimada de modelo MRI para 240 meses.

El siguiente procedimiento se obtuvo con ayuda del ArcGIS-Toolbox mediante un modelo builder (Figura 16). Los 240 archivos ASCII se convirtieron a formato Raster para usar el método de interpolación inverso a la distancia ponderada al cuadrado, en adelante IDW. Este método fue también empleado por Vargas A. et al. (2011) en su estudio de Análisis de la Distribución e Interpolación Espacial de las lluvias en Bogotá.

Cabe señalar que con el fin de disminuir la incertidumbre de los valores interpolados en las fronteras de un campo de precipitación calculado (interpolado a partir de registros en superficie) se dispuso de estaciones localizadas fuera de la zona de interés. De esta manera se logra que al momento de hacer la interpolación se cuente con más información. Por lo que, después de la interpolación, se debe extraer usando

como máscara la línea divisoria de la cuenca río Grande, para finalmente convertir a datos ASCII, los cuales presentan la información espacial pluviométrica de la precipitación registrada y estimada del modelo MRI 3.1S, MRI 3.1S-CDF, MRI 3.2S y MRI 3.2S-CDF.

Finalmente, se obtiene el vector de la precipitación registrada y modelo, a fin de compararlo mediante indicadores estadísticos.

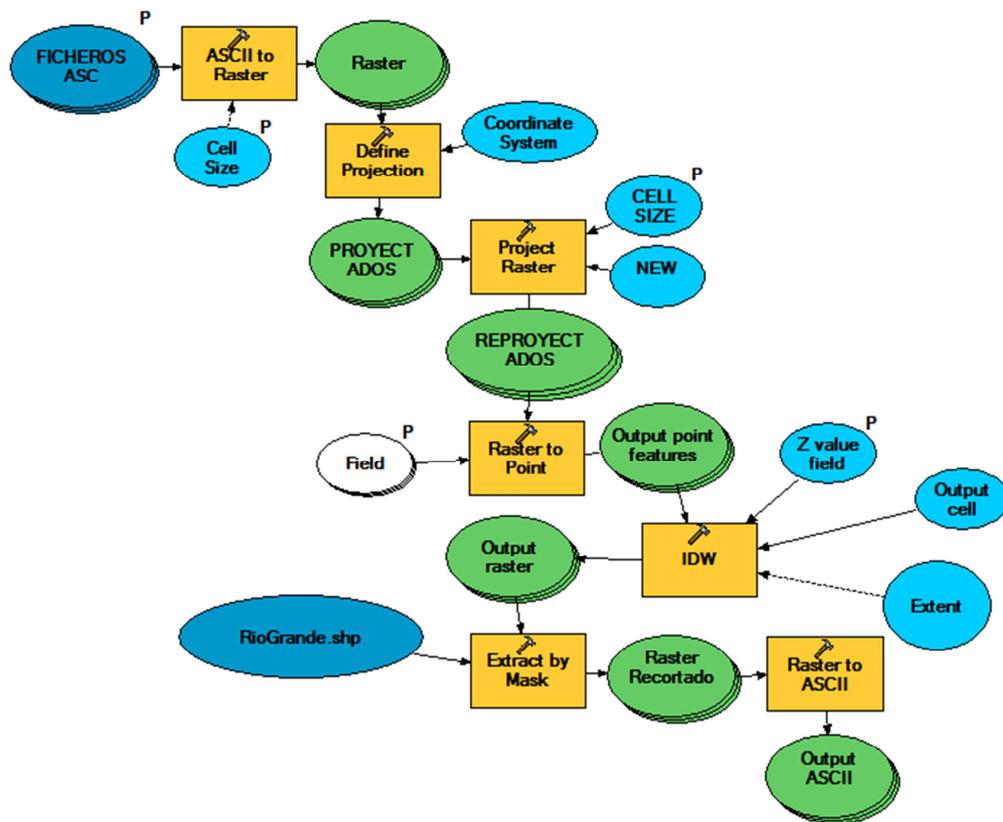


Figura 16. Diagrama de flujo del Modelo builder para la interpolación, recorte de la cuenca y conversión a archivos ASCII, usando el software ArcGIS

FUENTE: Elaboración propia.

3.3.3 ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LA PRECIPITACIÓN REGISTRADA Y ESTIMADA DE MODELO MRI-AGCM

Para el análisis de la lluvia se cuantifica el grado de dependencia entre los productos del Modelo MRI y la lluvia registrada, a escala mensual; puntual y espacialmente. Además, a través de técnicas gráficas, tales como: diagrama de dispersión y box plot.

Las herramientas estadísticas que permiten sintetizar el análisis y tener una visión más detallada del error son las siguientes:

- El coeficiente de correlación de Pearson (r), es un índice de dependencia lineal entre dos variables; (Hirsh et al., 1992). 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, σ_y Son las desviaciones estándar de “ x ” e “ y ”.

Los valores varían de menos uno a uno:

- Si $r = 1$, existe una correlación positiva perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables denominada relación directa: cuando una de ellas aumenta, la otra también lo hace en proporción constante.
 - Si $0 < r < 1$, 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. El índice indica una dependencia total entre las dos variables llamada relación inversa: cuando una de ellas aumenta, la otra disminuye en proporción constante.
- T-Student, para evaluar la significancia y los intervalos de confianza de las relaciones de dependencia, se empleará un nivel de significancia (α) del 5% y prueba estadística T-Student que se calcula con la siguiente ecuación:

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

La hipótesis nula 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 $\alpha/2$.

Para una mejor comprensión detallada en el Cuadro 7, se usa la notación S1 en el análisis de la comparación entre el producto de lluvia MRI 3.1S y la lluvia de pluviómetros; S2 para comparar el producto de lluvia MRI 3.2S con la lluvia

registrada de pluviómetros; la notación S3 para la comparación del producto de lluvia MRI 3.1S-CDF y la lluvia de pluviómetros; y, S4 para comparar la lluvia de MRI 3.2S-CDF con la lluvia de pluviómetros.

Cuadro 7: Notación usada en el tratamiento de los productos del modelo MRI

Notación	Fuente de información	Método de reducción de escala
To	Precipitación registrada	-
T1	MRI 3.1S	Bias corrección
T2	MRI 3.2S	
T3	MRI 3.1S-CDF	CDF
T4	MRI 3.2S-CDF	
S1	Registrada y MRI 3.1S	Bias corrección
S2	Registrada y MRI 3.2S	
S3	Registrada y MRI 3.1S-CDF	CDF
S4	Registrada y MRI 3.2S-CDF	

FUENTE: Elaboración propia

3.3.4 EVALUACIÓN DE LA SEQUÍA METEOROLÓGICA FUTURA

Se utilizaron tres índices de sequía: el Porcentaje de la Precipitación Normal (PPN), el Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) y el índice Z-score; con datos de 9 estaciones distribuidas uniformemente a lo largo de la cuenca río Grande durante el período 1980-1999, 2020-2039 y 2080-2099.

Una característica común que poseen, es que están calculados utilizando únicamente datos de precipitación. El intervalo de tiempo usado para el cálculo de los índices de sequía, es mensual; dado que es el más adecuado para el monitoreo de los efectos de las sequías en situaciones relativas a la agricultura, el suministro de agua y las extracciones de agua subterránea (Panu y Sharma, 2002). Además, los datos mensuales de precipitación suelen ser de fácil acceso en cualquier región del mundo. Vicente-Serrano y López Moreno (2006) indican que las sequías deben cuantificarse en paso de tiempo mensual, dado que este fenómeno necesita déficits de precipitación prolongados en el tiempo para ser identificado.

a. Porcentaje de Precipitación Normal (PPN)

El PPN se obtiene mediante dos pasos. Se calcula el valor de precipitación acumulada en un año, luego se divide entre el valor medio para el mes o período de

tiempo considerado, finalmente se multiplica por 100. El cálculo del PPN se hace mediante la expresión.

$$PPN = \frac{P_i}{PN_j} \times 100$$

Donde:

- PPN: Porcentaje de precipitación normal
- P_i : Precipitación anual acumulada, mm
- PN_j : Precipitación normal de la estación (promedio histórico), mm

La determinación de los años con sequía se lleva a cabo, estimando valores del PPN en cada estación climatológica para lo cual se utilizan las series históricas de precipitación mensual acumulada del periodo de registro de cada estación.

b. Índice de Precipitación Estandarizada (SPI)

El cálculo del SPI para la zona de estudio se basa en el registro de precipitación para una escala de 3, 6 y 12 meses. Dicho registro se ajusta a una distribución de probabilidad Gamma, y a continuación se transforma en una distribución normal de modo que el SPI medio y el período deseado sea cero (Edwards y McKee, 1997). Los valores positivos de SPI indican que la precipitación es mayor que la mediana, y los valores negativos, que es menor. Dado que el SPI está normalizado, los climas húmedos y secos se pueden representar del mismo modo, por lo que también se puede hacer un seguimiento de los períodos húmedos utilizando el SPI.

Se utilizó el software de cálculo SPI_L_6 desarrollado por el Centro Nacional de Mitigación de Sequía (NDMC, por sus siglas en inglés), con el propósito de definir y monitorear la sequía. El Centro Regional del Clima Occidental (WRCC, por sus siglas en inglés) y el Centro del Clima Colorado utilizan el SPI para monitorear los estados actuales de la sequía en los Estados Unidos.

c. Índice Z-score

El Z-score se calcula para cada escala de tiempo, dividiendo la diferencia de la precipitación acumulada en una escala de tiempo y el promedio de la precipitación de dicha escala, entre la desviación estándar de la población:

$$Z = \frac{X_i - \mu}{\sigma}$$

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados y discusión se presentan teniendo en cuenta los objetivos planteados en el desarrollo del presente estudio. (i) Reducción de escala del modelo de circulación global MRI, (ii) Comparación de la precipitación registrada y estimada del modelo MRI-AGCM; y, (iii) Evaluación de la sequía meteorológica futura: del 2020 al 2039 y del 2080 al 2099; a través del Porcentaje de Precipitación Normal (PPN), el Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) y el Índice Z-score.

4.1 ANÁLISIS EXPLORATORIO Y CONSISTENCIA DE DATOS

Con el fin de evaluar la consistencia de la base de datos, se realiza la prueba T-Student y H de Cramer; seguidamente un análisis de tendencia con el método de los promedios móviles. Finalmente se aplicó el Método del Vector Regional (MVR) para homogeneizar los datos pluviométricos y facilitar la discusión y resultados de las estaciones (Anexo 1).

Cabe señalar que no se trabajó con las estaciones ubicadas en la planicie con escasa precipitación, debido a que estas no representan un aporte significativo de lluvias en la cuenca. Sin embargo, se considera su clasificación climática y altitudinal para observar las diferencias entre las estaciones.

Es así, que se obtuvo tres grupos homogéneos de estaciones meteorológicas, cuya distribución espacial se basa en la Clasificación Climática por el Método de Thornthwaite y su altitud, se detalla a continuación:

- Grupo 1, conformado por las estaciones que se ubican en la planicie de la cuenca, con altitudes que alcanzan los 1200 msnm; y, representan un clima árido deficiente de lluvias en todas sus estaciones (E (d) B'1 H3), según la Clasificación climática por el Método de Thornthwaite.
- Grupo 2, conformado por las estaciones ubicadas en la parte alta de la cuenca de estudio, con altitudes que varían entre 2200–3900 msnm, en una zona clasificada como semiseca (C (o,i,p) B'2 H3).

- Grupo 3, representa las estaciones cercanas a los 5200 msnm de altitud, ubicadas en la zona climática B (o,i) D' H3, zona lluviosa con otoño e invierno secos.

La Figura 17 muestra las estaciones regionalizadas o agrupadas, según el Mapa de Clasificación Climática realizada por el SENAMHI (1988), en la que se observa que las estaciones trabajadas se encuentran dentro de tres regiones climáticas clasificadas: E (d) B'1 H3, árido con deficiencia de lluvias, de temperatura semicalido y húmedo; C (o,i,p) B'2 H3, semiseco con otoño, invierno y primavera seca, con temperatura templado y húmedo; y, B (o,i) D' H3, lluvioso con otoño e invierno seco, semifrígido y húmedo. Asimismo, se clasifica las estaciones en tres grupos según la distribución: el grupo 1 se encuentra en la planicie, y los grupos 2 y 3 pertenecen a altitudes que superan los 2200 msnm.

Se aceptaron las regiones homogéneas con correlaciones altas entre la estación y el vector, se descartaron las estaciones con un comportamiento diferente al Vector y las que presentan un cambio de pendiente, en el gráfico de los índices anuales del vector y las estaciones, y la suma de los índices anuales del Vector y las estaciones, respectivamente.

La variabilidad interanual de los índices del vector para el Grupo 2 (Figura 18. Panel superior) muestra un comportamiento similar entre sus integrantes a excepción de la estación Pampa Blanca, por lo que no se incluyó en el análisis del Vector Regional. Asimismo, no se consideró los datos pluviométricos de 1992, puesto que se registraron escasa o nula precipitación.

En el Anexo 1, se muestran los cuadros de las correlaciones/vector y la desviación estándar de los desvíos. Las correlaciones entre el vector y las estaciones para el grupo 2 están por encima de $r > 0.8$ y la D.E.D tiene valores menores a 0.3.

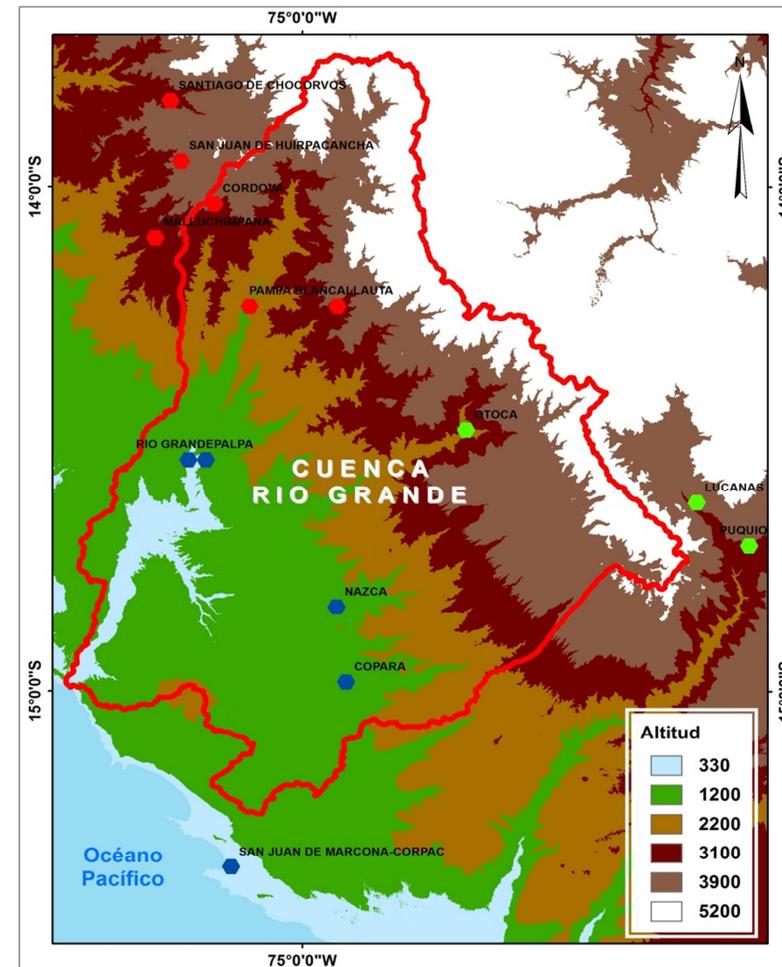
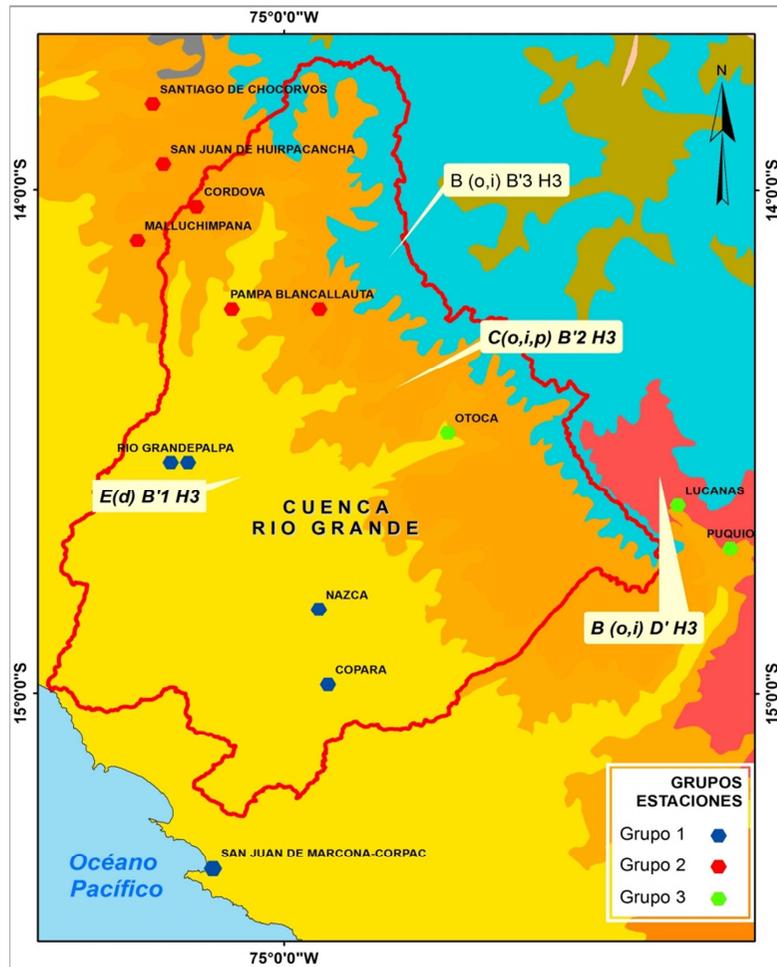


Figura 17: Izquierda: Regionalización de estaciones según el Mapa de Clasificación Climática realizada por el SENAMHI: E (d) B'1 H3, árido con deficiencia de lluvias, de temperatura semicalido y húmedo; C (o,i,p) B'2 H3, semiseco con otoño, invierno y primavera seca, con temperatura templado y húmedo; y, B (o,i) D' H3, lluvioso con otoño e invierno seco, semifrígido y húmedo. Margen Derecho: Regionalización de estaciones según altimetría de la zona de estudio.

FUENTE: Elaboración propia usando el Modelo Digital de Elevación ASTER-GDEM y el Mapa de Clasificación Climática

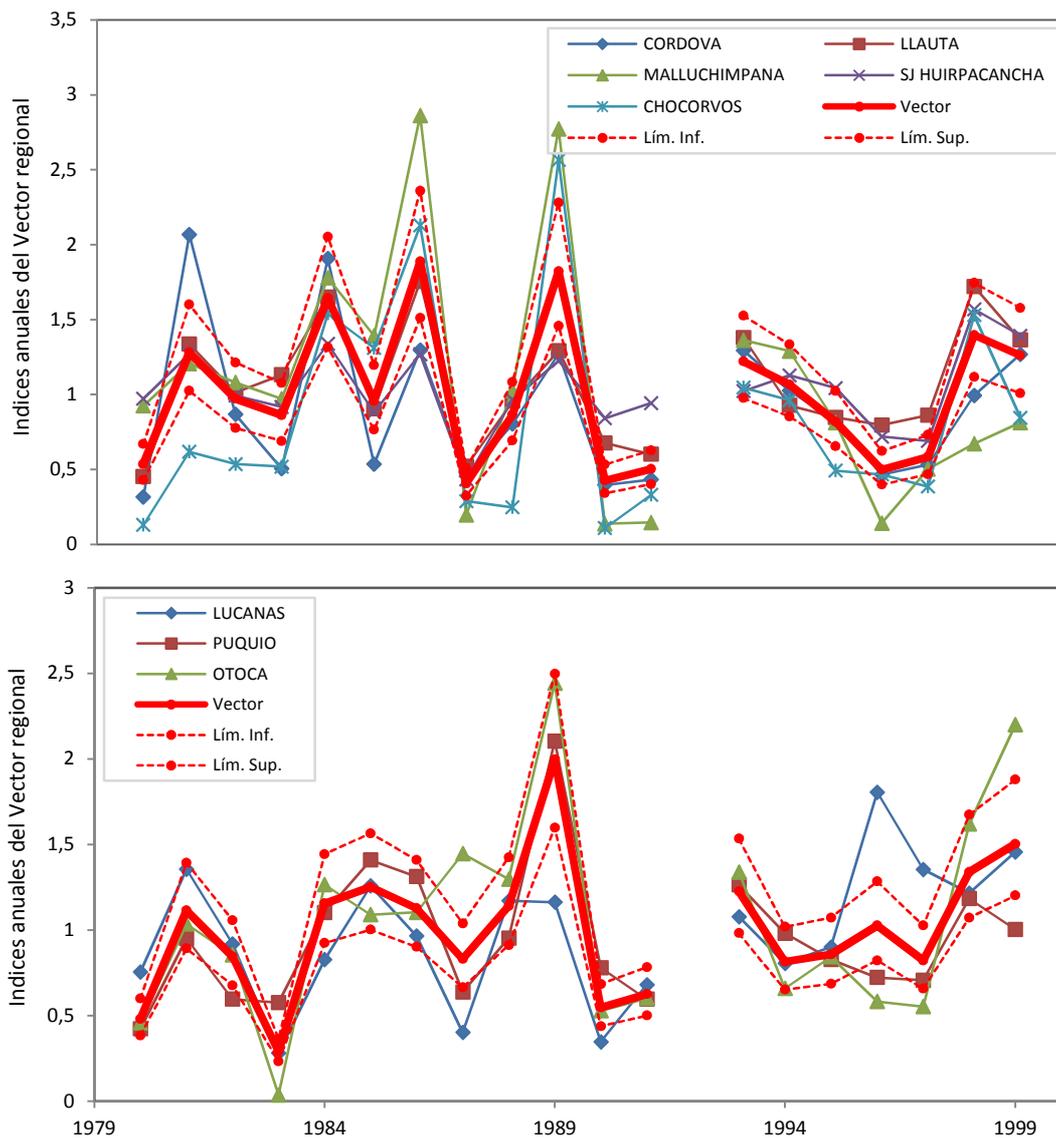


Figura 18: Índices anuales del Vector y las estaciones del Grupo 2 (Panel superior) y Grupo 3 (Panel inferior)

Por otro lado, la Figura 19 (Panel superior e inferior) indica una consistencia de la información registrada, no se observan quiebres significativos en la suma de los índices del Vector y las estaciones.

Las estaciones del Grupo 2 y 3 muestran un incremento y decremento los mismo años que el Vector, esto se refleja en altos valores de correlación (Anexo 1). No se observan cambios de pendiente.

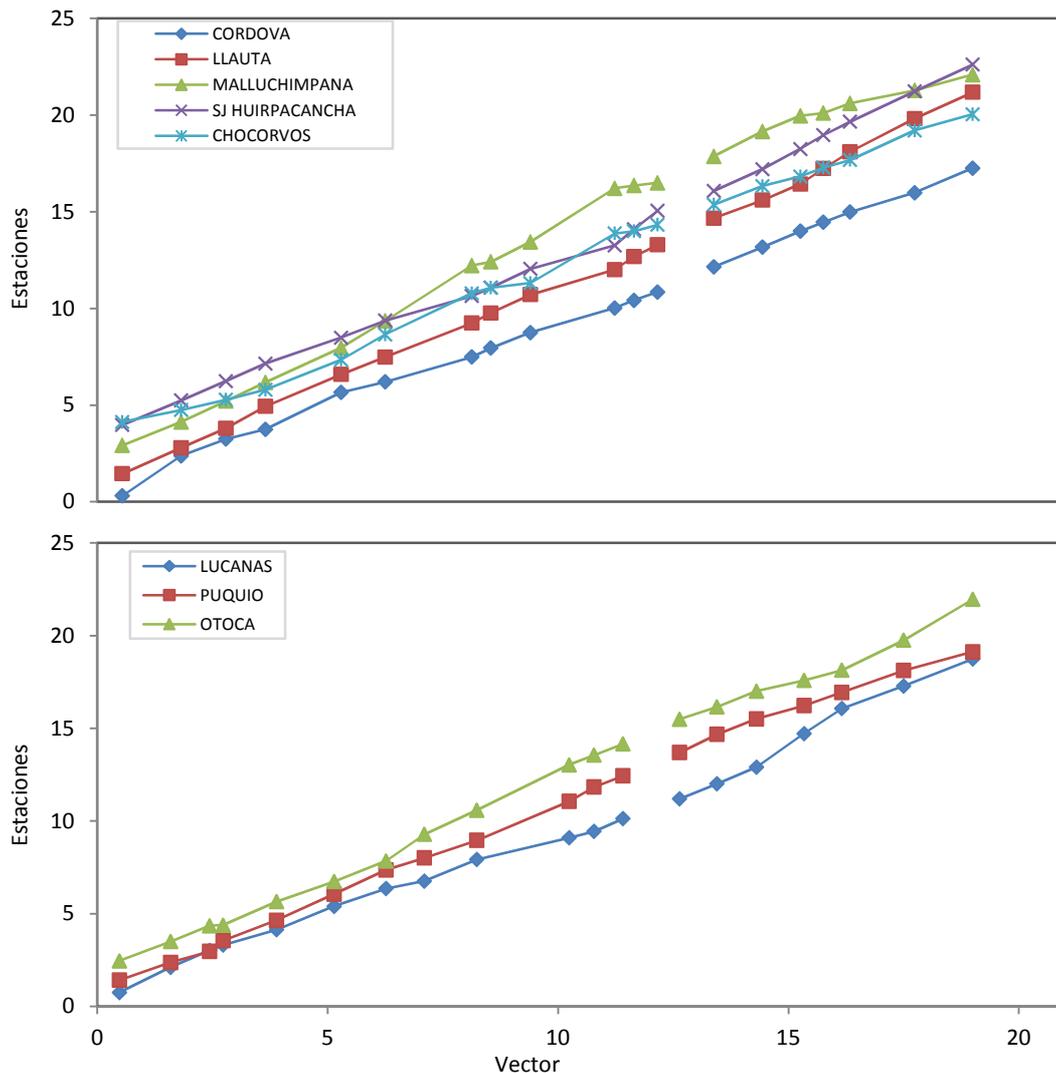


Figura 19: Suma de los Índices anuales del Vector y las estaciones del Grupo 2 (Panel superior) y Grupo 3 (Panel inferior)

4.2 REDUCCIÓN DE ESCALA DE LA PRECIPITACIÓN ESTIMADA DEL MODELO MRI-AGCM

Para las series simuladas y observadas, se realizó un análisis estadístico que se representan en los histogramas de distribución de probabilidad. A partir de los resultados de los modelos MRI-AGCM, se realiza la reducción de escala paramétrica y no paramétrica con lo cual se obtienen 4 sub modelos detallados en el Cuadro 7: T1 (MRI 3.1S), T2 (MRI 3.2S), T3 (MRI 3.1S-CDF), y T4 (MRI 3.2S-CDF).

La Figura 20-22, muestra los histogramas de la Función de densidad de probabilidad de los productos T1, T2, T3 y T4, aplicando previamente un método de corrección de sesgo paramétrica (Bias correction) y no paramétrica (CDF mapping). La primera columna indica la precipitación registrada, la segunda columna muestra la precipitación de los productos;

finalmente, se observa que en la última columna, la precipitación estimada del modelo MRI se ajusta a la observada mediante la reducción de escala (Wilby et al. 2004).

La probabilidad de precipitación para la columna MRI aumenta para valores cercanos a cero y disminuye conforme mengua la precipitación en cada estación. Sin embargo, mediante la reducción de escala se aprecia que que el modelo MRI se ajusta a la precipitación registrada. Estos resultados, son compatibles con lo expuesto por Nakayama et al (2011).

En las siguientes líneas se evaluará si los resultados de los modelos sobreestiman o subestiman la precipitación registrada.

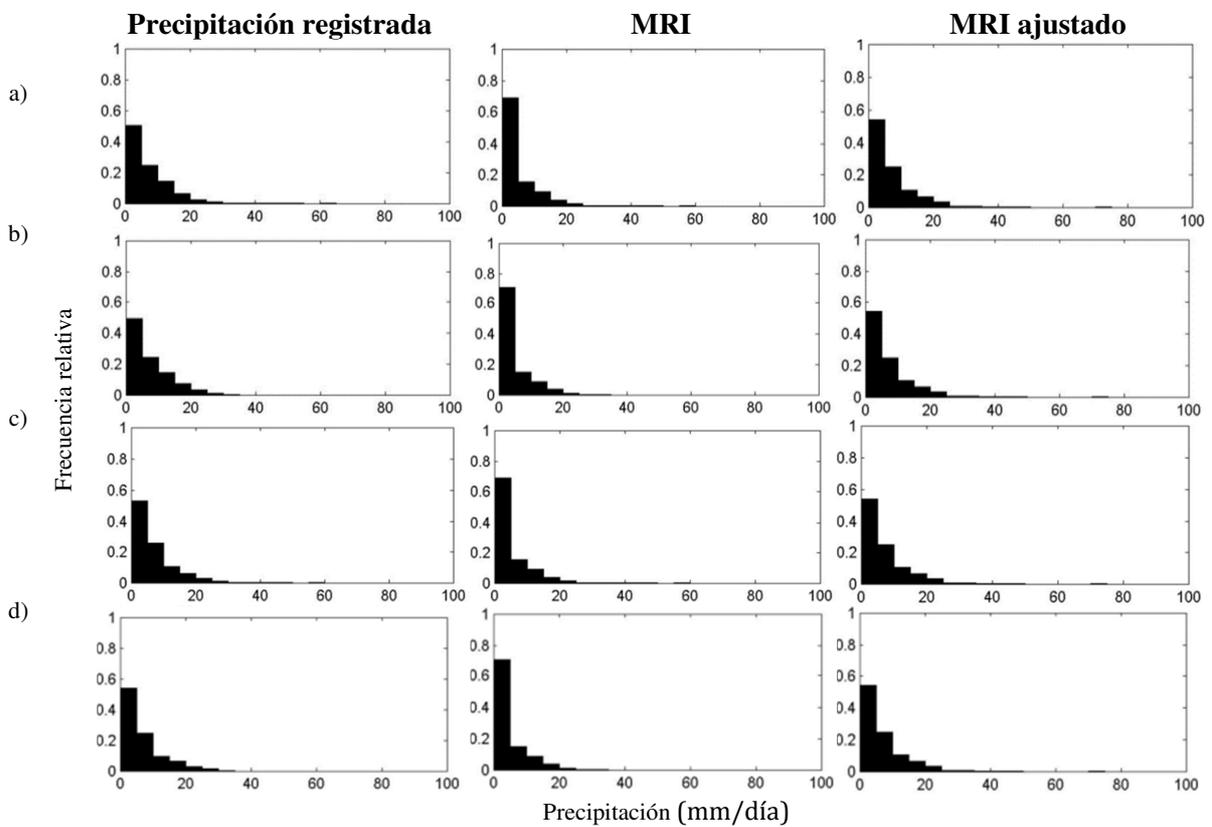


Figura 20: Histogramas de Función de densidad de probabilidad para las comparaciones: a) S1, b) S2, c) S3 y d) S4 - Estación Córdoba

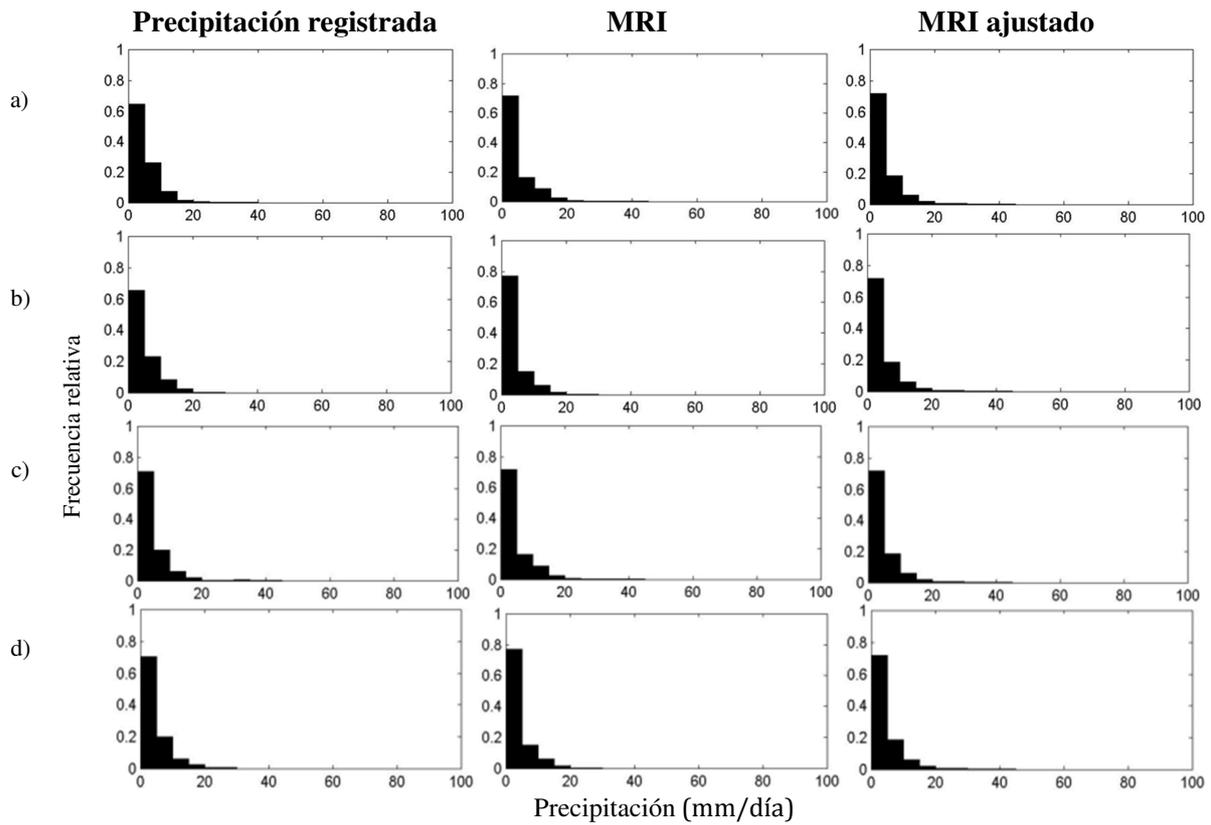


Figura 21: Histogramas de Función de densidad de probabilidad para las comparaciones: a) S1, b) S2, c) S3 y d) S4 - Estación Llauta

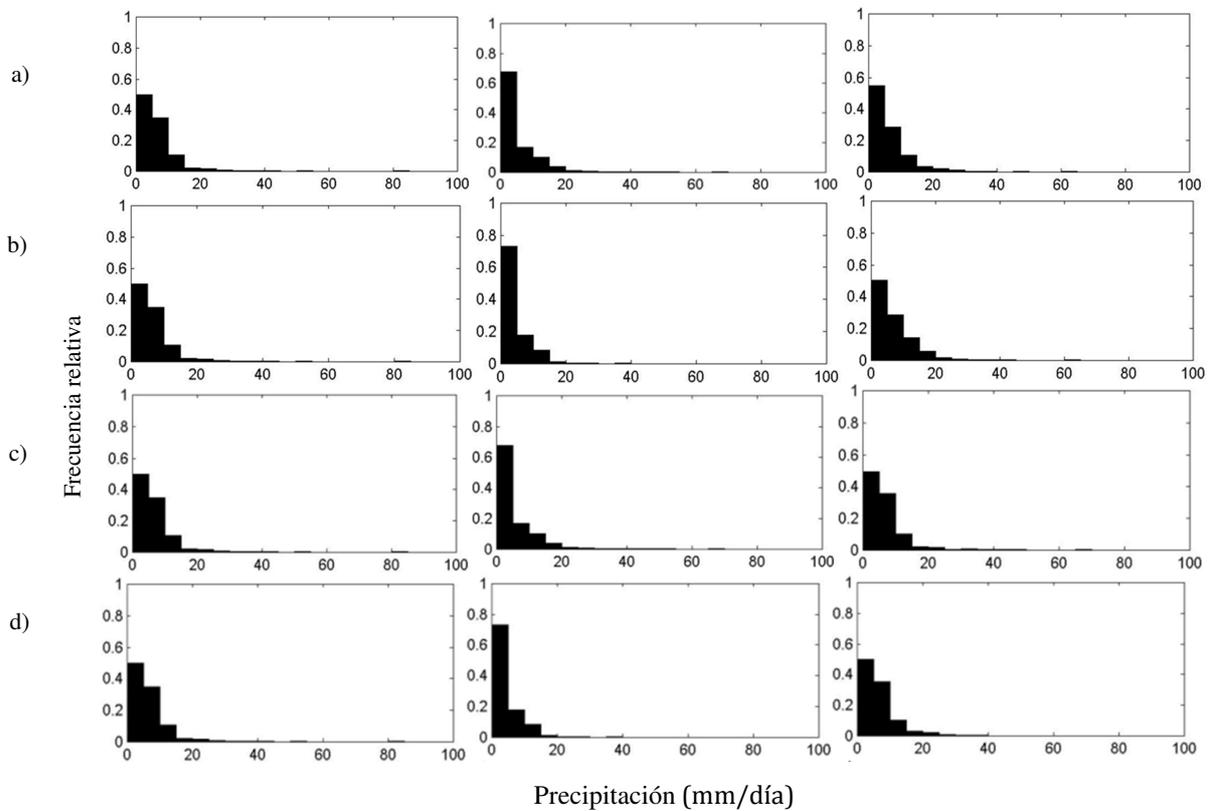


Figura 22: Histogramas de Función de densidad de probabilidad para las comparaciones: a) S1, b) S2, c) S3 y d) S4 - Estación Lucanas

4.3 ANÁLISIS DE LA PRECIPITACION REGISTRADA Y ESTIMADA DEL MODELO MRI

Se realiza el análisis estadístico puntual y espacial para la comparación entre la precipitación registrada y estimada de modelo MRI (S1, S2, S3 y S4).

4.3.1 DEPENDENCIA PUNTUAL

Se trabaja con la escala mensual, ya que las correlaciones entre la precipitación registrada y estimada a partir de modelo indican que es aceptable a escala mensual y resulta pobre a escala anual y diaria.

La Figura 23 muestra baja relación de dependencia lineal para las estaciones seleccionadas, las mismas que aumentan para los productos T2 y T4 (MRI 3.2S) llegando a valores igual a 0.5 para la estación ubicada en la parte norte de la cuenca alta. La mejor correlación para los modelos mencionados, se explica con las nuevas parametrizaciones que produjeron mejoras en el modelo MRI 3.2S (Mizuta et al. 2012). Sin embargo, estas no dejan de ser correlaciones pobres a escala puntual.

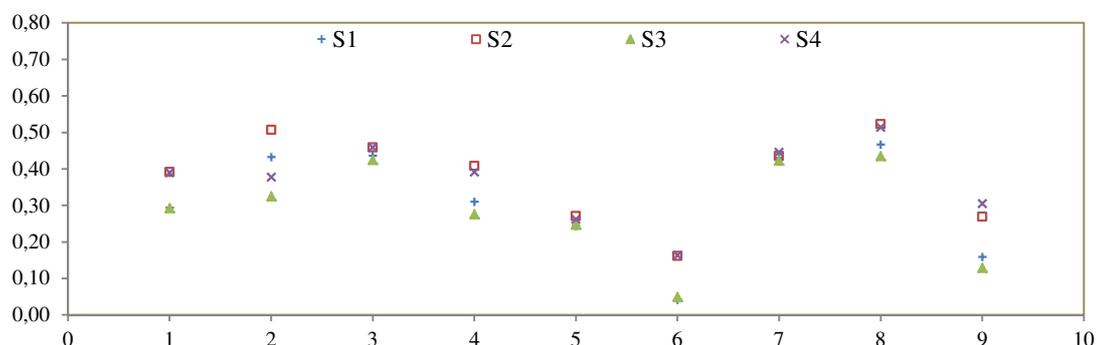


Figura 23: Coeficiente de correlación mensual de Pearson entre la precipitación registrada y estimada del modelo MRI. Periodo de análisis: Enero de 1980 a Diciembre de 1999

Mediante gráficos de histogramas de lluvia de los productos MRI (cuatro productos) y la precipitación registrada, se puede apreciar en la Figura 25-27 la sobreestimación de los productos MRI en las comparaciones S1 y S2 sobre S3 y S4. Además, se obtuvieron correlaciones mensuales puntuales bajas para los modelos S1 y S2 (reducción escala paramétrica) que aumentan para los modelos S3 y S4 (reducción de escala no paramétrica). Sin embargo, como se mencionó anteriormente, las correlaciones mensuales aumentan para los modelos S2 y S4 (MRI 3.2S). Los cuatro productos diferencian las épocas de estiaje y avenida.

4.3.2 DEPENDENCIA ESPACIAL

La Figura 24 muestra las correlaciones positivas entre los productos mensuales de la precipitación registrada y estimada del modelo MRI, en las comparaciones S1, S2, S3 y S4; y, de la nube de puntos, se observa una correlación positiva significativa con un nivel de significancia (α) del 5 por ciento, para los modelos en todos los meses.

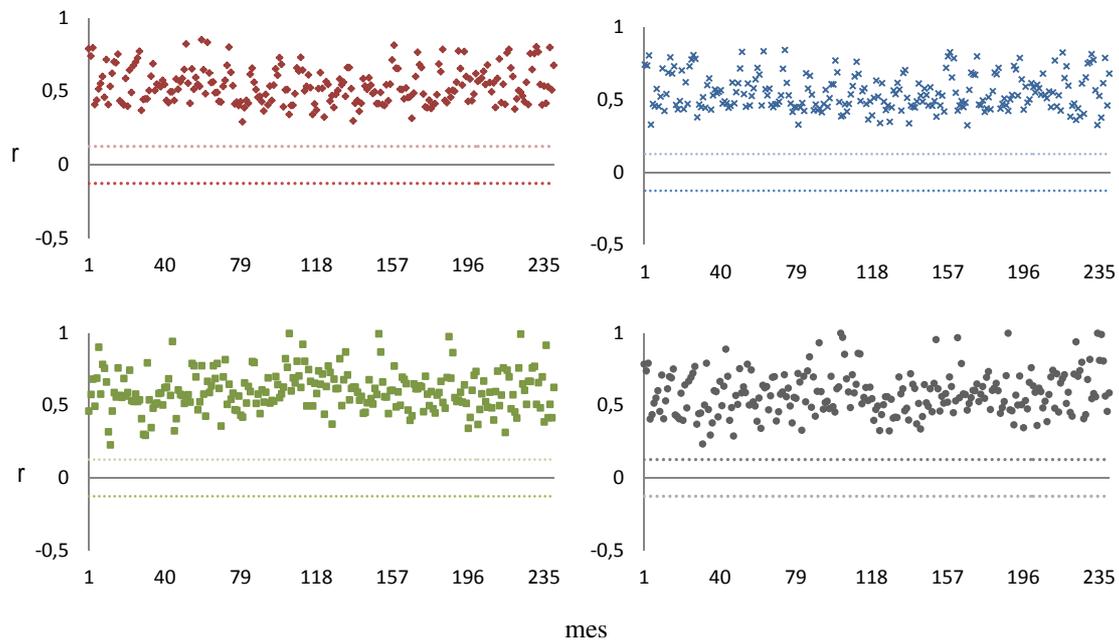


Figura 24. Correlación entre los campos de precipitación mensual de la precipitación registrada y estimada del modelo MRI para las comparaciones S1, S2, S3 y S4.

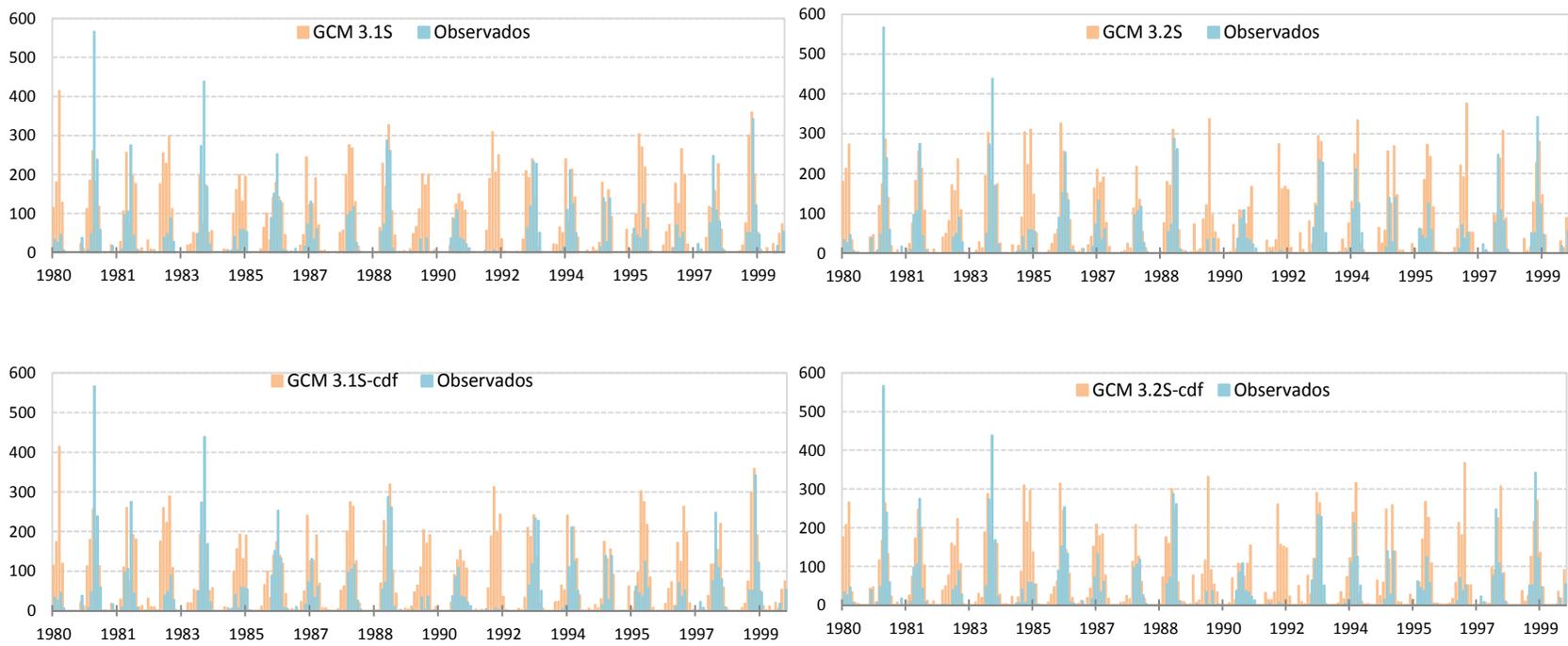


Figura 25: Histogramas de la precipitación mensual observada y estimada de Modelo de Circulación Global (GCM) MRI en la estación Córdoba a una altitud de 3069 msnm

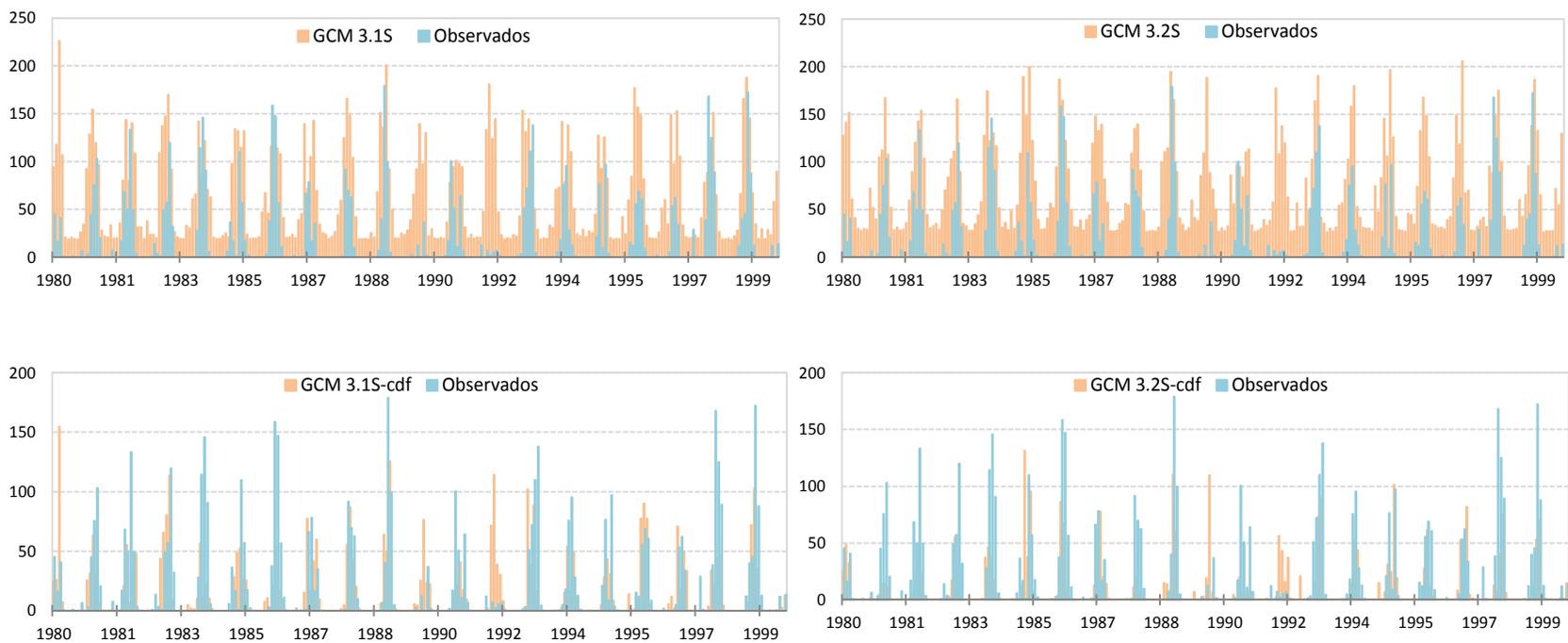


Figura 26: Histogramas de la precipitación mensual observada y estimada de Modelo de Circulación Global (GCM) MRI en la estación Llauta a una altitud de 3043 msnm

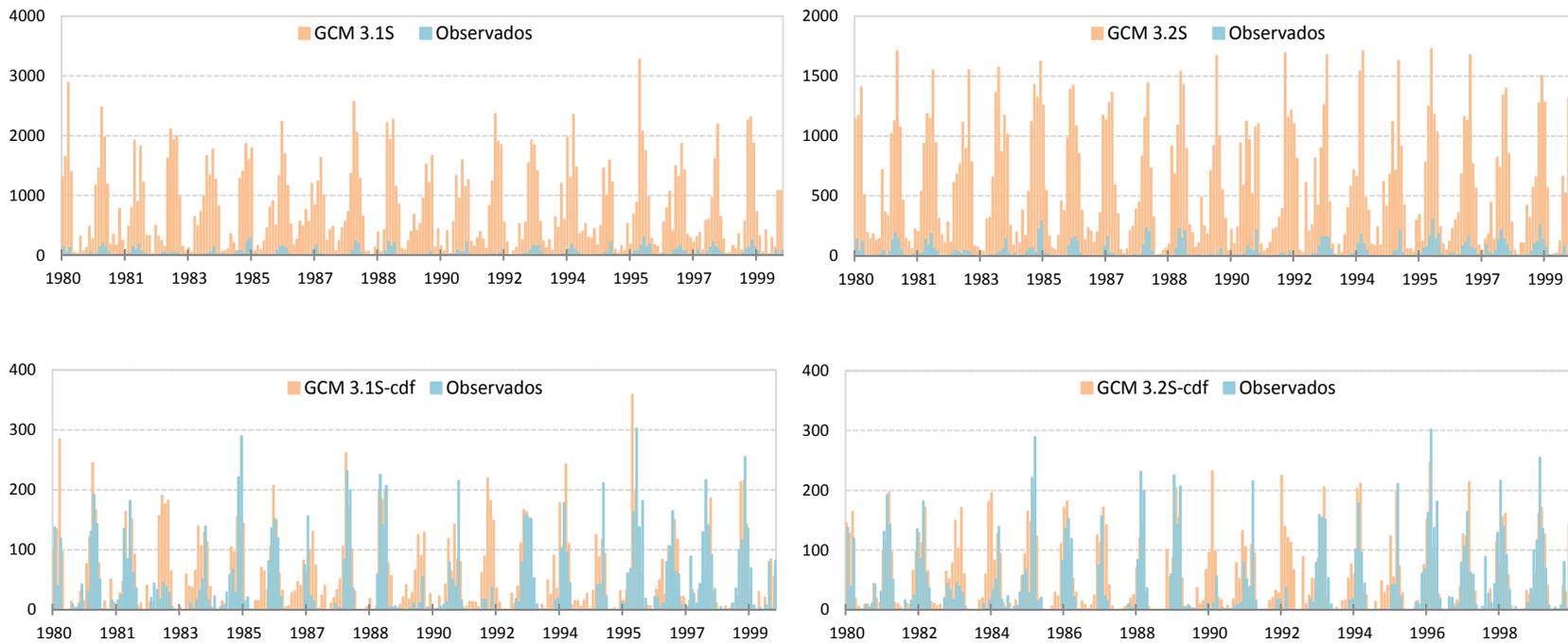


Figura 27: Histogramas de la precipitación mensual observada y estimada de Modelo de Circulación Global (GCM) MRI en la estación Lucanas a una altitud de 3297 msnm

En general, se aprecia en el Box plot de la Figura 28, que los coeficientes de Pearson para S1 y S2 obtienen valores altos de 0.84 y 0.85; mientras que S3 y S4, con valores máximos de 0.98 y 0.99, respectivamente.

Además, la correlación de Pearson de la comparación S4 presenta una alta variabilidad al tener un mayor rango intercuartil en comparación con S1, S2 y S3. Esto puede deberse a que valores más altos de Pearson se ven influenciados por lluvias máximas y mínimas en algunas zonas de la cuenca.

Se observa que la comparación S3 presenta el 50 por ciento de datos ajustados a una distribución simétrica, mientras que para el resto de los modelos, la distribución es sesgada a la derecha (asimétrica positiva).

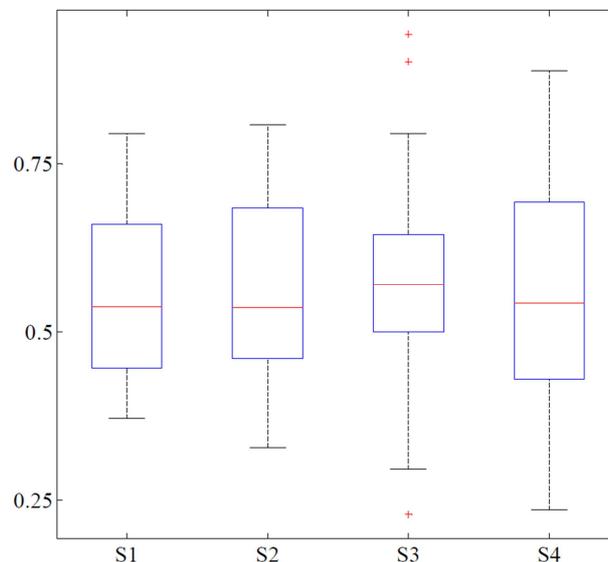


Figura 28. “Box plot” de la correlación mensual espacial para las comparaciones S1, S2, S3 y S4, con la mediana (línea roja), los cuartiles a 25 y 75 por ciento (caja), el valor máximo y mínimo (línea de color negro), y valores “outliers” (cruces rojas)

La Figura 30 muestra los campos de precipitación mensual de la mejor correlación T1 (MRI 3.1S), para la combinación S1 (To-T1) ($r=0.7$), que ocurre en agosto de 1997 (estación seca). El modelo detecta la lluvia pero sobreestima su valor en 74, 65 y 126 por ciento para la zona baja, media y alta de la cuenca, respectivamente.

Asimismo, muestra la mejor correlación ($r=0.7$) para la combinación S2 (To-T2) correspondiente a agosto de 1997 (estación seca), con una sobreestimación de 56, 46 y 78 por ciento para la zona baja, media y alta de la cuenca.

La Figura 31 muestra los campos de precipitación mensual de la mejor correlación T3 ($r=0.9$) y T4 ($r=0.8$), para ambas combinaciones S3 (To-T3) y S4 (To-T4) que ocurre en marzo de 1989, estos corresponden a la época de lluvias. En dichas figuras los productos T3 y T4 detectan las lluvias en la zona costera y en la parte media y alta de la cuenca, pero sobreestiman su valor en 26, 29 y 28 por ciento para T3; y, 2 por ciento en la zona alta de la cuenca para T4.

Además, se analizó las correlaciones de los mapas de lluvia para el mismo periodo (marzo de 1989) con las combinaciones S1 (To-T1) y S2 (To-T2), en la zona alta de la cuenca, resultando una sobreestimación en 590 y 556 por ciento, respectivamente. También detectan las lluvias en la zona costera y en la parte media de la cuenca, pero sobreestiman su valor en 730 y 594 por ciento para T1 y 656 y 582 por ciento, para T2.

La sobreestimación en la parte alta de la cuenca, puede deberse a la compleja orografía de la zona. Posiblemente, la razón para esta sobreestimación radique en el cálculo exagerado de los vientos provocados por la presencia de montañas y elevaciones, resultado de los pesos de los componentes en las ecuaciones diferenciales del modelo (Palacios, Serrano, 2011). Además, que la resolución aún no es lo suficientemente alta para describir todos los procesos. Cabe recordar que el modelo MRI-AGCM es un modelo hidrostático, lo que significa que simula una atmosfera en equilibrio hidrostático en la que la presión en un punto depende únicamente del peso de la columna de aire que tiene por encima.

Estos resultados son similares a lo señalado por Ruiz (2007), el modelo de alta resolución MRI presentó una simulación aceptable de clima presente para áreas llanas de Colombia, en zonas montañosas el modelo tiende a sobreestimar la lluvia con valores que pueden superar el 400 por ciento.

Cabe indicar, que las combinaciones S1 y S2 tienen las mejores correlaciones para la época seca de la cuenca. Sin embargo, no sucede lo mismo para la época de lluvias, ya que como se ha mencionado, dichos productos sobreestiman en gran porcentaje. Mientras que, para las épocas de lluvia, las mejores correlaciones la tienen las combinaciones S3 y S4, sin embargo, estas no correlacionan bien en épocas secas.

En un gráfico de correlación promedio mensual (Figura 29) se observa claras diferencias estacionales. En relación a enero, febrero y marzo (estación lluviosa) se muestra una correlación significativa para las cuatro combinaciones S1, S2, S3 y S4. Sin embargo, S1 y S2 tienen los más altos valores debido a que los productos T1 y T2 sobreestiman en mayor porcentaje la precipitación registrada; y a pesar de tener correlaciones más bajas, los productos T3 y T4 estiman mejor la precipitación para la época de lluvias.

Además, solo para S3 y S4, la correlación va en aumento en los meses de invierno (estación seca), ya que la presencia de ceros estaría favoreciendo una mayor correlación. Es decir, los productos T3 y T4 son más sensibles a la presencia de días sin lluvia, a diferencia de T1 y T2.

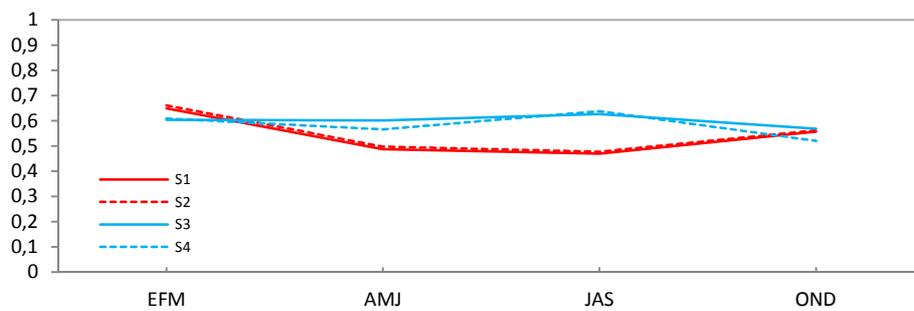


Figura 29: Correlación promedio mensual para la comparación S1, S2 S3 y S4

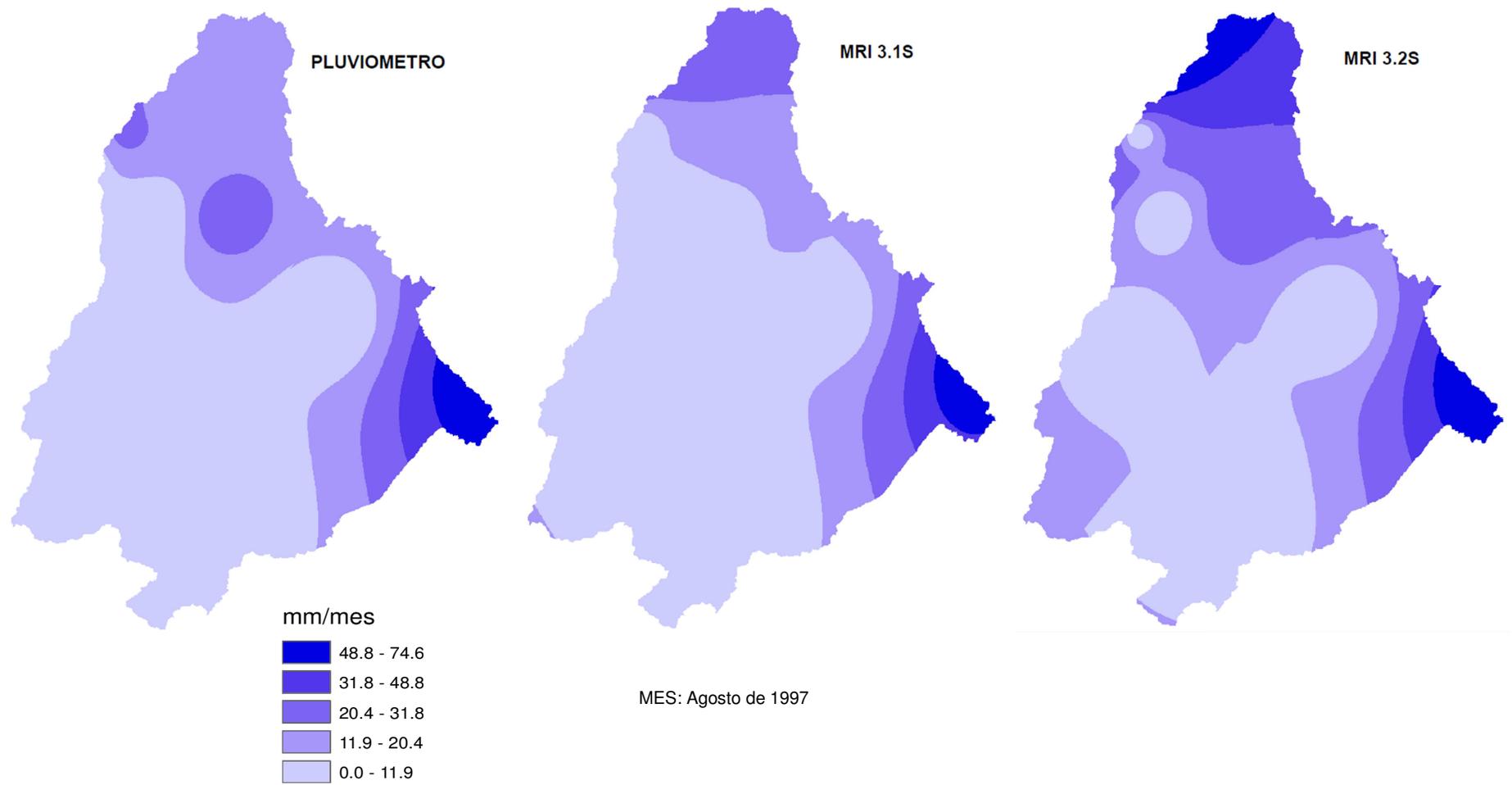


Figura 30: Campos de precipitación mensual T_0 (Pluviómetro), T_1 (MRI 3.1S) y T_2 (MRI 3.2S) de la mejor correlación S_1 ($T_0 - T_1$) y S_2 ($T_0 - T_2$)

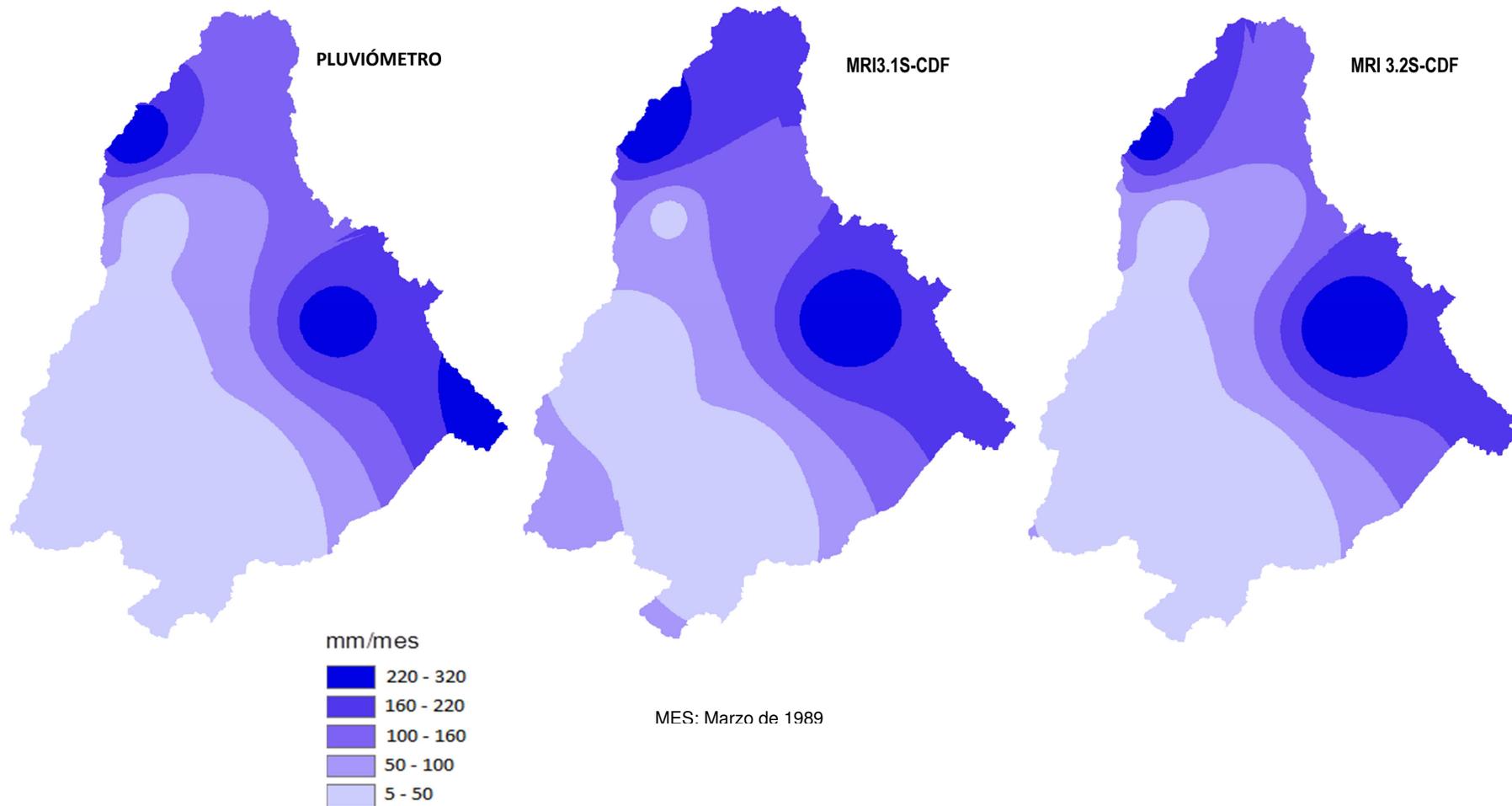


Figura 31: Campos de precipitación mensual pluviométrica T_0 (Pluviómetro), T_3 (MRI 3.1S-CDF) y T_4 (MRI 3.2S-CDF) de la mejor correlación S_3 ($T_0 - T_3$) y S_4 ($T_0 - T_4$)

4.4 EVALUACIÓN DE LA SEQUÍA METEOROLÓGICA FUTURA

Con el fin de identificar los riesgos de sequía a futuro en la cuenca río Grande, se ha obtenido índices de sequía para el periodo futuro cercano y el futuro lejano. Los resultados expuestos hacen referencia a las estaciones representativas de cada zona homogénea.

4.2.1 PORCENTAJE DE PRECIPITACIÓN NORMAL (PPN)

Se ha realizado la evaluación del Porcentaje de Precipitación Normal, a fin de simplificar el desarrollo, para tres estaciones pluviométricas representativas: Córdova, Llauta y Lucanas. Se presenta únicamente las figuras obtenidas en escalas de 12 meses.

La Figura 32 muestra las anomalías de precipitación en la estación Córdova, representante del grupo 2, se trabaja con los productos estimados a futuro T3 y T4 debido a que presentaron mejores correlaciones con la precipitación pluviométrica para el periodo presente.

Para el primer trimestre se tiene valores que superan el 100 por ciento, alcanzando valores de 900 por ciento (Húmedo). Sin embargo, se observa un valor atípico en el primer trimestre de 1992 (enero a marzo), con una sequía extrema, que corresponde a 8.7mm. Existe una marcada estacionalidad, en las que un periodo de lluvias (enero a marzo) puede tener valores 566.6 y 0 mm/mes en un periodo de estiaje.

En el futuro cercano, para T3 y T4 queda definido una sequía extrema para el tercer trimestre (julio a setiembre), mientras que el segundo y cuarto trimestre elevan su categoría a sequía moderada o severa, ya que las lluvias se incrementan con los productos T3 y T4 para este periodo.

Para el futuro lejano se observa que la tendencia continúa similar al periodo futuro cercano. Sin embargo, la proyección T3 presenta valores altos de precipitación, incluso en el periodo de estiaje. Para el cuarto trimestre se tiene que el 55 por ciento de los años de estudio constituye categoría Normal (80-100 por ciento), mientras que para T4, el 55 por ciento se categoriza como Sequía Extrema (<40 por ciento).

En el cuarto trimestre de 2087, T3 da un valor de precipitación de 380mm, mientras que T4, tiene 97mm. De igual manera, para el tercer trimestre de 2093, se obtiene una precipitación de 82mm y 10mm para T3 y T4, respectivamente. Como se ha

desarrollado en los ítems anteriores, el producto T4 obtiene mejores correlaciones que el producto T3. En este sentido se puede decir que T4 arroja mejores resultados de la PPN durante los meses de estiaje.

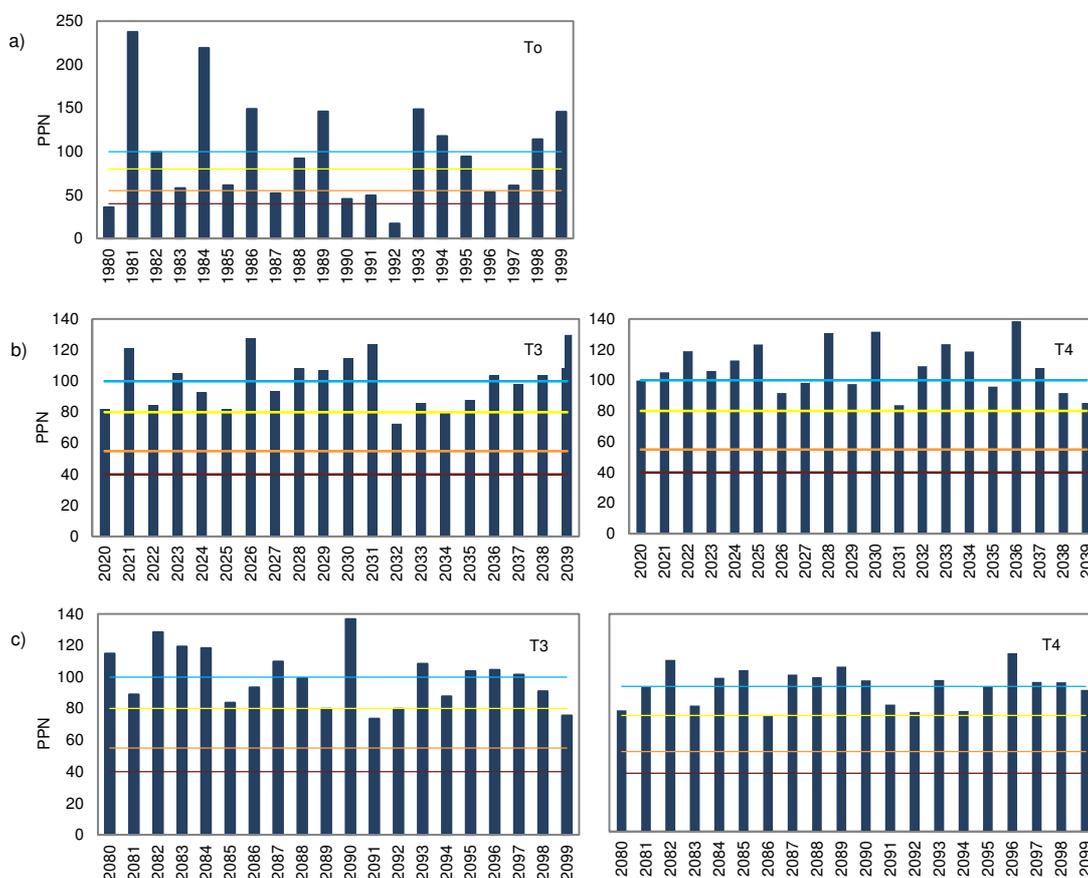


Figura 32: Histogramas del Porcentaje de Precipitación Normal (PPN) para una escala 12 meses en la estación Córdoba: a) Presente (1980 a 1999), b) Futuro cercano (2020 a 2039) y c) Futuro lejano (2080 a 2099); para los productos T3 y T4.

Para el periodo 1980-1999, el análisis del PPN, revela que el 45 por ciento de los años la precipitación anual ha sido inferior a la precipitación media del periodo, mientras que el 55 por ciento, ha sido superior a dicha media. El 45 por ciento de los años fueron secos frente al 55 por ciento restante que fueron normales o húmedos. Agrupando por intervalos de precipitación, el 10, 15 y 40 por ciento ha representado una sequía extrema, normal y húmeda o muy húmeda.

Para el periodo futuro cercano y lejano, se presenta casi en su totalidad, los meses normales; esto puede deberse a que la precipitación de los primeros trimestres compensa la falta de lluvia en la época de estiaje.

La estación Llauta (Figura 33), representante del grupo 2, presenta escasa lluvia en el segundo, tercer y cuarto trimestre del periodo presente, por lo que para una escala de 12 meses, los cambios no se ven tan definidos como en el caso de las sequías a corto plazo.

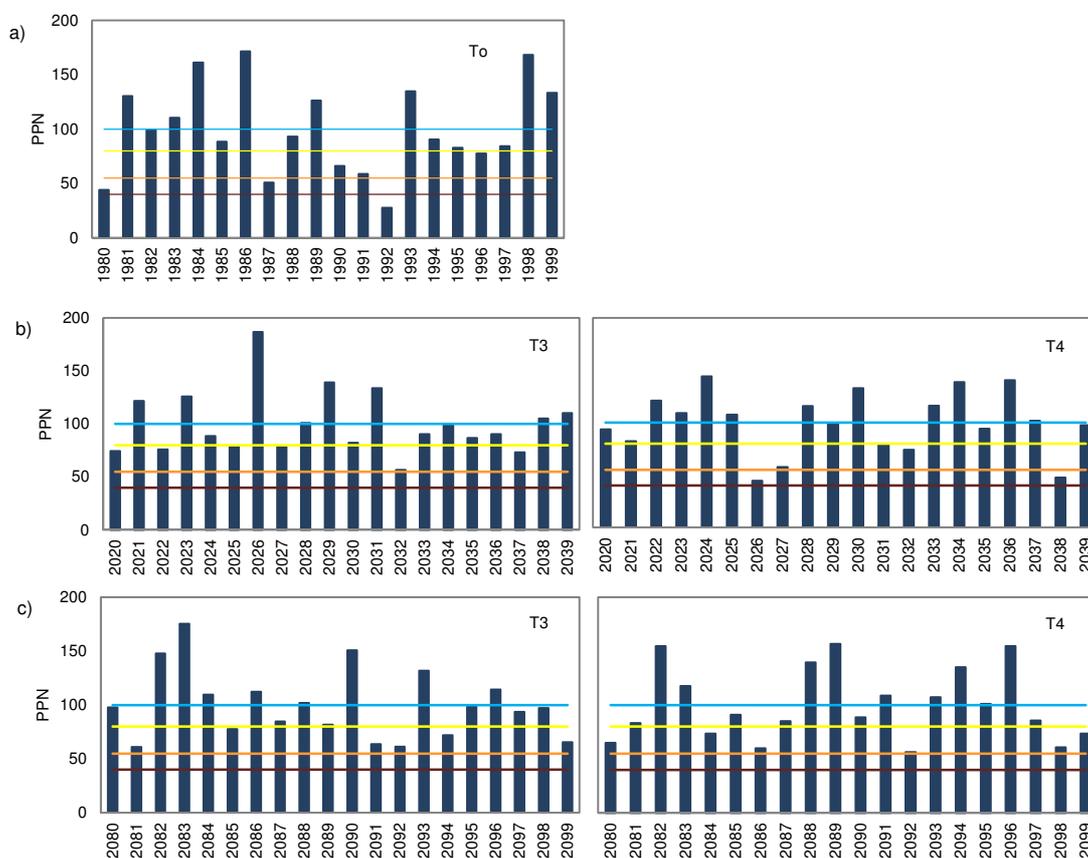


Figura 33: Histogramas del índice Porcentaje de precipitación normal (PPN) para una escala 12 meses en la estación Llauta: a) Presente (1980 a 1999), b) Futuro cercano (2020 a 2039) y c) Futuro lejano (2080 a 2099)

En general, se observa que los valores de PPN aumentan para el periodo futuro cercano y futuro lejano, sin embargo difiere entre los productos T3 y T4. El producto T4 muestra un aumento del 30 por ciento en los registros del segundo trimestre a sequía extrema en un corto plazo (escala 3 meses)

En la escala de 12 meses, los altos valores de precipitación del primer trimestre compensan la falta de precipitación en los siguientes, alcanzando una categoría de sequía moderada, normal y húmeda.

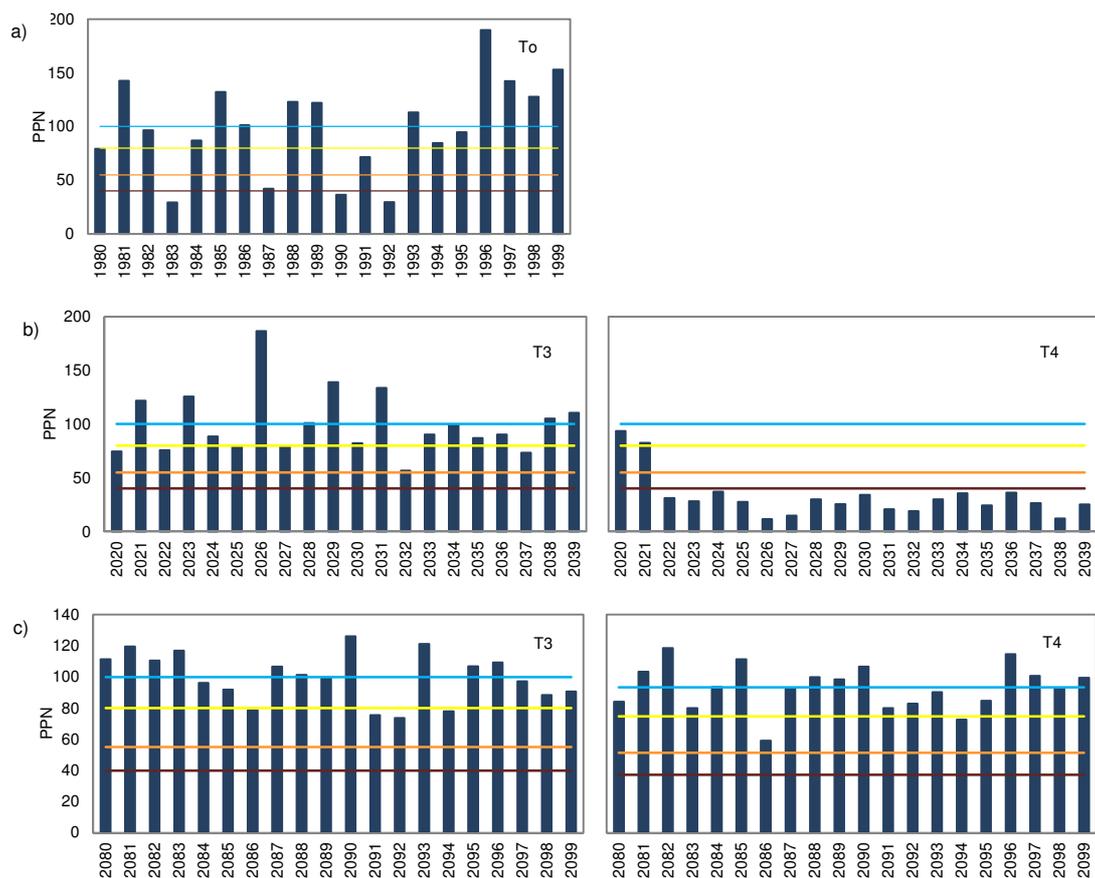


Figura 34: Histogramas del índice Porcentaje de precipitación normal (PPN) para una escala 12 meses en la estación Lucanas: a) Presente (1980 a 1999), b) Futuro cercano (2020 a 2039) y c) Futuro lejano (2080 a 2099)

La estación Lucanas (Figura 34), representante del grupo 3, muestra una sequía extrema solo para 1983 y 1992, los cuales corresponden a la sequía que produjo el Fenómeno de El Niño en dichos periodos y el 70 por ciento del registro presenta un valor normal. En base al PPN del futuro cercano existe una gran diferencia entre los modelos T3 y T4, ya que este último presenta un 90 por ciento con una sequía extrema; mientras que con el producto T3 se obtiene un 85 por ciento dentro del rango Normal.

En un periodo futuro cercano con T3 no se presentaran sequías a diferencia del producto T4. Y, en un periodo futuro lejano con ambos productos se obtienen valores correspondientes al rango Normal a Húmedo.

4.2.2 ÍNDICE DE PRECIPITACIÓN ESTANDARIZADA (SPI)

La Figura 35, estación Córdova, muestra los resultados del SPI 3 meses para el periodo presente, una sequía moderada de enero a marzo (primer trimestre) de 1990 que continúa hasta mayo del mismo año, para luego pasar a una categoría normal, en

junio de 1990 (-0.71). Asimismo, una sequía severa de octubre a diciembre de 1989 (cuarto trimestre) y una sequía extrema, de octubre a diciembre de 1987 y de enero a mayo de 1992.

El SPI de 6 meses presenta una sequía moderada de enero a junio de 1990; y de abril a setiembre de 1992. Una sequía severa ocurre con un SPI igual a -1.55 para el periodo de octubre de 1989 a marzo de 1990, el cual indica una sequía para los meses lluviosos de la Estación Córdoba. Además durante los meses de junio a diciembre de 1982 y 1989. Y una sequía extrema para octubre de 1991 a marzo de 1992, que continúa hasta julio de 1992 (meses de lluvia).

El SPI de 12 meses muestra una sequía moderada para 1980, 1987 y 1990. Una sequía severa en 1991 y 1992 de febrero a diciembre. Y una sequía extrema, de enero a diciembre de 1992.

Para el futuro cercano (2020-2039) con el producto T3, el SPI de 3 meses muestra una sequía moderada para los meses de: enero a marzo de 2020, marzo a mayo de 2024, enero a marzo de 2027, octubre a diciembre de 2033; los cuales representan la época de lluvias. Asimismo, en los periodos de tiempo de: junio a agosto del 2023, 2024 y 2031, y de julio a setiembre de 2031 y 2032, abril a junio de 2034 y mayo a julio de 2036.

Una sequía severa, se ve reflejada en los siguientes periodos de tiempo, que en su mayoría, corresponden al periodo de estiaje de la cuenca: de diciembre de 2031 a febrero de 2032, mayo a julio de 2031, marzo a mayo de 2033, setiembre a noviembre de 2034 y octubre a diciembre de 2035. La categoría, sequía extrema, se presenta de: octubre a diciembre de 2022, marzo a mayo de 2023, enero a marzo de 2032, noviembre de 2035 a enero de 2036, diciembre de 2037 a febrero de 2038; y, abril a junio de 2033, julio a setiembre de 2034 y setiembre a noviembre de 2035.

El SPI 6 meses presenta una sequía severa para diciembre de 2022 a mayo de 2023, febrero a julio de 2034 y julio a diciembre de 2035. Con el SPI 12 meses, se obtiene una sequía severa en el 2023 (febrero a julio) y una sequía extrema de noviembre de 2033 a abril de 2034.

Como se puede apreciar, a diferencia del presente, para T3, se muestra un mayor número de periodos de SPI 3 meses con sequía moderada, severa y extrema.

Con T4, sólo se registran sequías moderadas a severas. Para SPI 3, en la época de lluvias (enero a marzo) se tiene una sequía moderada para el 2026 y 2027, y en la época de estiaje (abril a junio), una sequía moderada para el 2029 y 2035. Para SPI 6 meses, continúa la sequía moderada en los meses de estiaje para el 2026 al 2031. Con SPI 12 meses, resulta sequía moderada para el 2026-2027, 2035 y 2038.

Para el futuro lejano (Figura 36), con T3, se proyecta una sequía normal a moderada para SPI 3, 6 y 12 meses. Con el producto T4, se obtiene una sequía moderada con SPI 3 y 6 meses, para el primer trimestre en el 2087 y 2092; mientras que los resultados del SPI 12 meses presenta sequía severa para el 2091 y 2086.

En la estación Llauta (Figura 37), en el periodo presente, para SPI 3 meses se proyecta una sequía severa en el primer trimestre de 1990 y para SPI 6 y 12 meses, una sequía extrema en 1990 y 1992. Los años restantes solo tienen sequía moderada o normal.

Para el futuro cercano, T3, se proyecta una sequía moderada para el segundo y tercer trimestre (abril a junio); sequía extrema, el 2022 (octubre a diciembre) y 2032 (enero a marzo). Para SPI 6 meses, el 2032 (primer y segundo semestre) y 2037 (Abril a Setiembre) presentan una mayor duración de meses con sequía moderada. Para el SPI 12 meses, se tiene que el 2025, 2030, 2034 y 2037 (enero a diciembre) se proyecta sequía moderada, mientras que el único año que presenta una sequía severa es el 2032.

Continuando con el producto T4, el SPI 3 meses proyecta una sequía moderada para diciembre de 2022 a febrero de 2023, diciembre de 2037 a febrero de 2038 y el primer trimestre del 2027 y 2032. Los meses de estiaje mantienen una sequía moderada: abril a junio y julio a setiembre de 2026, de junio a agosto del 2034, 2035 y 2036; tercer trimestre de 2039. Se observa que solo se presenta una sequía severa para el tercer trimestre del 2031 y una sequía extrema para el primer trimestre del 2026.

Los resultados del SPI 6 meses, proyectan una sequía moderada para setiembre de 2022 a febrero de 2023, mayo a octubre de 2024, abril a setiembre de 2026 y el

primer semestre del 2027. En general se observa que la sequía moderada se presenta en todos los años con excepción del 2038 y 2039, en el cual se tiene una sequía severa para el primer semestre del 2038 y de mayo a octubre del 2039. Una sequía extrema solo se presenta el 2026 de febrero a julio.

Para el SPI 12, una sequía severa se presenta los años: 2027, 2031, 2032, 2037 y 2038 (enero a diciembre). Además, se proyecta una sequía extrema solo en el año 2026 (enero a diciembre).

Para el futuro lejano (Figura 38), con T3, un SPI 3 proyecta sequia moderada de noviembre de 2082 a enero 2083, el primer trimestre de 2084 y 2092, octubre a diciembre del 2083; y durante las épocas secas; mayo a julio, abril a junio del 2091 y el 2098. Se presentará una sequía severa para los meses de marzo a mayo del 2086, segundo trimestre del 2088. La presencia de sequía severa es casi nula para este periodo.

Para un SPI 6, se proyecta sequía moderada para los meses de abril a setiembre del 2086, el primer semestre del 2092 y 2098. Para un SPI 12 meses se presenta una sequía severa en el 2092. Y, solo se tiene una sequía extrema en el 2086. Se nota que la sequía moderada predomina en referencia a la sequía severa o extrema.

Con el producto T4, el SPI 6 proyecta una sequía severa en el 2086, de abril a setiembre del 2088 (periodo que corresponde a los meses secos). Sin embargo, en su mayoría se presenta una sequía moderada. El SPI 12, muestra solo una sequía moderada para los años: 2084, 2086, 2092 y 2098; y, una sequía severa en el 2097.

Analizando la estación Lucanas (Figura 39) en un futuro cercano, el SPI 12 proyecta un 80 y 70 por ciento dentro del rango normal, con los productos T3 y T4, respectivamente. Sin embargo para el 2026 se estima un aumento de lluvias con T3, mientras que el producto T4 presenta una sequía severa, ese mismo año. El SPI 6 muestra que el segundo bimestre del 2022 y 2035 registran periodos extremadamente secos con T3; mientras que, T4 proyecta una sequía moderada.

Los resultados para el periodo futuro lejano (Figura 40) señalan un 65 y 75 por ciento con SPI dentro de un rango normal. En el 2086 se estima un sequia severa con T3 y una sequía extrema con T4.

El Cuadro 8 muestra la cuantificación de los eventos de sequía, en el periodo de análisis: 1980 al 1999, el total de eventos de sequía en la estación Córdova asciende a veintiocho. Asimismo, diecisiete eventos con una de sequía moderada, con una intensidad de -1.41, y los once eventos restantes corresponde a una sequía extrema, con una intensidad promedio de -2.65.

El escenario futuro cercano 2020-2039, el producto T3 muestra un total de veintinueve eventos con una intensidad promedio de -1.63 siendo predominante una sequía moderada con veinticinco eventos; mientras que el producto T4 proyecta un total de eventos de cincuenta y seis, con una sequía moderada de intensidad promedio igual a -1.25. Para el periodo 2080-2099 se proyecta un total de 41 y 30, para T3 y T4, respectivamente. En ambos productos existe predominancia de una sequía moderada.

El Cuadro 9 muestra un total de veintiocho eventos de sequía producidos en la estación Llauta, con una intensidad promedio de -1.74. Predomina una sequía extrema con un total de dieciocho eventos e intensidad promedio de -2.47.

El producto T3 para el futuro cercano 2020-2039, proyecta un total de treinta y tres con intensidad promedio de -1.49 siendo predominante una sequía moderada con treinta y un eventos. Mientras que T4, obtiene un total de treinta y ocho, con intensidad promedio de -1.78, predominando una sequía severa con un total de veintiocho eventos.

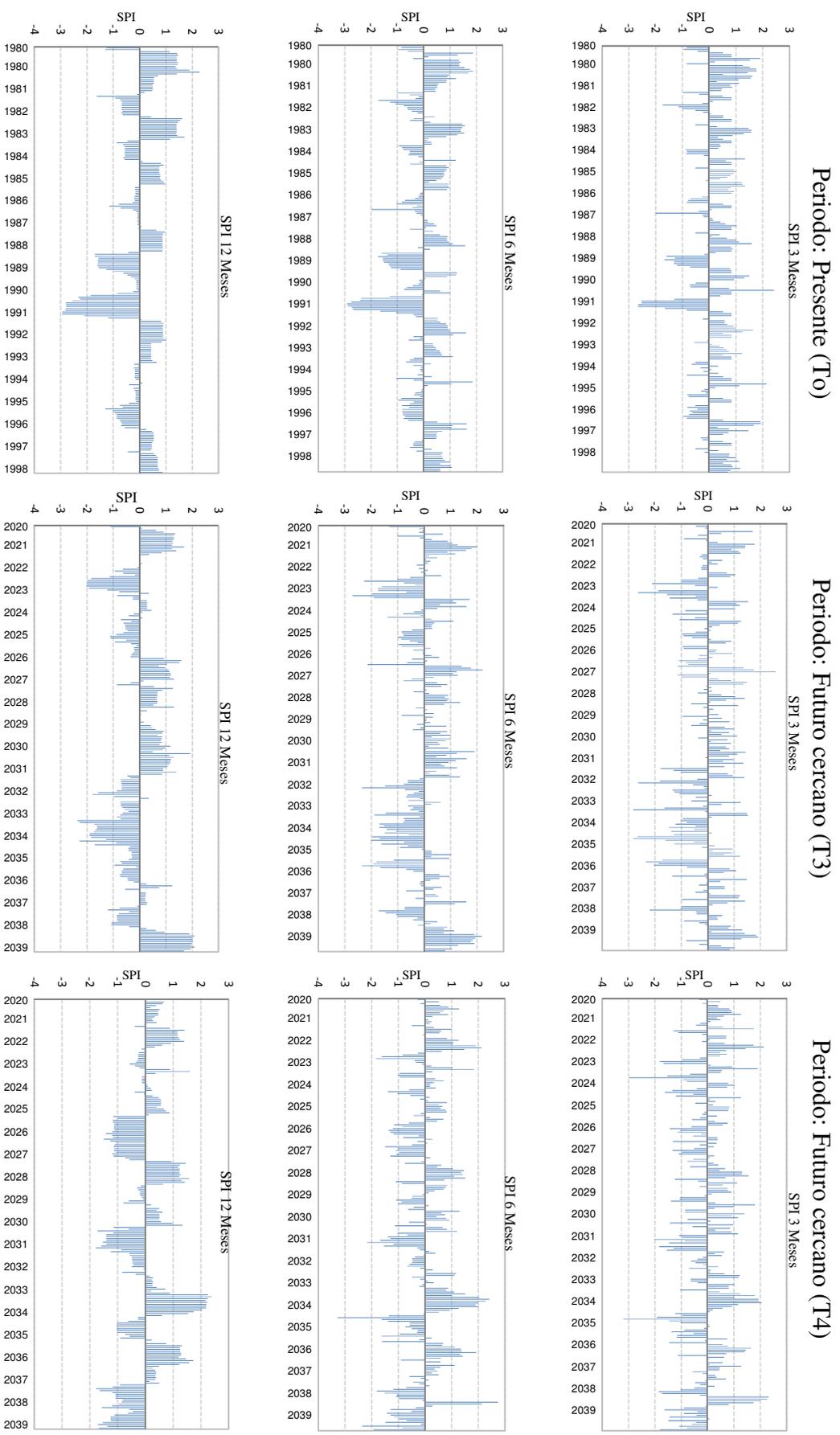


Figura 35: Evolución del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) para 3, 6 y 12 meses en la estación Córdoba. Periodo presente (1980-1999) y futuro cercano (2020-2039)

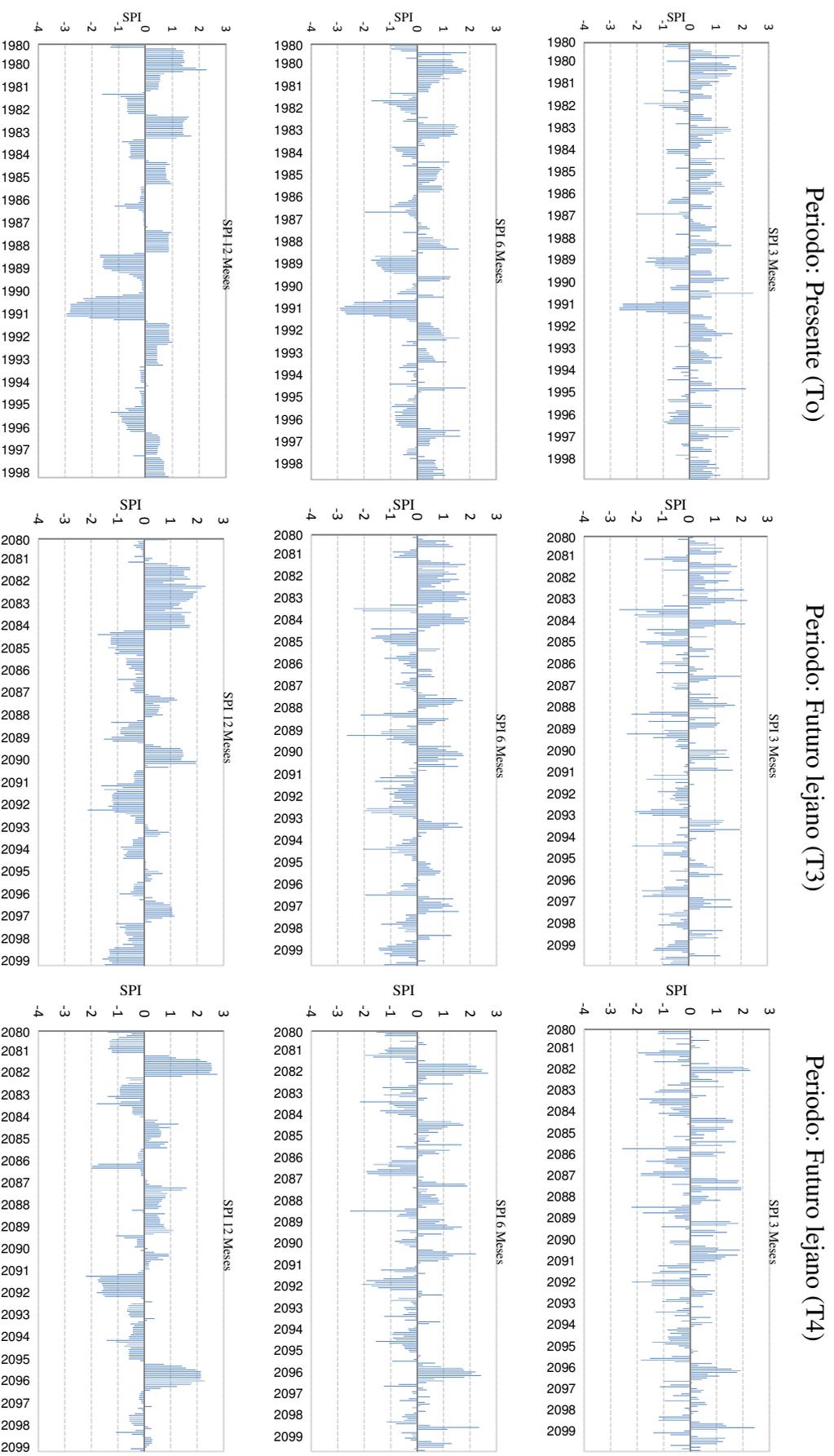


Figura 36: Evolución del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) para 3, 6 y 12 meses en la estación Córdoba. Periodo presente (1980-1999) y futuro lejano (2080-2099)

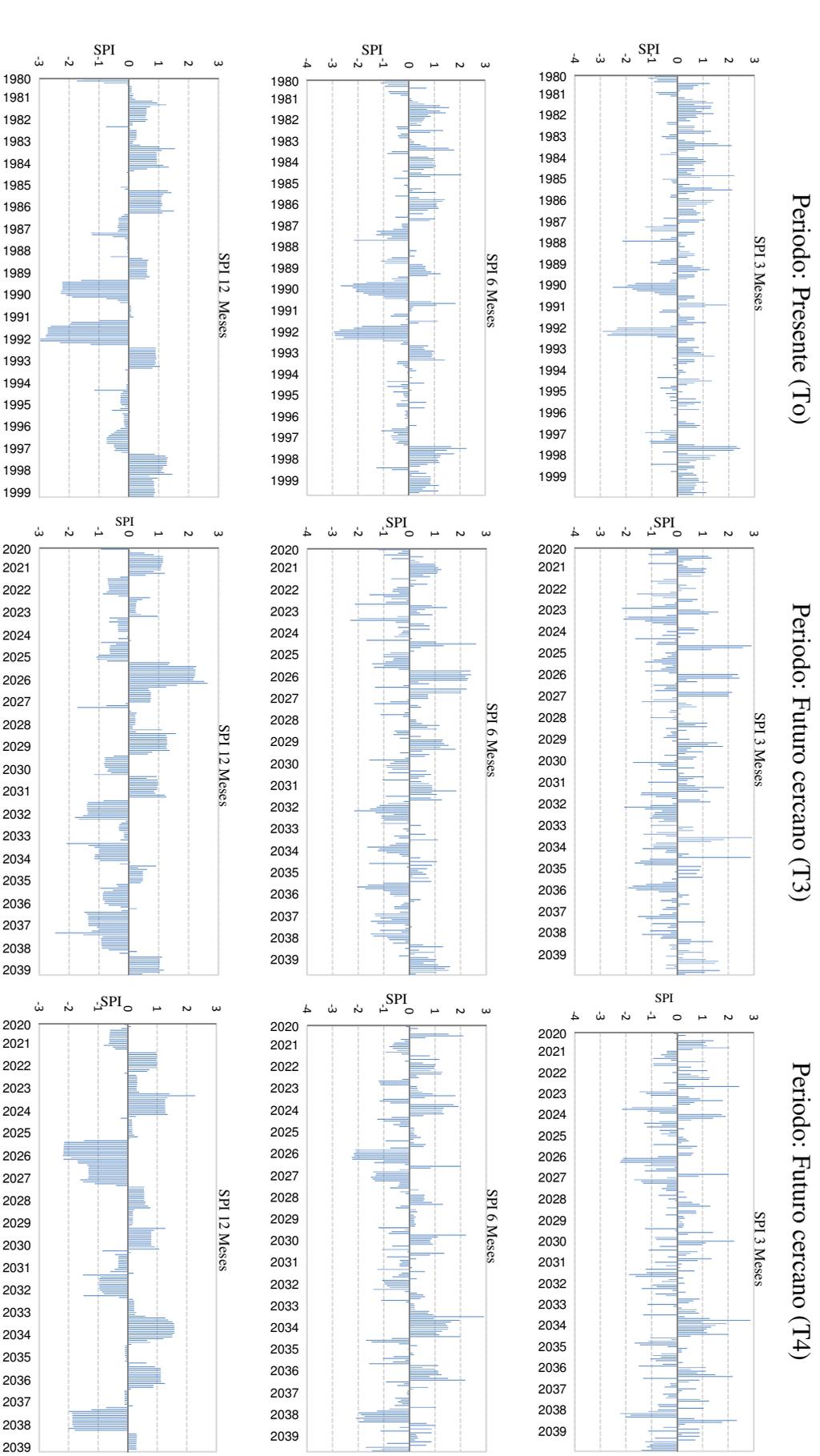


Figura 37: Evolución del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) para 3, 6 y 12 meses en la estación Llautá. Periodo presente (1980-1999) y futuro cercano (2020-2039)

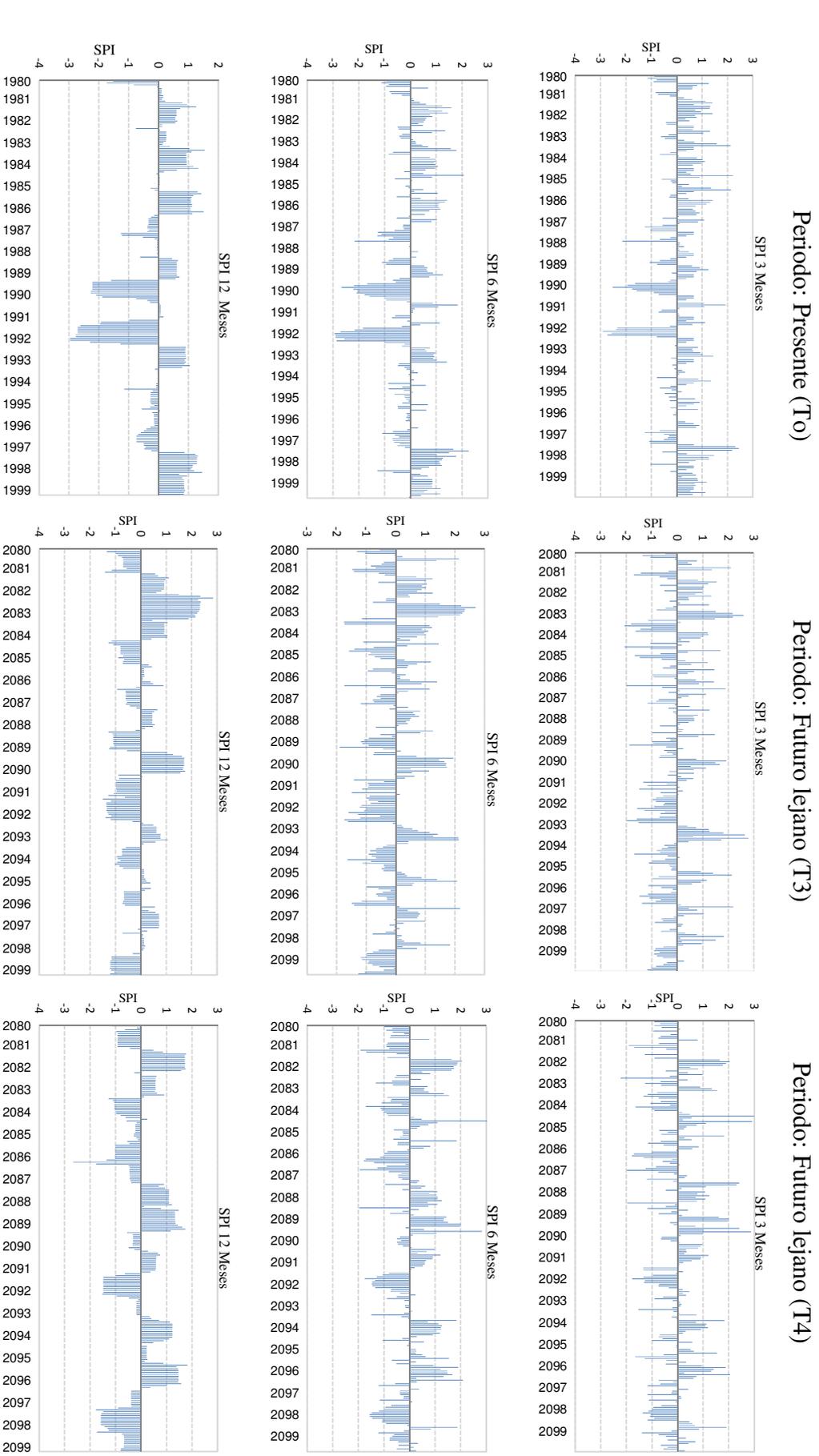


Figura 38: Evolución del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) para 3, 6 y 12 meses en la estación Llautá. Periodo presente (1980-1999) y futuro cercano (2080-2099)

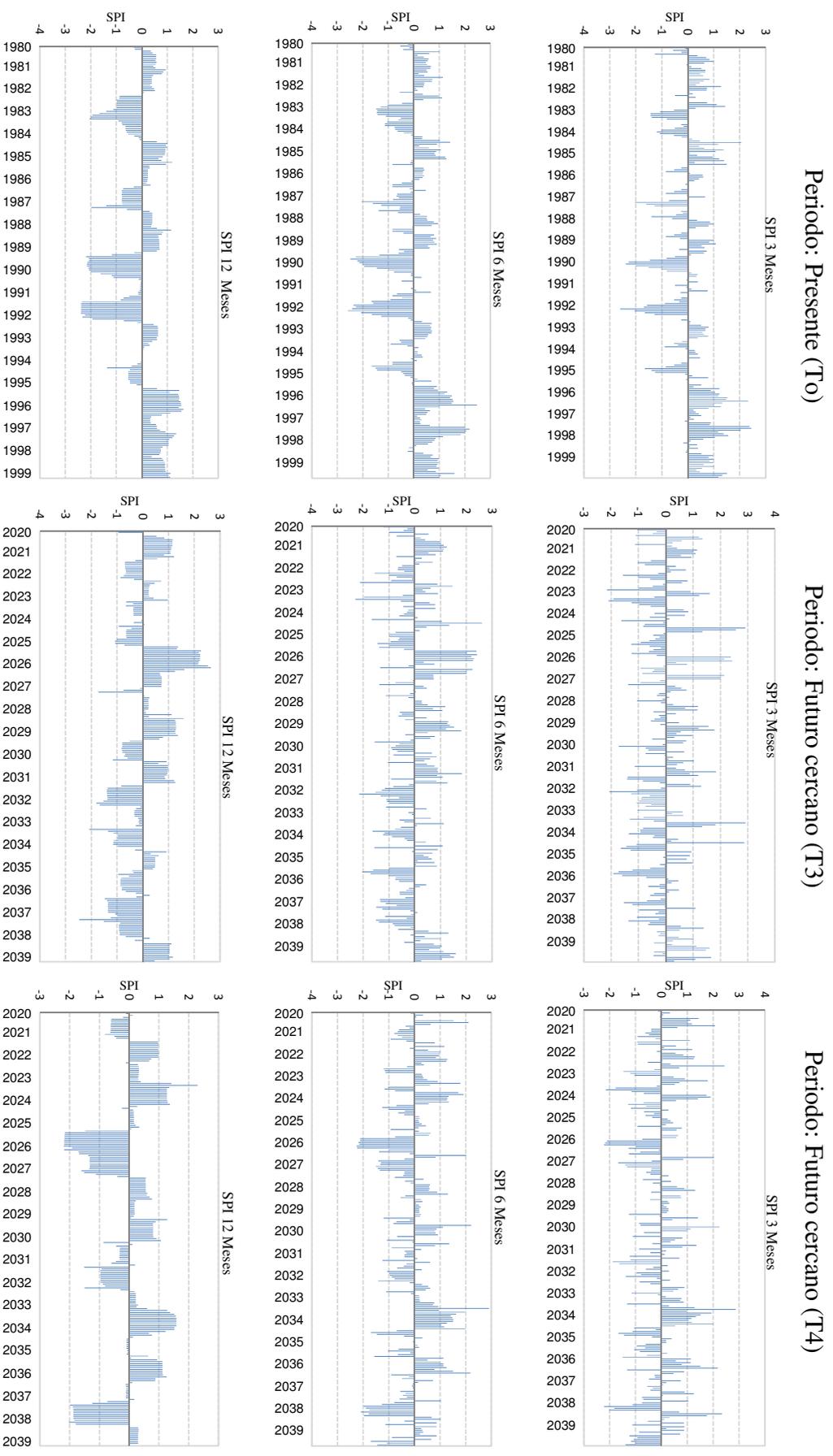


Figura 39: Evolución del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) para 3, 6 y 12 meses en la estación Lucanas. Periodo presente (1980-1999) y futuro cercano (2020-2039)

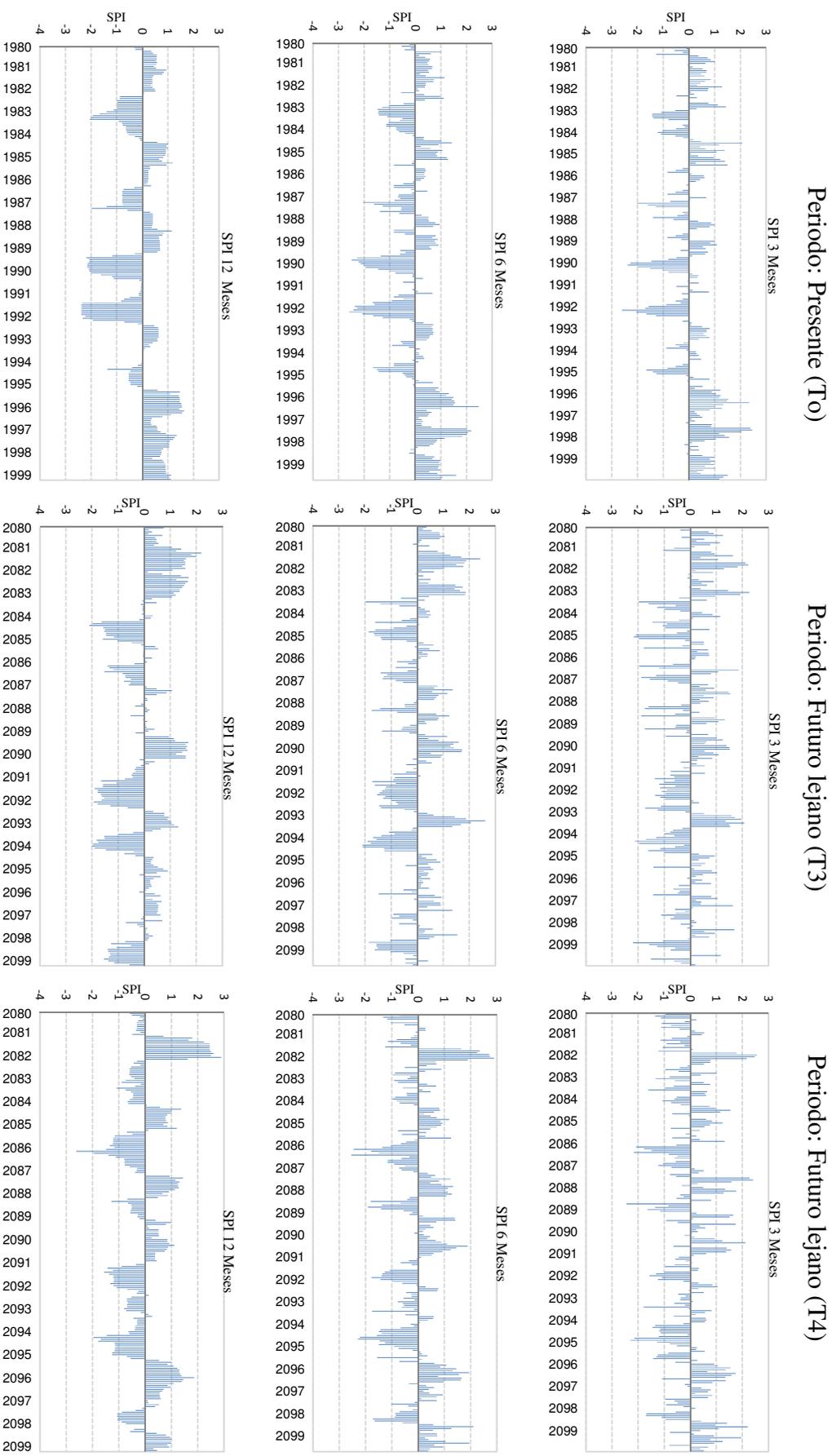


Figura 40: Evolución del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) para 3, 6 y 12 meses en la estación Lucanas. Periodo presente (1980-1999) y futuro lejano (2080-2099)

En el periodo 2080-2099 se obtiene un total de eventos de 41 y 43, en ambos productos existe una predominancia de una sequía moderada para T3 y T4, respectivamente.

En la estación Lucanas, el periodo presente (1980 a 1999), muestra un total de eventos de sequía de treinta y dos (Cuadro 10), la intensidad promedio para este periodo es -1.74, lo que indica que el evento de sequía predominante es la sequía extrema, cuyo rango de intensidades varia de -2 a <-2 . Del total, trece, son eventos de sequía moderada y el resto, corresponde a una sequía extrema con un valor de la intensidad promedio de -2.17.

El escenario futuro cercano 2020-2039 con el producto T3, muestra un total de eventos de treinta y tres, con una intensidad promedio de -1.49, siendo predominante una sequía moderada con treinta y un eventos con intensidad promedio de -1.32. Mientras que T4, proyecta un total de treinta y ocho, con una intensidad promedio de -1.78, predominando una sequía severa con una intensidad de -1.63 y un total de eventos de veintiocho. Para el periodo 2080-2099 se proyecta un total de 47 y 40 eventos, existe una predominancia de sequía moderada para T3 y T4, respectivamente.

Cuadro 8: Intensidades promedio de sequía meteorológica para una escala de tiempo de 3, 6 y 12 meses en la estación Córdoba

SPI 3 Meses							
Periodo	Modelo	Nº de Eventos (Total)	Intensidad Prom.	Nº de Eventos (Sequia Moderada)	Intensidad Prom.	Nº de Eventos (Sequía Extrema)	Intensidad Prom.
1980 - 1999	To	16	1.63	11	1.36	5	2.30
2020 - 2039	T3	37	1.67	28	1.40	9	2.44
	T4	46	1.50	43	1.37	3	2.73
2080 - 2099	T3	37	1.58	31	1.40	6	2.25
	T4	37	1.49	34	1.37	3	2.32
SPI 6 Meses							
Periodo	Modelo	Nº de Eventos (Total)	Intensidad Prom.	Nº de Eventos (Sequia Moderada)	Intensidad Prom.	Nº de Eventos (Sequía Extrema)	Intensidad Prom.
1980 - 1999	To	27	1.39	20	1.25	7	2.68
2020 - 2039	T3	35	1.72	29	1.51	6	2.31
	T4	44	1.46	41	1.32	3	2.60
2080 - 2099	T3	38	1.46	33	1.29	5	2.26
	T4	32	1.51	28	1.33	4	2.19
SPI 12 Meses							
Periodo	Modelo	Nº de Eventos (Total)	Intensidad Prom.	Nº de Eventos (Sequia Moderada)	Intensidad Prom.	Nº de Eventos (Sequía Extrema)	Intensidad Prom.
1980 - 1999	To	28	1.56	17	1.41	11	2.65
2020 - 2039	T3	29	1.63	25	1.44	4	2.21
	T4	56	1.25	56	1.25	0	0.00
2080 - 2099	T3	41	1.31	40	1.22	1	2.13
	T4	32	1.48	30	1.35	2	2.10

Cuadro 9: Intensidades promedio de sequía meteorológica para una escala de tiempo de 3, 6 y 12 meses en la estación Llauta

SPI 3 Meses							
Periodo	Modelo	Nº de Eventos (Total)	Intensidad Prom.	Nº de Eventos (Sequia Moderada)	Intensidad Prom.	Nº de Eventos (Sequía Extrema)	Intensidad Prom.
1980 - 1999	To	20	1.58	13	1.27	7	2.41
2020 - 2039	T3	38	1.37	35	1.29	3	2.11
	T4	43	1.41	37	1.29	6	2.14
2080 - 2099	T3	35	1.44	33	1.39	2	2.07
	T4	39	1.36	38	1.32	1	2.22
SPI 6 Meses							
Periodo	Modelo	Nº de Eventos (Total)	Intensidad Prom.	Nº de Eventos (Sequia Moderada)	Intensidad Prom.	Nº de Eventos (Sequía Extrema)	Intensidad Prom.
1980 - 1999	To	25	1.60	12	1.34	13	2.37
2020 - 2039	T3	41	1.44	37	1.33	4	2.16
	T4	42	1.36	35	1.27	7	2.13
2080 - 2099	T3	37	1.36	37	1.36	0	0.00
	T4	35	1.39	35	1.39	0	0.00
SPI 12 Meses							
Periodo	Modelo	Nº de Eventos (Total)	Intensidad Prom.	Nº de Eventos (Sequia Moderada)	Intensidad Prom.	Nº de Eventos (Sequía Extrema)	Intensidad Prom.
1980 - 1999	To	28	1.74	10	1.53	18	2.47
2020 - 2039	T3	33	1.49	31	1.32	2	2.27
	T4	38	1.78	28	1.63	10	2.12
2080 - 2099	T3	41	1.07	41	1.07	0	0.00
	T4	43	1.53	42	1.34	1	2.66

Cuadro 10: Intensidades promedio de sequía meteorológica para una escala de tiempo de 3, 6 y 12 meses en la estación Lucanas

SPI 3 Meses							
Periodo	Modelo	Nº de Eventos (Total)	Intensidad Prom.	Nº de Eventos (Sequia Moderada)	Intensidad Prom.	Nº de Eventos (Sequía Extrema)	Intensidad Prom.
1980 - 1999	To	27	1.57	21	1.38	6	2.19
2020 - 2039	T3	38	1.37	35	1.29	3	2.11
	T4	43	1.41	37	1.29	6	2.14
2080 - 2099	T3	44	1.51	40	1.44	4	2.14
	T4	41	1.45	36	1.29	5	2.22
SPI 6 Meses							
Periodo	Modelo	Nº de Eventos (Total)	Intensidad Prom.	Nº de Eventos (Sequia Moderada)	Intensidad Prom.	Nº de Eventos (Sequía Extrema)	Intensidad Prom.
1980 - 1999	To	35	1.61	24	1.41	11	2.20
2020 - 2039	T3	41	1.44	37	1.33	4	2.16
	T4	42	1.36	35	1.27	7	2.13
2080 - 2099	T3	46	1.51	44	1.47	2	2.09
	T4	37	1.56	33	1.40	4	2.41
SPI 12 Meses							
Periodo	Modelo	Nº de Eventos (Total)	Intensidad Prom.	Nº de Eventos (Sequia Moderada)	Intensidad Prom.	Nº de Eventos (Sequía Extrema)	Intensidad Prom.
1980 - 1999	To	32	1.74	13	1.52	19	2.17
2020 - 2039	T3	33	1.49	31	1.32	2	2.27
	T4	38	1.78	28	1.63	10	2.12
2080 - 2099	T3	47	1.63	45	1.53	2	2.05
	T4	40	1.43	39	1.26	1	2.62

La Figura 41 muestra la frecuencia de ocurrencia de los eventos de sequía, siendo la más recurrente una sequía extrema para el periodo presente y una sequía moderada para los periodos futuro cercano y futuro lejano. Es así, que en un escenario futuro hay un aumento de lluvias en un rango normal o moderado. En un escenario futuro cercano, T3 alcanza un 80 por ciento correspondiente a una sequía moderada y la sequía extrema disminuye hasta en un 6 por ciento. El mismo producto proyecta una sequía moderada en un 100 por ciento en un futuro lejano.

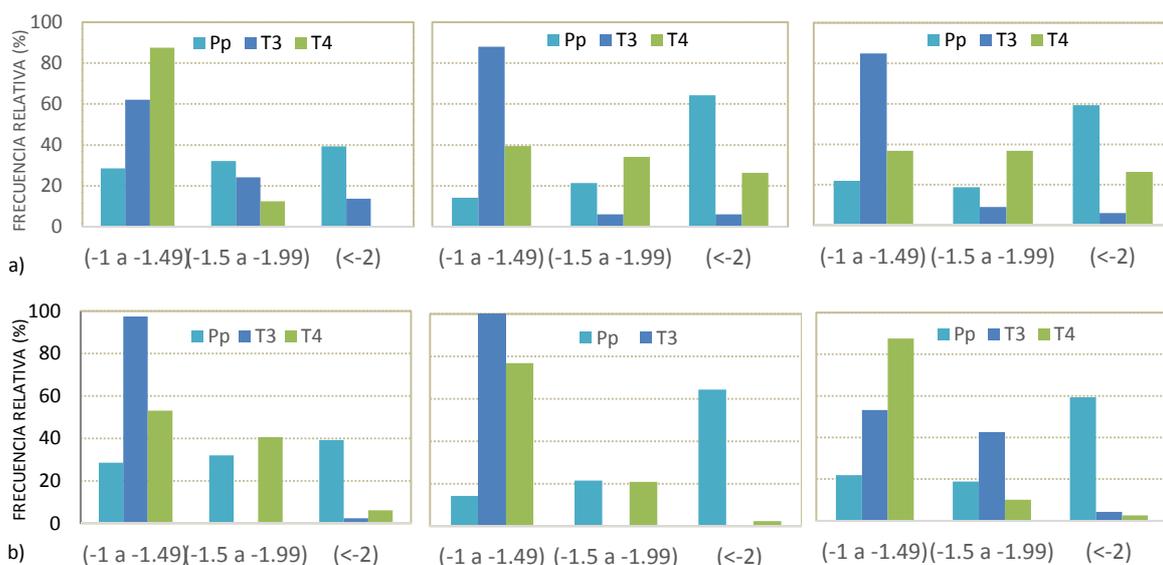


Figura 41: Frecuencia de eventos de sequía (%) según magnitud para el periodo a) futuro cercano (2020-2039) y b) futuro lejano (2080-2999), para las estaciones del grupo 2 y 3: Córdoba, Llauta y Lucanas (Izquierda a Derecha).

En general para una escala de 12 meses, el Cuadro 11 muestra un escenario del futuro cercano, con el 80-90 por ciento de una sequía moderada. De la misma manera, en el futuro lejano, se tiene una frecuencia del 90 y 10 por ciento de sequía moderada y extrema, respectivamente.

Cuadro 11: Frecuencia de ocurrencia de los eventos de sequía para una escala de tiempo de 3, 6 y 12 meses

									3 meses
Periodo	Modelo	N° de Eventos (Total)	Intensidad Prom.	N° de Eventos (Sequia Moderada)	Intensidad Prom.	Frecuencia (%)	N° de Eventos (Sequia Extrema)	Intensidad Prom.	Frecuencia (%)
1980 - 1999	To	177	1.52	150	1.33	84.7%	27	1.58	15.3%
2020 - 2039	T3	333	1.53	282	1.35	84.7%	51	2.33	15.3%
	T4	379	1.49	335	1.36	88.4%	44	2.45	11.6%
2080 - 2099	T3	368	1.56	334	1.40	90.8%	34	2.23	9.2%
	T4	346	1.50	315	1.36	91.0%	31	2.23	9.0%
									6 meses
1980 - 1999	To	252	1.53	203	1.35	80.6%	49	1.98	19.4%
2020 - 2039	T3	335	1.56	284	1.41	84.8%	51	2.01	15.2%
	T4	372	1.48	331	1.33	89.0%	41	2.30	11.0%
2080 - 2099	T3	366	1.40	340	1.32	92.9%	26	1.84	7.1%
	T4	330	1.49	306	1.36	92.7%	24	1.98	7.3%
									12 meses
1980 - 1999	To	289	1.73	202	1.47	69.9%	87	2.50	30.1%
2020 - 2039	T3	310	1.55	272	1.37	87.7%	38	1.77	12.3%
	T4	391	1.41	359	1.34	91.8%	32	1.25	8.2%
2080 - 2099	T3	366	1.31	359	1.23	98.1%	7	1.72	1.9%
	T4	347	1.48	334	1.31	96.3%	13	2.36	3.7%

4.2.3 ÍNDICE Z-SCORE

Se realiza un análisis de regresión entre los índices de sequía Z score y SPI, los cuales poseen el mismo rango de valores en su categorización.

La figura 42-44 muestra la relación entre el SPI y el Z score (la abscisa denota valores SPI y la ordenada, valores Z-score) en escala de 3, 6 y 12 meses. Se observa que en el periodo presente (1980-1999) la relación en una escala de 3 y 6 meses presenta una gran dispersión en comparación con los periodos futuro cercano y lejano. Sin embargo, esta relación es particularmente buena durante los meses normales y de sequía moderada. Además la dispersión se reduce en una escala de 12 meses, siendo el valor $r=0.94$, esto se debe al teorema central del límite, a medida que la escala de tiempo se incrementa y excede los 6 meses, la distribución gamma tiende a la distribución normal (Lloyd y Hughes y Saunders, 2002).

Con respecto a la estación Córdova, para los años extremadamente húmedos, para el SPI de $+1.52$, el correspondiente Z score es 6.5 (escala 3 meses) y cuando el SPI es $+1.89$, el Z score es $+7.95$ (escala 12 meses). Mientras que para los años extremadamente secos, como el año 1992, el SPI señala un valor de -2.66 , mientras que el correspondiente Z score es -4.65 (escala 3 meses) y cuando se obtiene un SPI de -2.1 , el Z score es de -4.79 (escala 12 meses).

En los periodos: futuro cercano y lejano, el r supera los valores de 0.6 , lo cual representa una buena relación. Además se observa que el índice Z score toma valores del rango Normal, en condiciones moderadamente secas y húmedas.

Los diagramas de dispersión muestran que el índice Z score presenta más valores positivos que el SPI, tanto en condiciones extremadamente húmedas y secas, lo cual fue indicado por Wu et al. (2001).

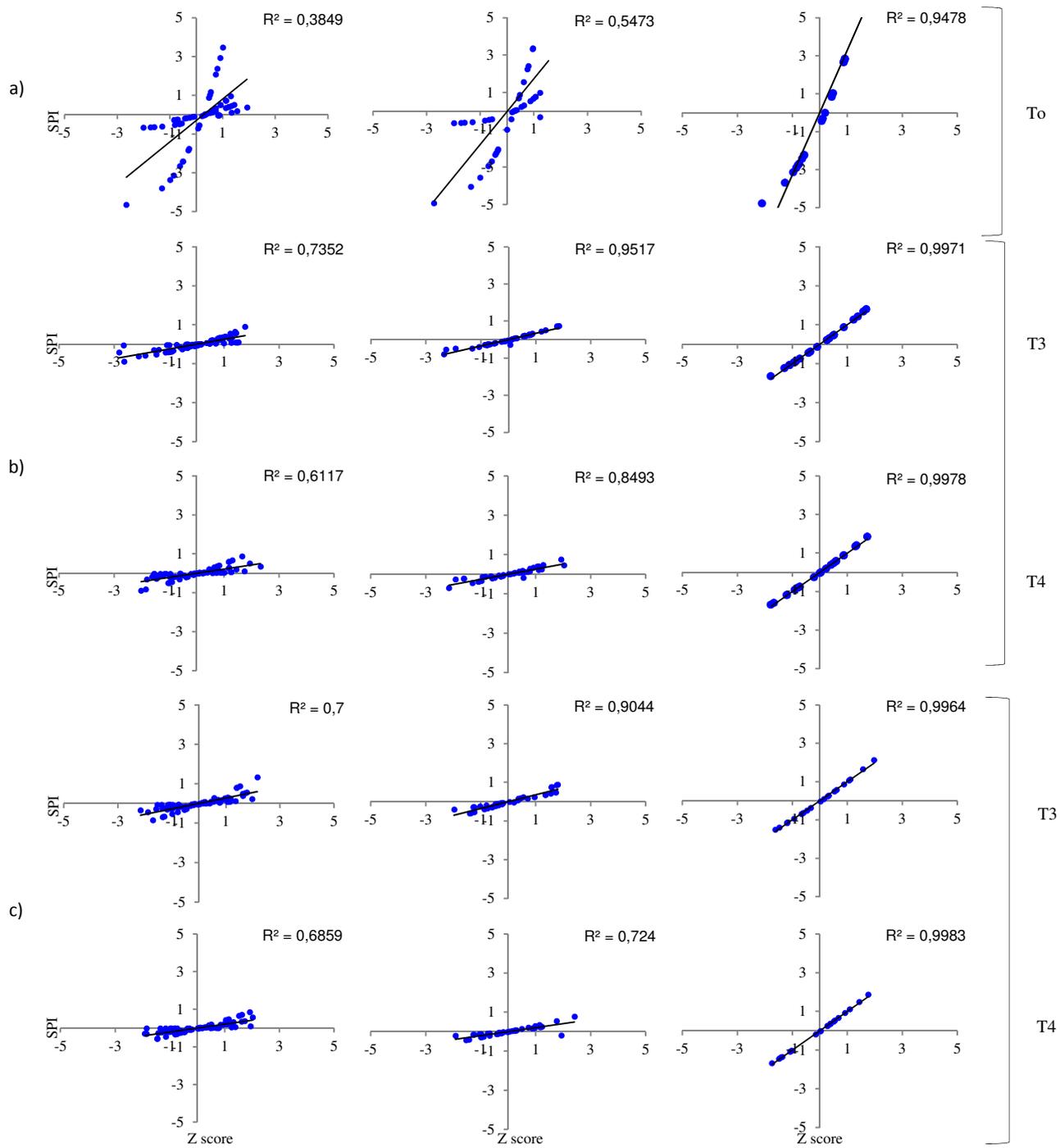


Figura 42: Diagramas de dispersión de SPI y Z score para la estación Córdoba para 3, 6 y 12 meses (de izquierda a derecha); y el periodo a) presente (1980), b) futuro cercano (2020-2039) y c) futuro lejano (2080-2099)

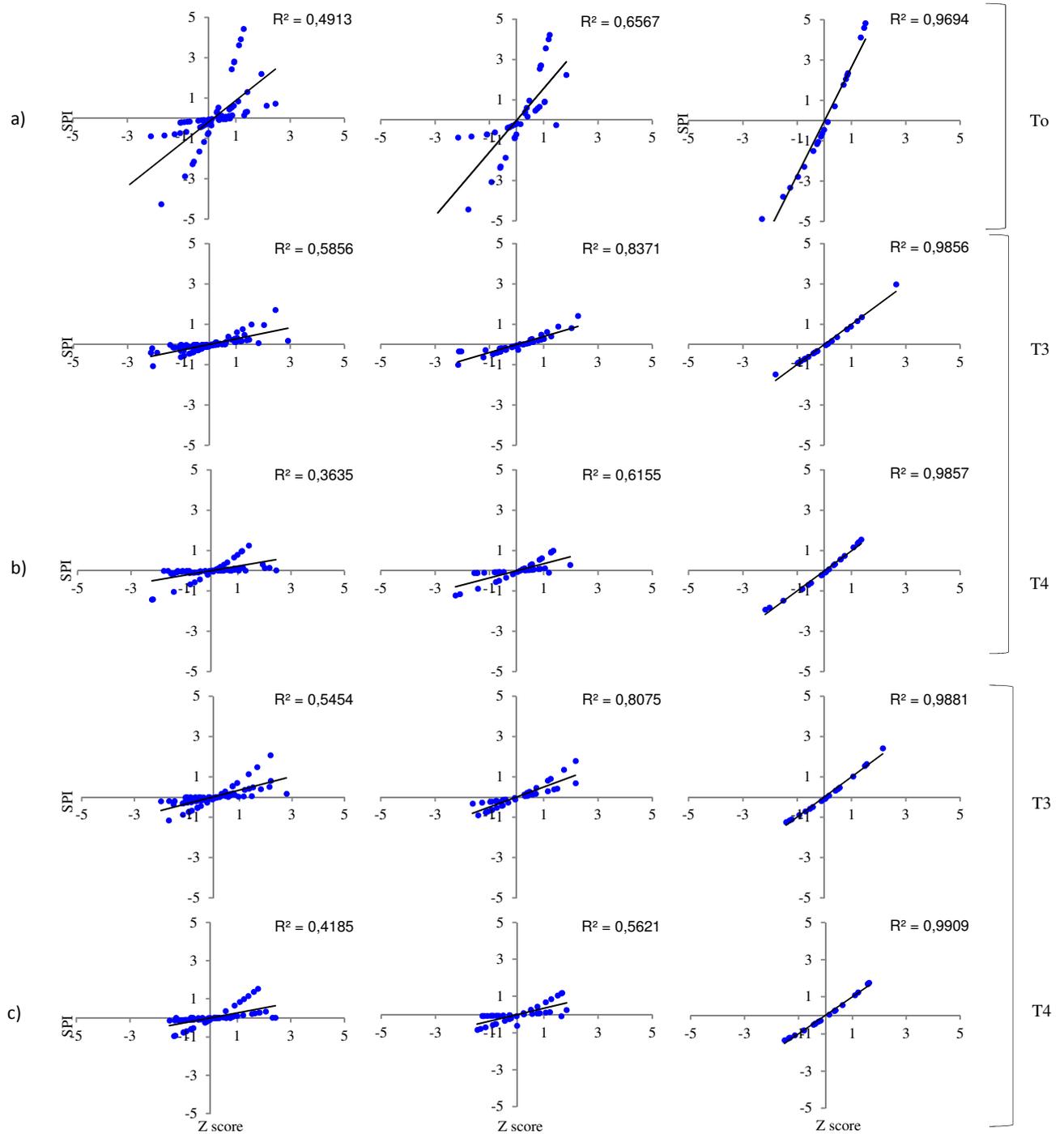


Figura 43: Diagramas de dispersión de SPI y Z score para la estación Llauta para 3, 6 y 12 meses (de izquierda a derecha); y el periodo a) presente (1980), b) futuro cercano (2020-2039) y c) futuro lejano (2080-2099)

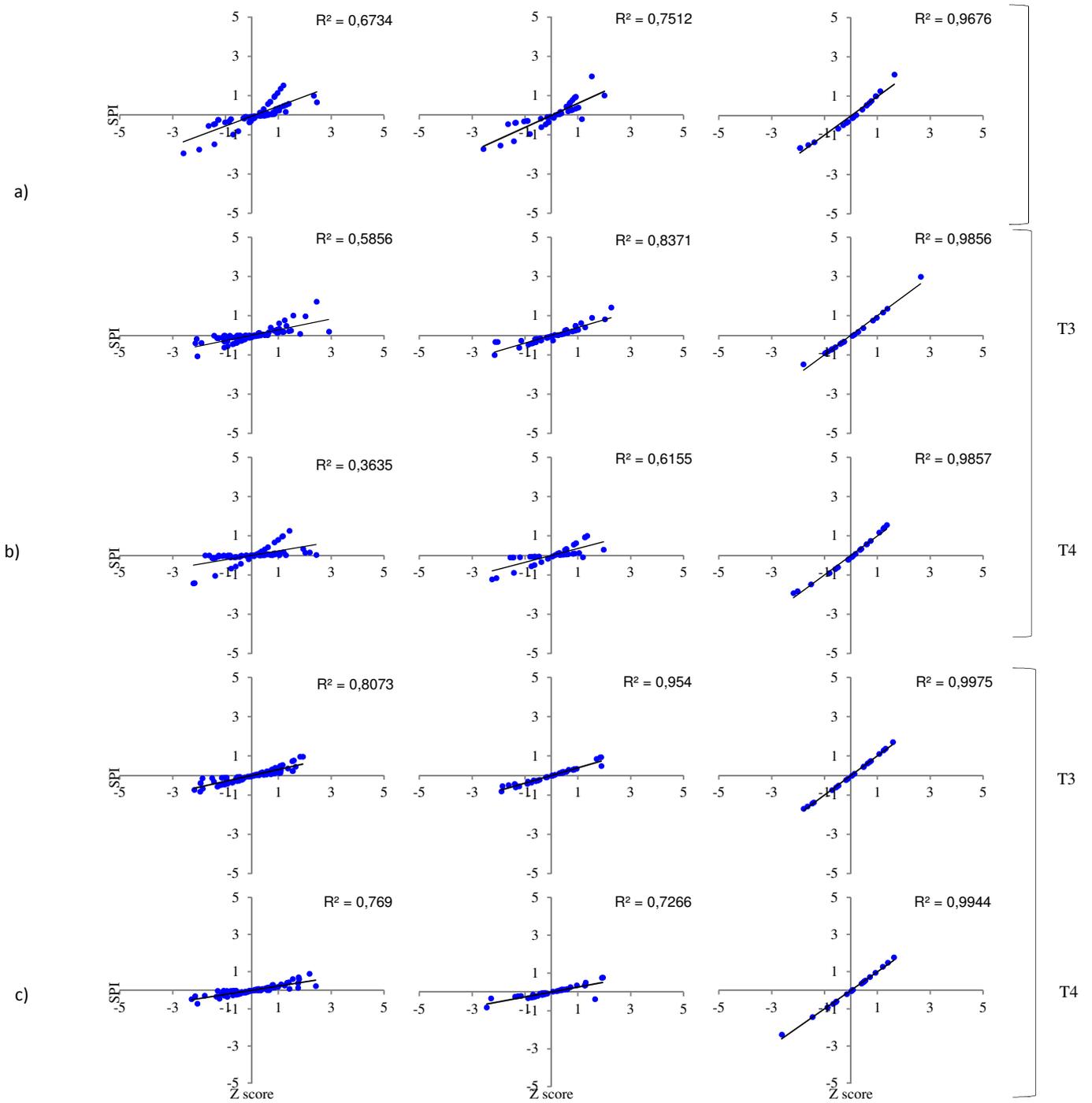


Figura 44: Diagramas de dispersión de SPI y Z score para la estación Lucanas para 3, 6 y 12 meses (de izquierda a derecha); y el periodo a) presente (1980), b) futuro cercano (2020-2039) y c) futuro lejano (2080-2099)

V. CONCLUSIONES

1. A partir del análisis estadístico realizado sobre la relación precipitación registrada - precipitación estimada, se verifica que el comportamiento de la precipitación fue sobreestimada, dado que los valores reales fueron mucho menores a los modelados, por todos los sub modelos (3.1S, 3.2S, 3.1S-CDF y 3.2S-CDF) en las tres regiones.
2. Se obtuvo el mejor ajuste en la zona litoral donde prácticamente no existe región montañosa, y la menor aproximación sobre la región montañosa. El Modelo MRI 3.2S-CDF, en general, presentó un mejor comportamiento, con una sobreestimación que va de 2 a 28 por ciento, a diferencia de los modelos restantes con una sobreestimación que supera el 100 por ciento.
Las nuevas parametrizaciones que se realizaron produjeron mejoras en el modelo y estos se reflejan en el modelo MRI 3.2S-CDF.
Las características de los resultados del modelo MRI 3.1S-CDF y 3.2S-CDF pueden servir como base para el pronóstico de lluvias en la cuenca río Grande, cuando no se cuente con suficiente información pluviométrica con base en tierra.
3. Con respecto a la reducción de escala para la obtención de la precipitación a partir del modelo MRI, se determinó un mejor ajuste con los productos T3 y T4, considerando la lluvia como variable no paramétrica y utilizando la función de distribución de probabilidad (*CDF mapping*).
4. En referencia a la evaluación de la sequía meteorológica futura (2020-2039, 2080-2099), a una escala de 3 meses para un futuro cercano la frecuencia de una sequía moderada y extrema es similar al periodo presente. Sin embargo, en un futuro lejano hay una disminución de la sequía extrema, lo que se refleja en un incremento de la sequía moderada en un 91 por ciento. La tendencia es semejante para una escala de tiempo de 6 y 12 meses; esto es, se proyecta un escenario de menor ocurrencia de eventos de sequía extrema para la cuenca de estudio.

VI. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda mejorar las parametrizaciones físicas del modelo, así como mejorar la resolución del GCM para poder reproducir e incluir con más detalle las características físicas de la zona (zonas montañosas típicas de la geografía de la región).
2. Realizar una línea de investigación para diferentes regiones del Perú, incluyendo la cuenca río Grande, a partir de diferentes fuentes de detección de precipitación disponibles, tales como: satélites y/o radares.
3. Los modelos más realistas, y que pudieran tener un mejor desempeño en un territorio con relieve complejo son los no hidrostáticos, por lo que se recomienda estimar la precipitación de diferentes cuencas utilizando estos modelos.
4. La población y producción agrícola se concentra en la zona costera del Perú, por ello, se recomienda replicar el uso del modelo MRI-AGCM en diferentes cuencas que se encuentran en la zona costera, para tener una base de datos confiable y prever condiciones extremas futuras.
5. Se recomienda incluir la evaluación de índices de sequía edáfica o agrícola, hidrológica y social económica, con el fin de ampliar los resultados para el área de estudio.
6. En razón a las consecuencias del Cambio Climático, existe la necesidad de capacitar a la población más vulnerable en la evaluación y determinación de un índice de sequía apropiado para cada región de nuestro territorio a fin de prever daños irreversibles y ayudar a la toma de decisiones y caracterización climática de las sequías.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA (Autoridad Nacional del Agua). 2013. Sequía y estrategias de gestión en el Perú. Ed. julio de 2015. Lima, Perú.
- Blázquez, J; Nuñez, MN; Kusunoki, S. 2012. Climate projections and uncertainties over South America from MRI/JMA global model experiments (En inglés). Atmospheric and Climate Sciences. 2 (4): 381-400. Disponible en <http://doi:10.4236/asc.2012.24034>.
- Córdova, D. 2015. Análisis de la precipitación futura en la cuenca Chancay-Huaral mediante el modelo GCM-MRI. Tesis pregrado. Universidad Nacional Agraria La Molina. 147 p.
- Edwards, DC; McKee, TB. 1997. Characteristics of 20th Century Drought in the United States at Multiple Time Scales. Atmospheric Science Paper No. 634, Climatology Report, No. 97-2, Department of Atmospheric Sciences, Colorado State University.
- Espinoza, JC. 2005. Manual escrito con motivo del curso taller: Utilización del método del Vector Regional con HYDRACCESS. SENAMHI-Perú. Colaboración de Philippe Vauchel (IRD-Perú) y Josyane Ronchail (UP7-LOCEAN, Paris). 9 p.
- Gaertner, MA; Gutiérrez, JM; Castro, M. 2012. Escenarios regionales de cambio climático. Revista Española de Física. 26: 34-42.
- Gao, X; Shi, Y; Song, R; Giorgi, F; Wang, Y; Zhang, D. 2008. Reduction of future monsoon precipitation over China: Comparison between a high resolution RCM simulation and the driving GCM. Meteorology and Atmospheric Physics. 100 (4): 73-86.
- Gutiérrez, J; Cano, R; Cofiño, A; Sordo, C. 2004. Redes Probabilísticas y Neuronales en las Ciencias Atmosféricas. Universidad de Cantabria. Instituto Nacional de Meteorología. Santander. 292 p.
- Guttman, N. 1999. Accepting the standardized precipitation index a calculation algorithm. Journal of Water Resources Association. 35(2): 311-322
- Hayes, MJ. 2000. Drought index. National Drought Mitigation Center, University of Nebraska, Lincoln, Nebraska, Estados Unidos.

- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. Cambio Climático 2007: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Cuarto informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, Suiza. 996 p.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2013. Glosario en Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, Suiza.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2014. Cambio Climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Organización Meteorológica Mundial. Ginebra, Suiza.
- IPCC, 2013 Fifth Assessment Report, WG1 AR5. Disponible en: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
- Kalnay, E. 2003. Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability: Historical overview of numerical weather prediction. USA, Cambridge University Press, Cambridge. 258 p.
- Kitoh, A; Kusunoki, S; Nakaegawa, T. 2011. Climate change projections over South America in the late twenty-first century with the 20-km and 60 k-m mesh MRI-AGCM (En inglés). Journal of Geophysical Research. 116: 1-21. Disponible en <http://doi:10.1029/2010JD014920>, 2011
- Lavado Casimiro, WS; Yerren Suarez, J; Ordoñez Gálvez, JJ. 2007. Impacto Hidrológico del Fenómeno El Niño-La Niña en las cuencas de los ríos Topara, San Juan, Pisco, Ica y Grande. Dirección General de Hidrología y Recursos Hídricos. SENAMHI Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. Lima, Perú.
- Ledesma, M. 2011. Principios de Meteorología y Climatología. Ed. 1. Paraninfo SA.
- Lloyd-Hughes, B; Saunders, M. 2002. A Drought Climatology for Europe. International Journal of Climatology. 22: 1571-1592.
- Lorenzo, J. 2012. Las sequías hidrológicas en la Península Ibérica: Análisis y Caracterización espacio temporal influencias climáticas y el efecto de la gestión hidrológica en un contexto de cambio global. Tesis doctoral. Universidad de Zaragoza. 254 p.
- McKee, TB; Doesken, NJ; Kleist, J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to times scales (en línea). Eighth conference on applied Climatology. Consultado 10 set. 2015. Disponible en <http://ccc.atmos.colostate.edu/relationshipofdroughtfrequency.pdf>.
- Mizuta, R; Oouchi, K; Yoshimura, H; Noda, A; Katayama, K; Hosaka, M; Yukimoto, S; Kusunoki, S; Kawai, H; Nakagawa, M. 2006. 20 Km Mesh Global Climate Simulations using JMA-GSM Model (En inglés). Journal of the Meteorological Society of Japan. 84 (1):165-185. Disponible en <http://doi.org/10.2151/jmsj.84.165>

- Mizuta, R; Yoshimura, H; Murakami, H; Matsueda, M; Endo, H; Ose, T; Kamiguchi, K; Hosaka, M; Sugi, M; Yukimoto, S; Kusunoki; S; Kitoh, A. 2012. Climate Simulations using MRI-AGCM3.2 with 20-km grid. *Journal of the Meteorological Society of Japan*.90A:233-258. Consultado oct. 2015. Disponible en <http://doi:10.2151/jmsj.2012-A12>.
- Morid, S; Smakhtin, V; Moghaddasi, M. 2006. Comparison of seven meteorological indices for drought monitoring in Iran. *Int. J. Climatol.* 26: 971–985.
- Muñoz, AG. 2010. Validacion y Analisis de consenso de Modelos de Escenarios de Cambio Climatico para Ecuador. Centro de Modelado Cientifico CMC. Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela.
- Nakayama, K; Beitia, C; Vallester, E; Pinzon, R; Fabrega, J; Nakaegawa, T; Maruya, Y; Espinosa, J; Olmedo, B; Kato, J; Komai, K. 2011. Increase in simple precipitation intensity index in Panama. *Journal of Japan Society of Civil Engineers.* 68(4): 163-168.
- Nikolopoulos, EI; Anagnostou, EN; Hossain, F. 2010. Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology: Error propagation of satellite-rainfall in flood prediction applications over complex terrain: A case study in Northeastern Italy. Springer Science Business Media B.V., USA. 327 p.
- Nakaegawa, T; Kitoh, A; Murakami, H; Kusunoki, S. 2013: Annual maximum 5-day rainfall total and maximum number of consecutive dry days over Central America and The Caribbean in the late twenty-first century projected by an atmospheric general circulation model with three different horizontal resolutions. *Theoretical Applied Climatology.* 116: 155-168. Consultado oct. 2015. Disponible en doi:10.1007/s00704-013-0934-9.
- Nakaegawa, T; Kitoh, A; Murakami, H; Kusunoki, S; Arakawa, O. 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 (En inglés). *Papers in Meteorology and Geophysics.* 65: 15:33. Consultado oct. 2015. Disponible en <http://doi:10.2467/mripapers.65.15>.
- National Weather Service, NOAA. Global Circulations (en línea). Consultado Agosto 2015. Disponible en: <http://www.srh.noaa.gov/jetstream/global/circ.htm>.
- National Weather Service, NOAA. Global Circulations (en línea). Consultado Agosto 2015. Disponible en: http://celebrating200years.noaa.gov/breakthroughs/climate_model/welcome.html
- OMM (Organización Meteorológica Mundial). 2011. Guía de prácticas hidrológicas: Hidrología de la medición a la información hidrológica. Ginebra, Suiza. 1 (168) ed. 6.
- Palacios, E; Serrano, S. 2011. Validación de los Modelos de Cambio Climático hidrostáticos y no hidrostáticos sobre la climatología de Ecuador en las variables de precipitación y temperaturas extremas. *La Granja* 13 (1): 21-30. ISSN: 1390-3799.

- Panu, US; Sharma, TC. 2002. Challenges in drought research: some perspectives and future directions. *J. Hydrol. Sci.* 47: 19-30.
- Piani, C; Haerter, JO; Coppola, E. 2010. Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. *Theoretical and Applied Climatology.* 99 (1): 187-192. Consultado may. 2015. Disponible en <http://doi:10.1007/s00704-009-0134-9>
- PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo). 2013. Informe sobre Desarrollo Humano 2013. Communications Development Incorporated, Washington DC, Editors. NY, USA.
- Ramos, L. 2013. Estudio de la utilidad de la lluvia estimada de satélite en la modelación hidrológica distribuida. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. España. 213 p.
- Ramos, C; Chávez, V; Komai, K; Nakayama, K; Nakaegawa, T. 2014. Statistically downscaled climate change for the Santa river basin, using Global Circulation Models (GCM) and its impact on the availability of water resources. Consultado oct. 2015. Disponible en ftp://ftp.cima.fcen.uba.ar/pu_b/WCRP_Montevideo/posters/WE7_ChavezMayta.pdf
- Rau, P; Condom T. 2010. Análisis espacio-temporal de la precipitación en las zonas de montaña de Perú (1987-2007). *Revista Peruana Geo-Atmosférica RPGA.* (2): 16-29.
- Rodríguez, E. 2006. Escenarios de cambio climático regionalizados. Instituto Nacional de Meteorología. España.
- Ruiz, JF. 2007. Escenarios de cambio climático, algunos modelos y resultados de lluvia para Colombia para el escenario A1B. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Bogotá D.C.
- Sendiña, NI; Pérez, MV. 2006. Fundamentos de Meteorología. Universidad de Santiago de Compostela. 194 p.
- Vargas, A; Santos, A; Cárdenas, E; Obregón, E. 2011. Análisis de la Distribución e interpolación espacial de las lluvias en Bogotá, Colombia.
- Vicente-Serrano, SM; López-Moreno, JI. 2006. The influence of atmospheric circulation at different time scales on winter drought variability through a semi-arid climatic gradient in Northeast Spain. *Int. J. Climatol.* 26 (11): 1427-1453
- Wilhite, A; Glantz, H. 1985. Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Water International* 10(3):111-120.
- Wu, H; Hayes, MJ; Weiss, A; Hu, Q. 2001. An evaluation of the standardized precipitation index, the China-Z index and the statistical Z-score. *Int. J. Climatol.* 21: 745-758.

- Wilby, RL; Charles, SP; Zorita E; Timbal, B; Whetton, P; Mearns, LO. 2004. Guidelines for use of Climate Scenarios developed from Statistical Downscaling Methods. Supporting Material of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

VIII. ANEXOS

ANEXO 1 : Regionalización de las estaciones con el Método del Vector Regional.

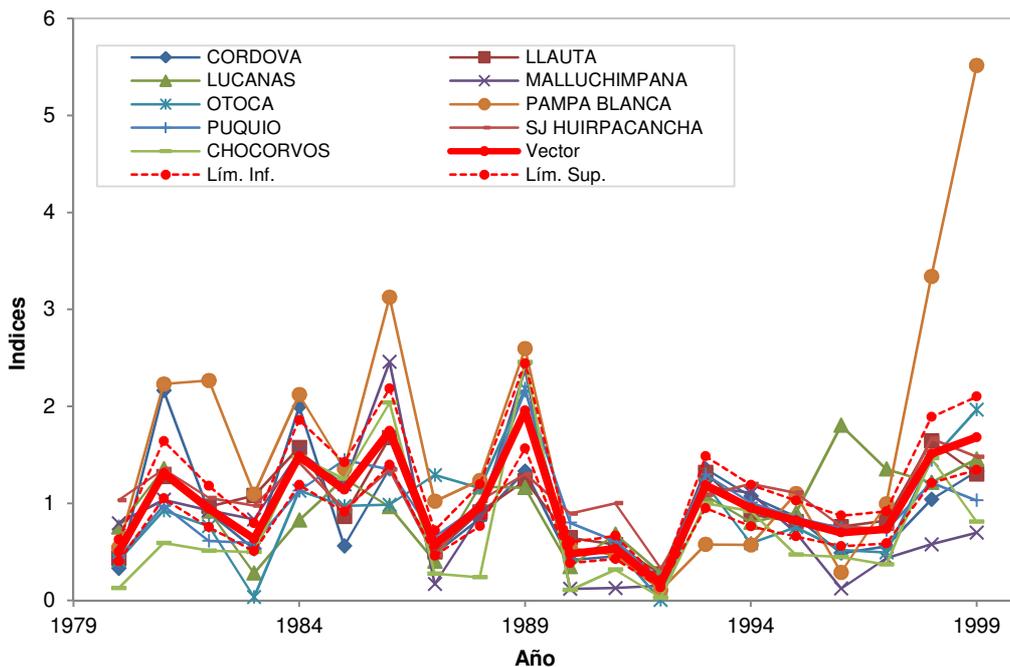


Figura 45: Índices anuales del Vector y las estaciones

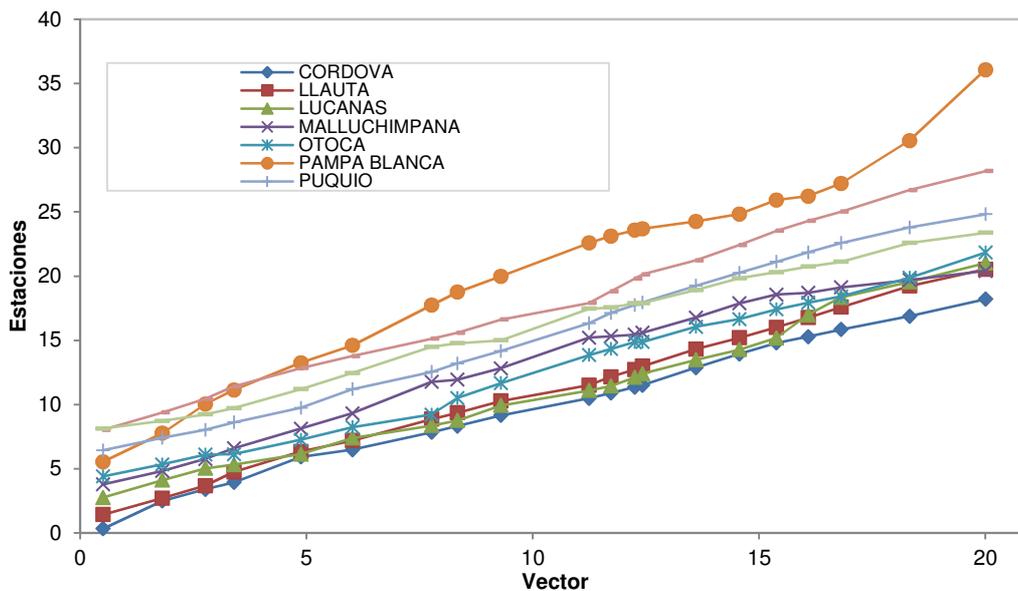


Figura 46: Suma de los Índices anuales del Vector y las estaciones

Cuadro 12: Índices de calidad de las estaciones

Id Estación	No Años	D.E. Obs.	Coef. Variación	Media Obs.	D.E. Desvíos	Homogeneidad B.M.	Correl. /Vector
CORDOVA	20	261.3	0.6	435.3	0.346	0.593	0.785
LLAUTA	20	106.7	0.413	258.2	0.23	0.641	0.878
LUCANAS	20	216.9	0.438	494.9	0.436	0.073	0.528
MALLUCHIMPANA	20	83.4	0.772	108	0.428	0.09	0.784
OTOCA	20	84.9	0.63	134.7	0.333	0.297	0.819
PAMPA BLANCA	20	25.5	0.858	29.7	1.112	0.051	0.795
PUQUIO	20	182.8	0.455	402.1	0.255	0.008	0.854
SJ HUIRPACANCHA	20	118	0.311	378.8	0.292	0.313	0.811
CHOCORVOS	20	232	0.865	268.2	0.396	0.224	0.88

ANEXO 2: Histogramas de probabilidad para las comparaciones S1, S2, S3 y S4.; a escala mensual

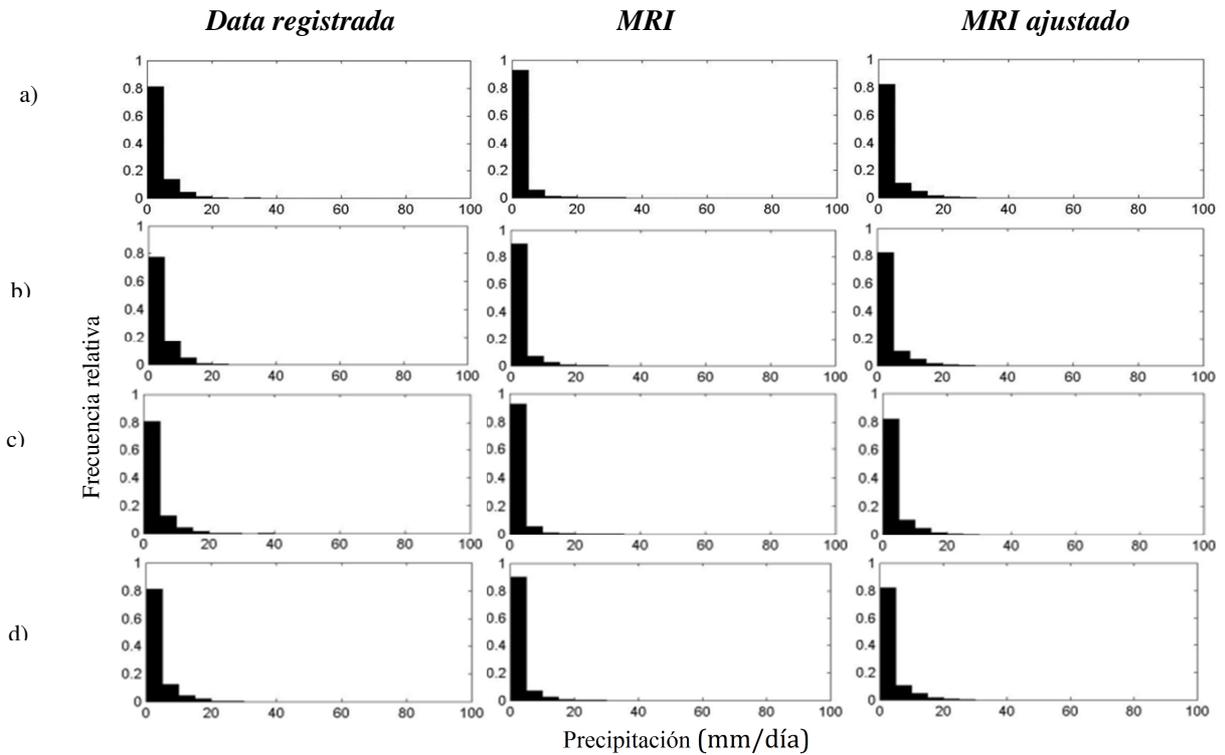


Figura 47: Histogramas de Función de densidad de probabilidad para (a) S1, (b) S2, (c) S3 y (d) S4 – Estación Malluchimpana

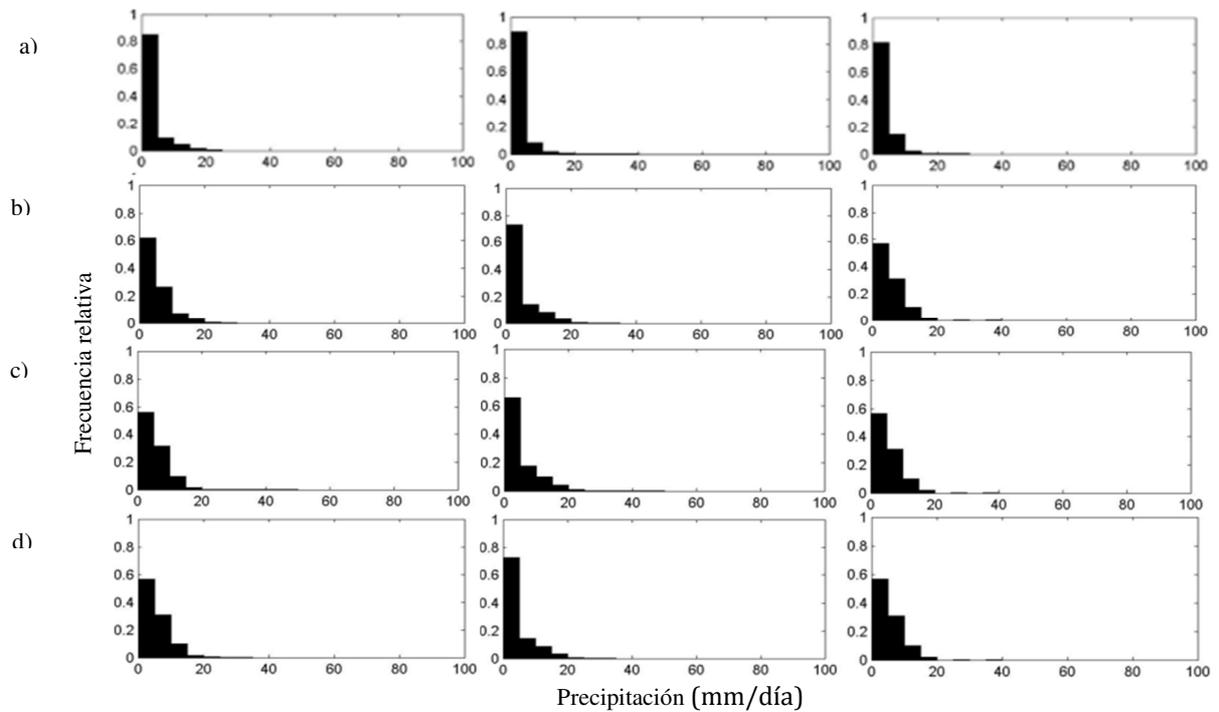


Figura 48: Histogramas de Función de densidad de probabilidad para. (a) S1, (b) S2, (c) S3 y (d) S4 – Estación Otoca

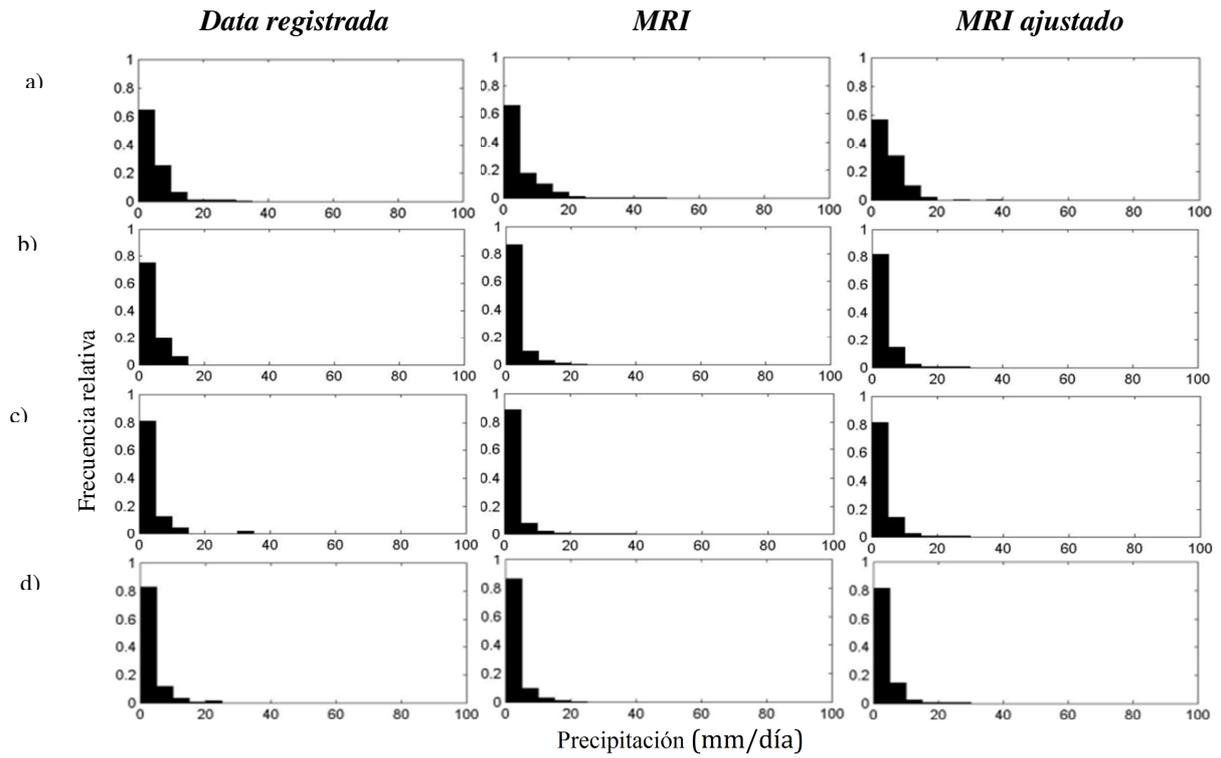


Figura 49: Histogramas de Función de densidad de probabilidad para. (a) S1, (b) S2, (c) S3 y (d) S4 – Estación Pampa Blanca

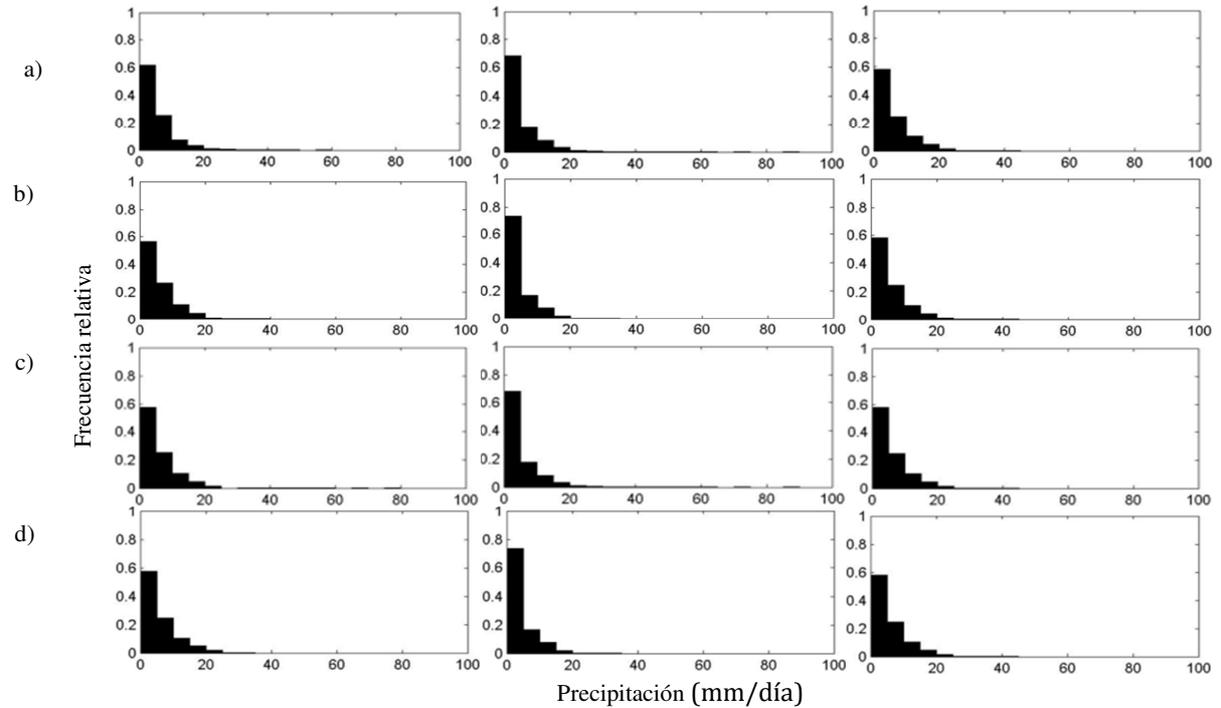


Figura 50: Histogramas de Función de densidad de probabilidad para (a) S1, (b) S2, (c) S3 y (d) S4 – Estación Puquío

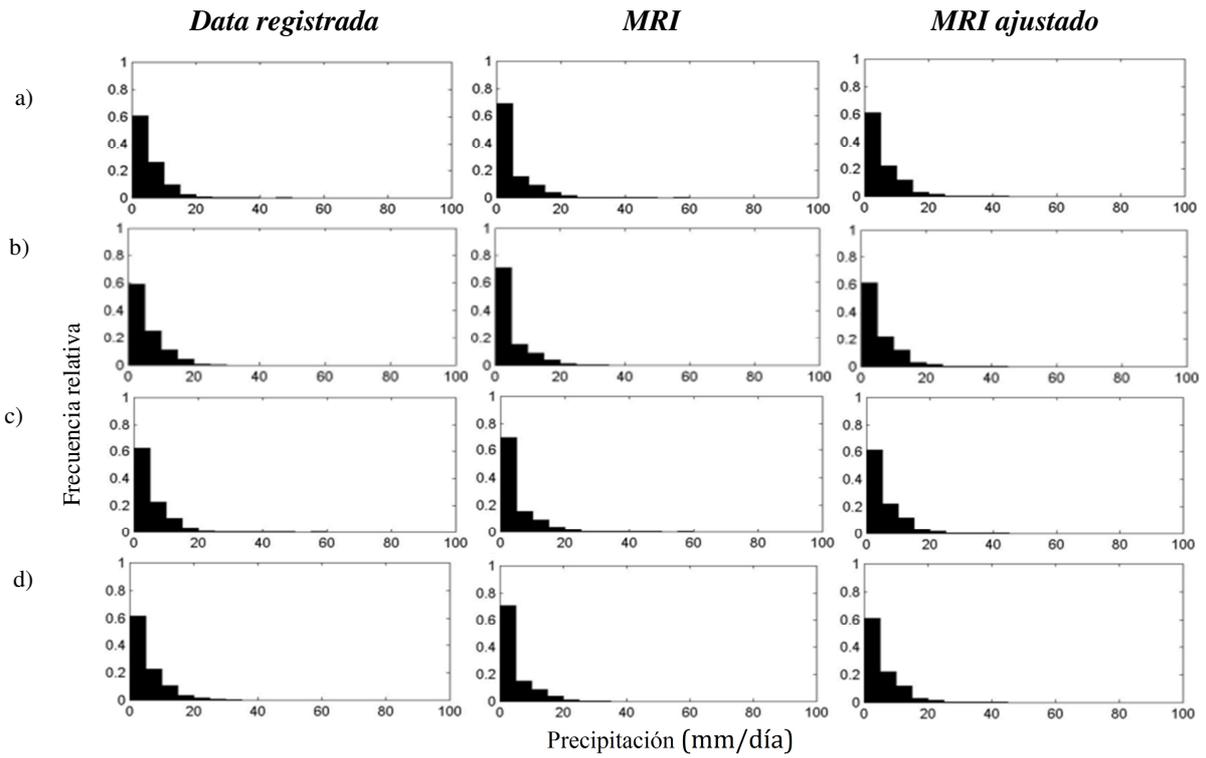


Figura 51: Histogramas de Función de densidad de probabilidad para (a) S1, (b) S2, (c) S3 y (d) S4 – Estación San Juan de Huirpachanca

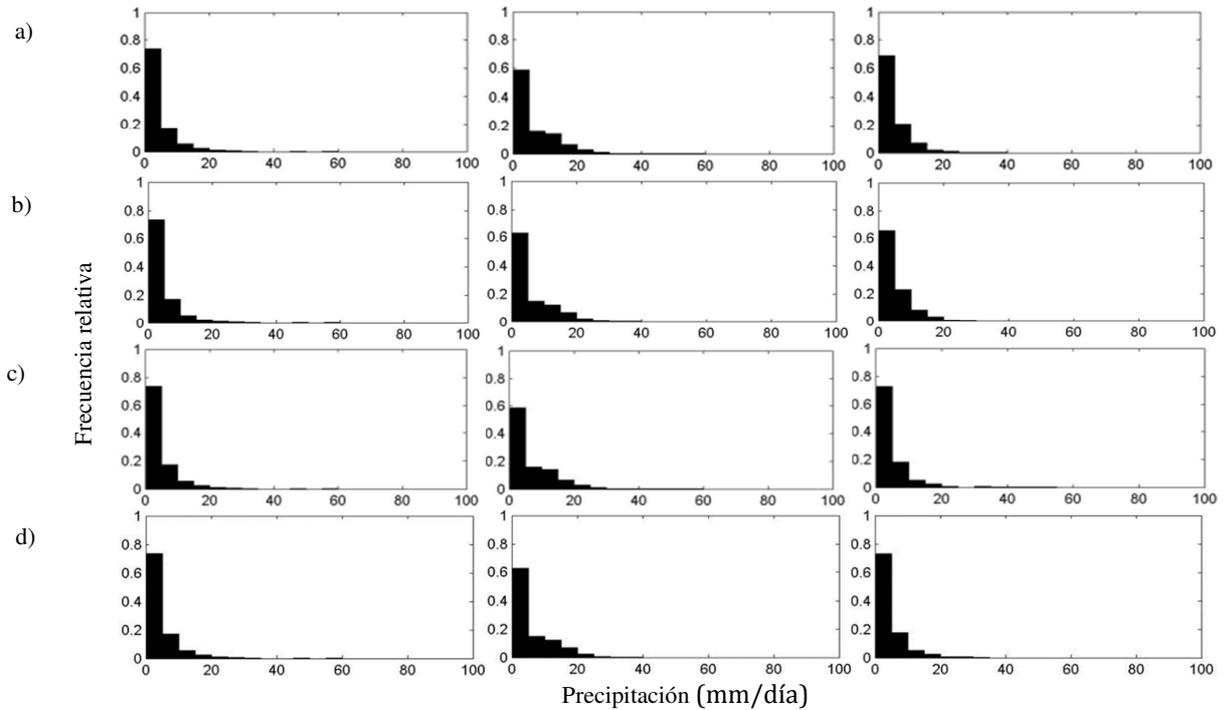


Figura 52: Histogramas de Función de densidad de probabilidad para (a) S1, (b) S2, (c) S3 y (d) S4 – Estación Santiago de Chocorvos

ANEXO 3. Histogramas de la precipitación observada y MRI 3.1S, 3.2S, 3.1S-CDF y 3.2S-CDF a escala mensual.

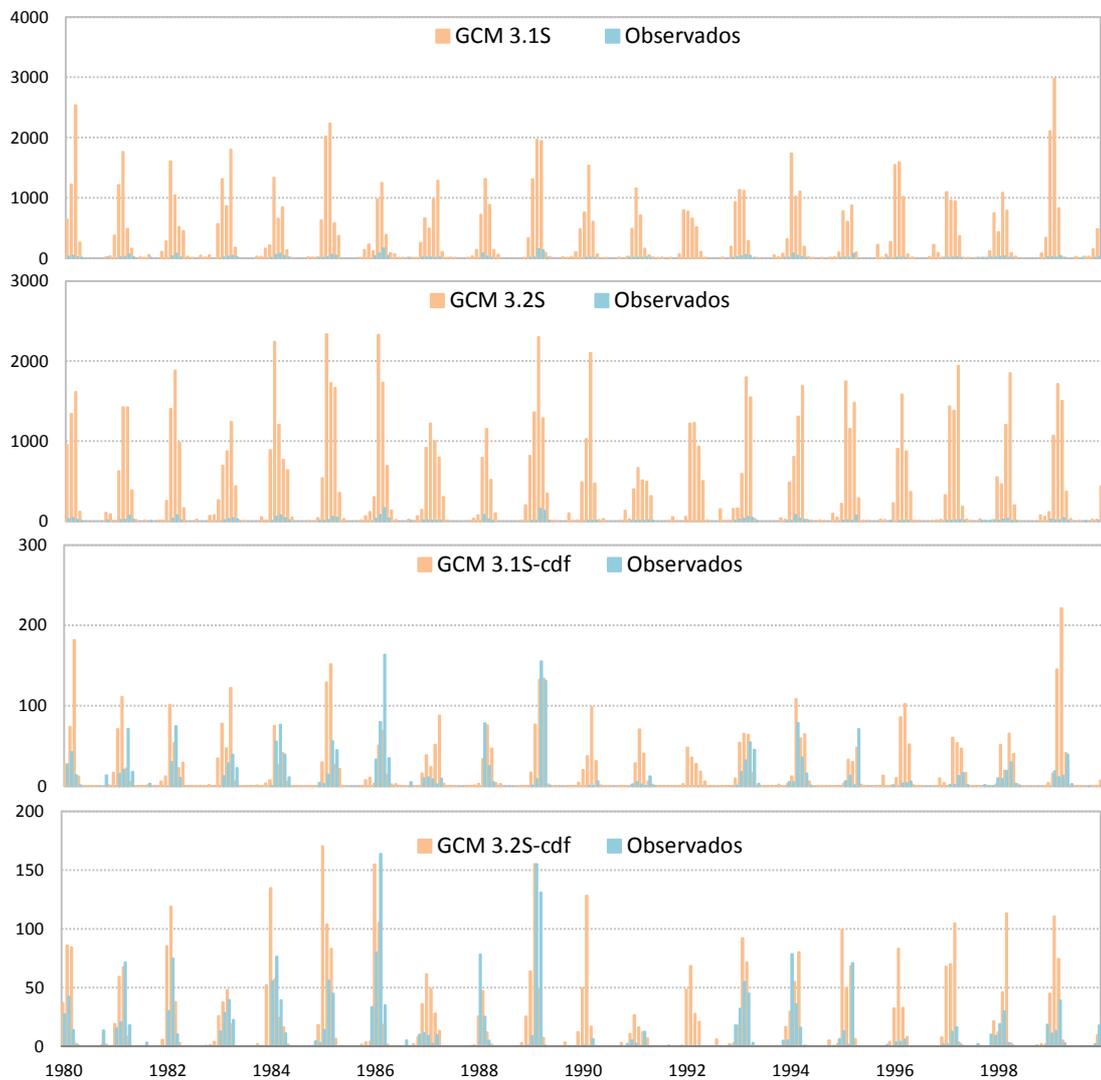


Figura 53: Histogramas de la lluvia observada y estimada del modelo MRI, a escala mensual - estación Malluchimpana.

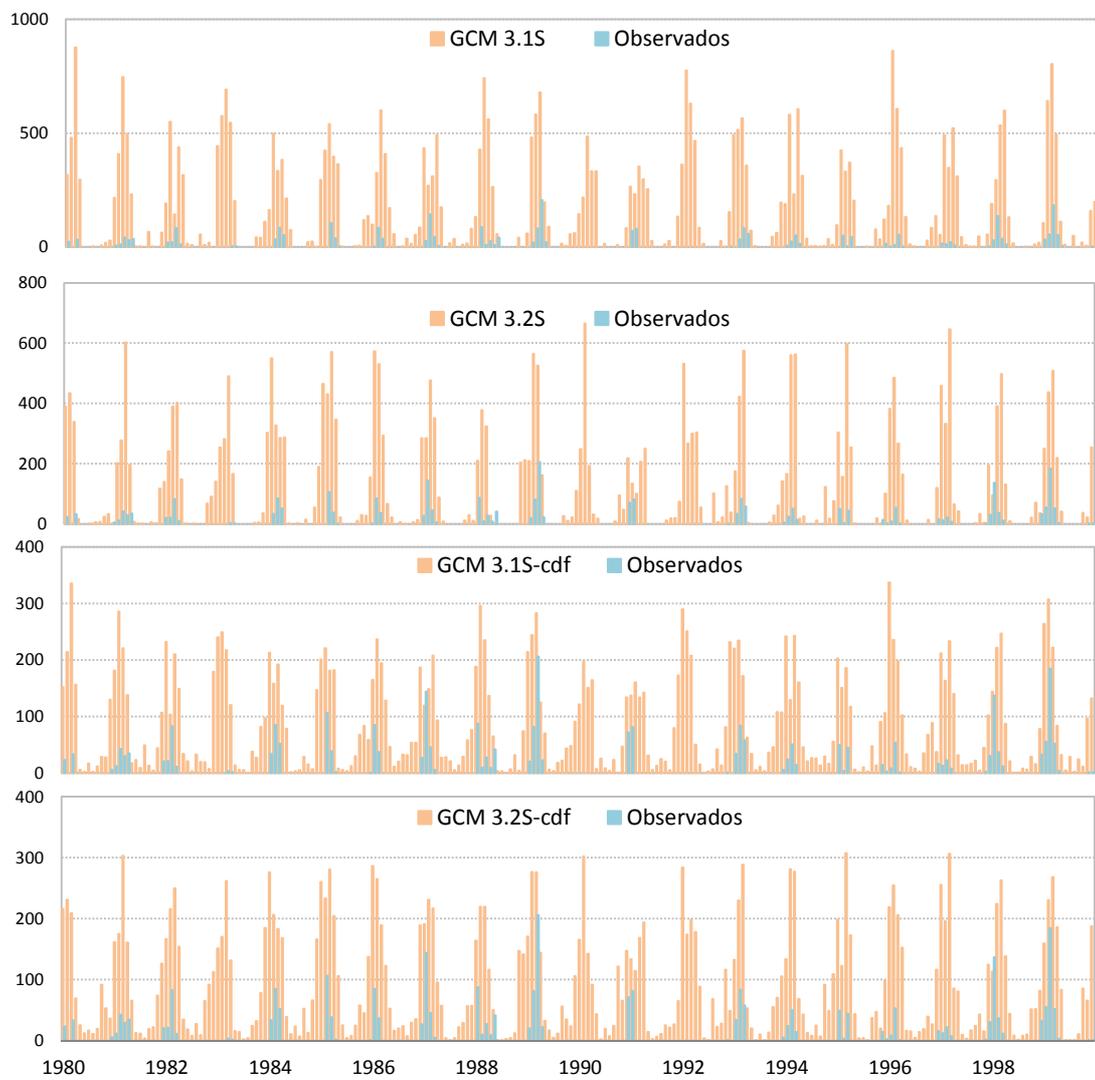


Figura 54: Histogramas de la lluvia observada y estimada del modelo MRI, a escala mensual - estación Otoa.

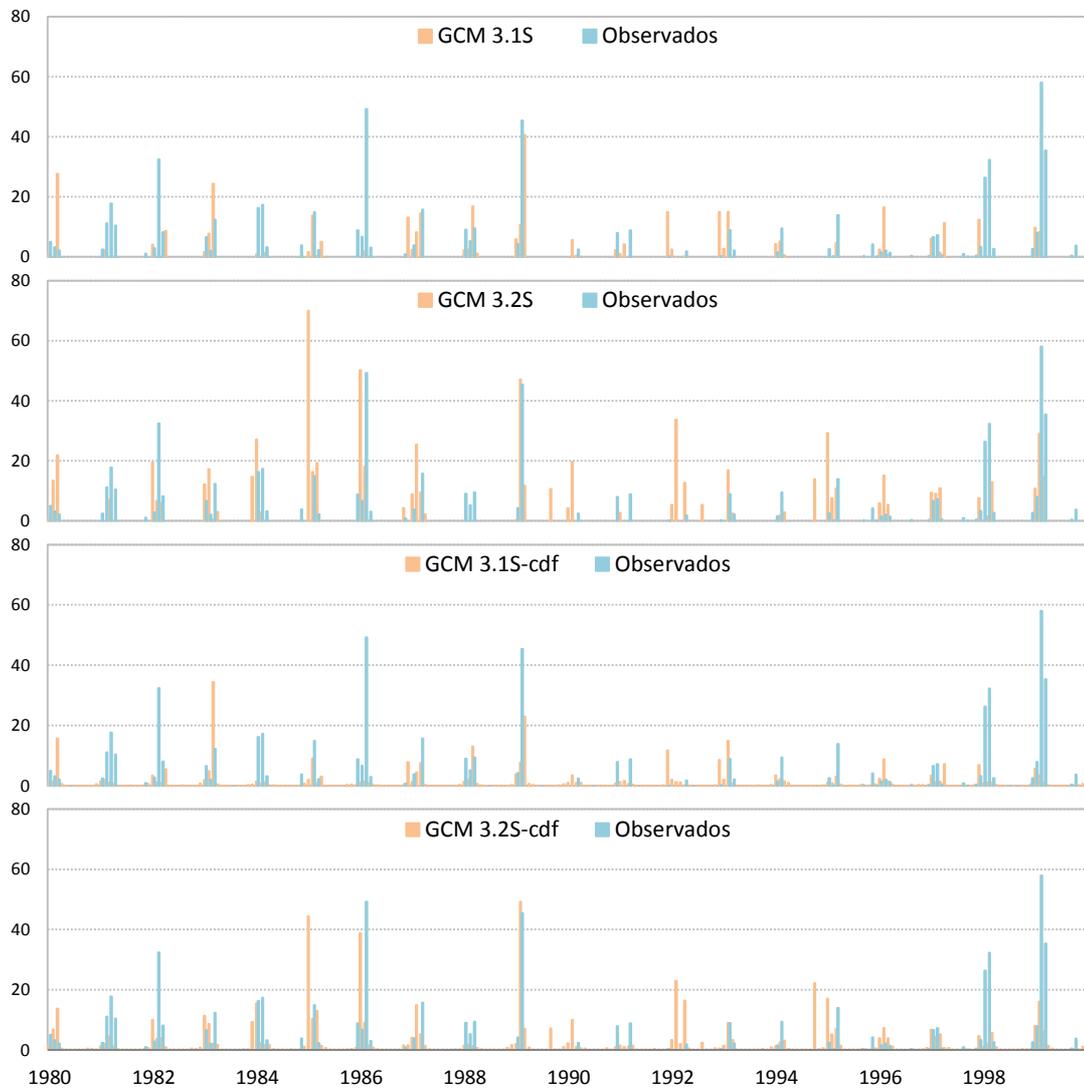


Figura 55: Histogramas de la lluvia observada y estimada del modelo MRI, a escala mensual - estación Pampa blanca.

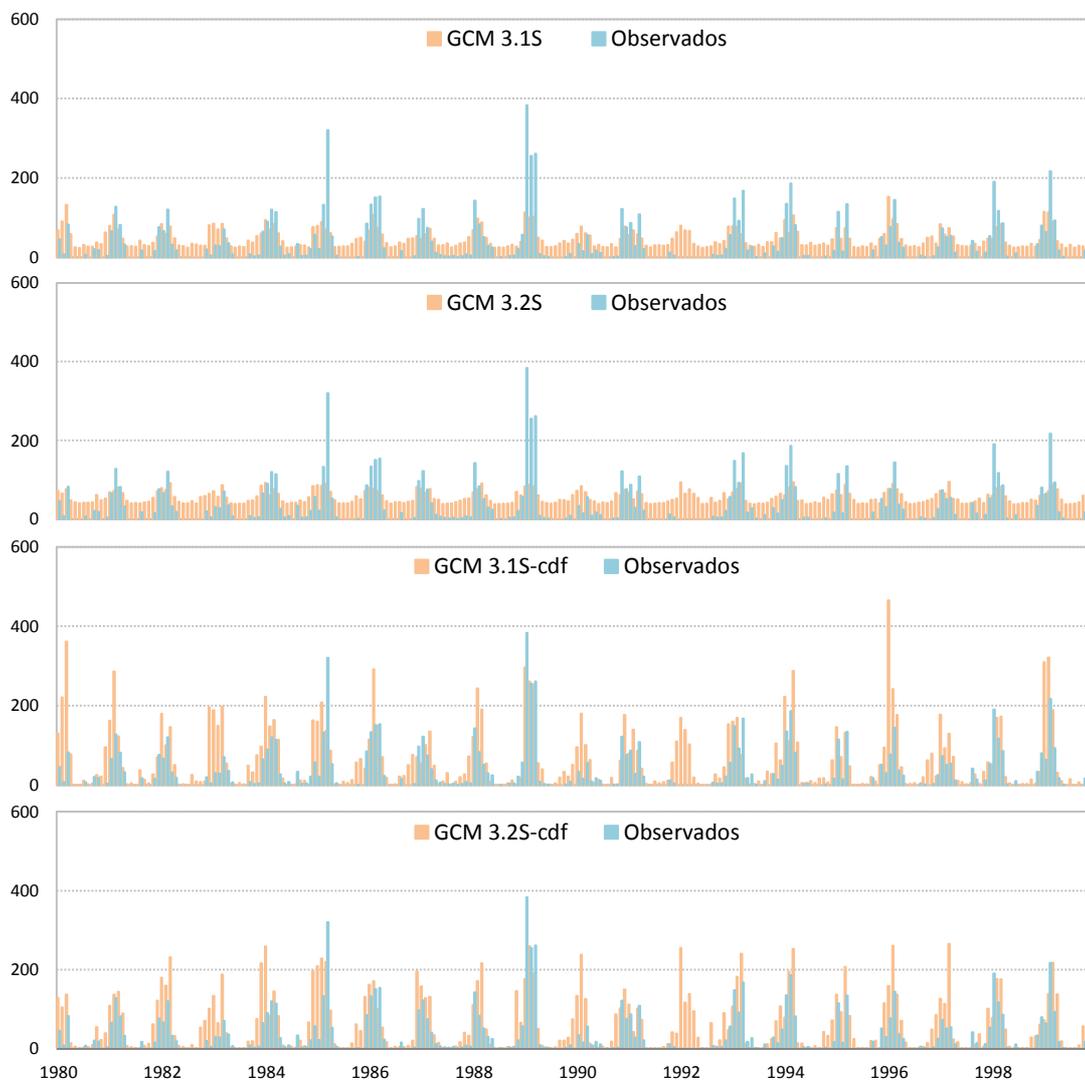


Figura 56: Histogramas de la lluvia observada y estimada del modelo MRI, a escala mensual - estación Puquio.

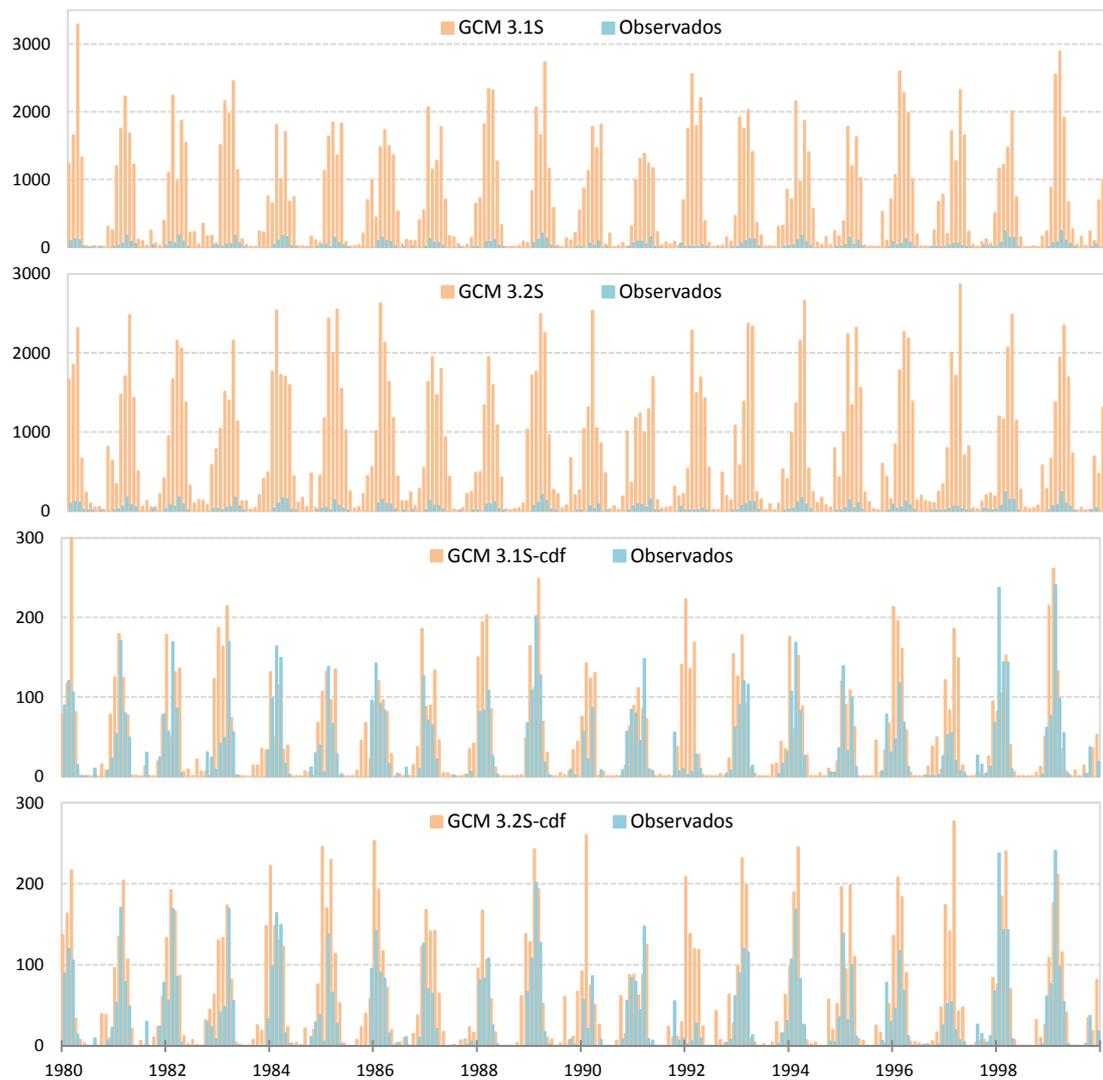


Figura 57: Histogramas de la lluvia observada y estimada del modelo MRI, a escala mensual - estación San Juan de Huirpacancha.

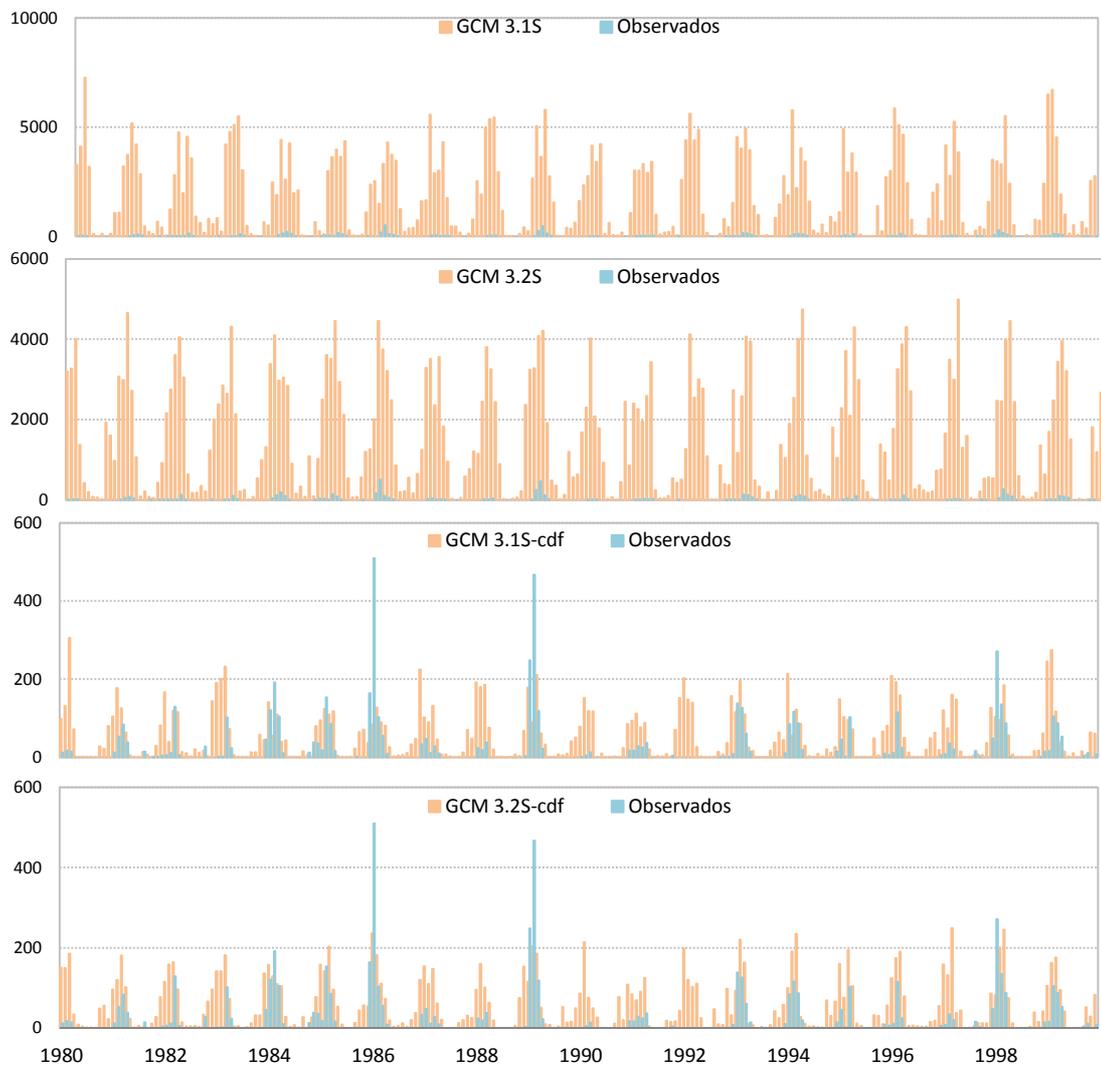


Figura 58: Histogramas de la lluvia observada y estimada del modelo MRI, a escala mensual - estación Santiago de Chocorvos

ANEXO 4: Evolución del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) para 3, 6 y 12 meses.

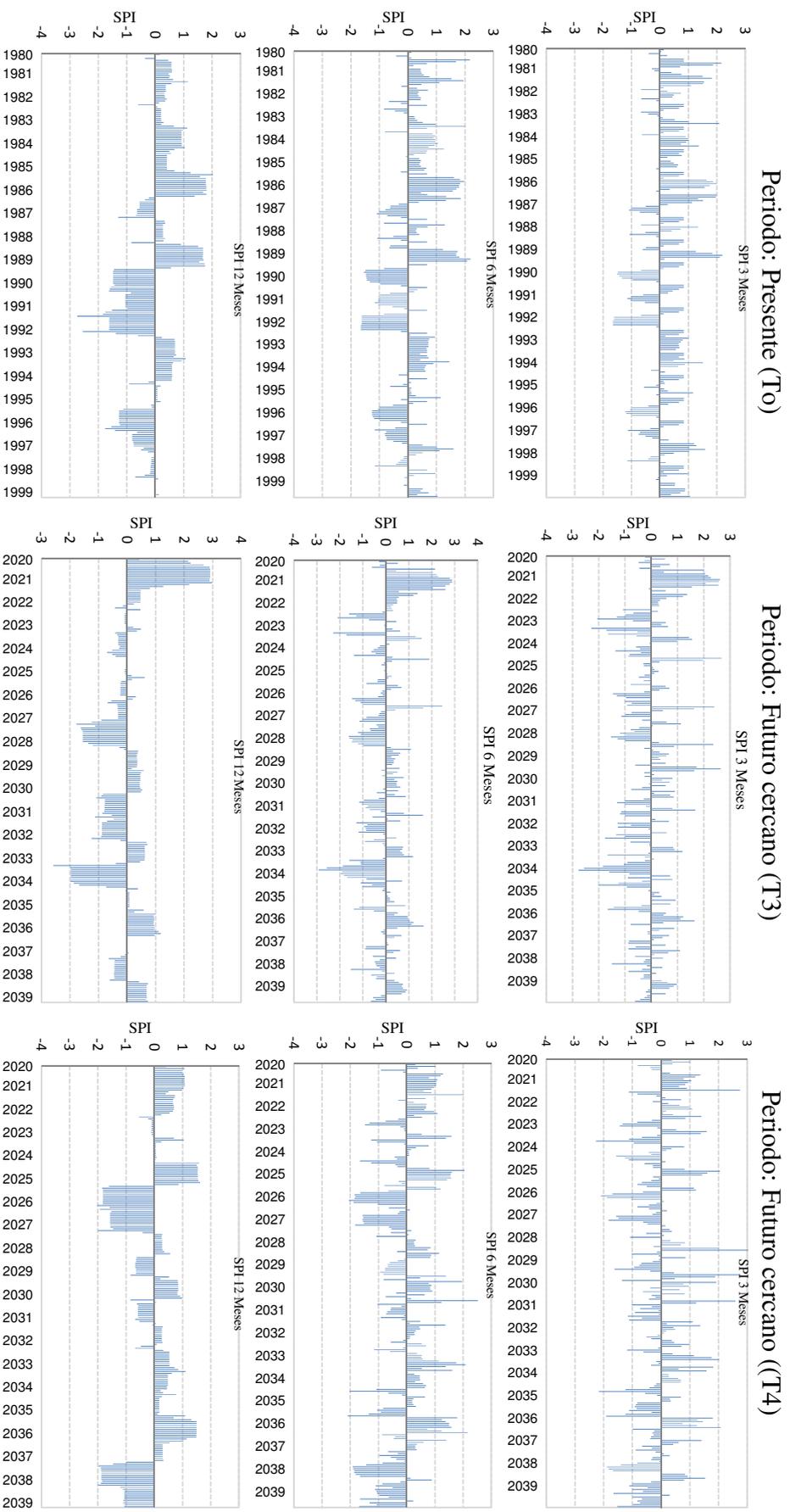


Figura 59: Evolución del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) para 3, 6 y 12 meses en la estación Malluchimpana. Periodo presente (1980-1999) y futuro cercano (2020-2039)

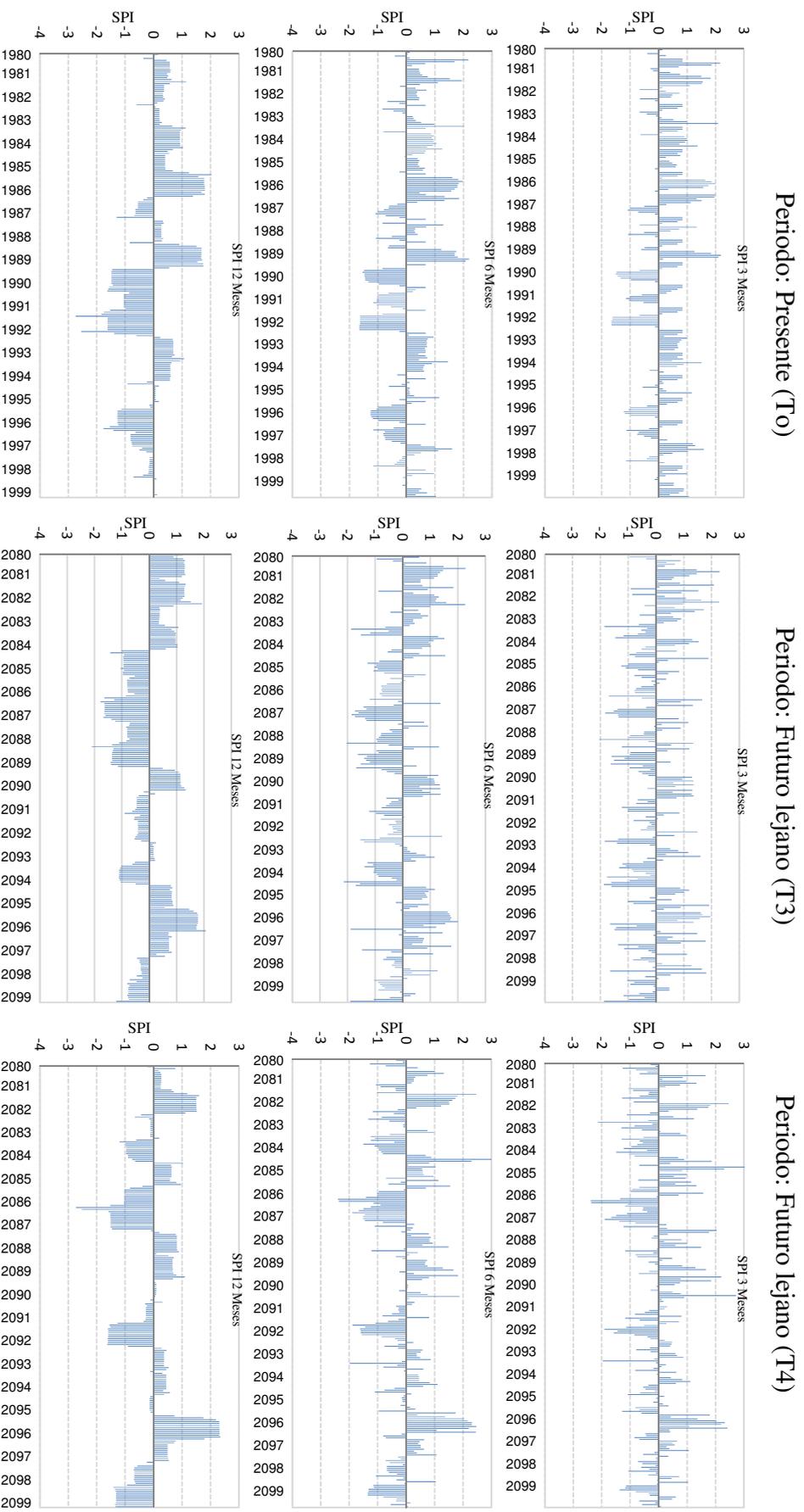


Figura 60: Evolución del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) para 3, 6 y 12 meses en la estación Malluchimpana. Periodo presente (1980-1999) y futuro lejano (2080-2099)

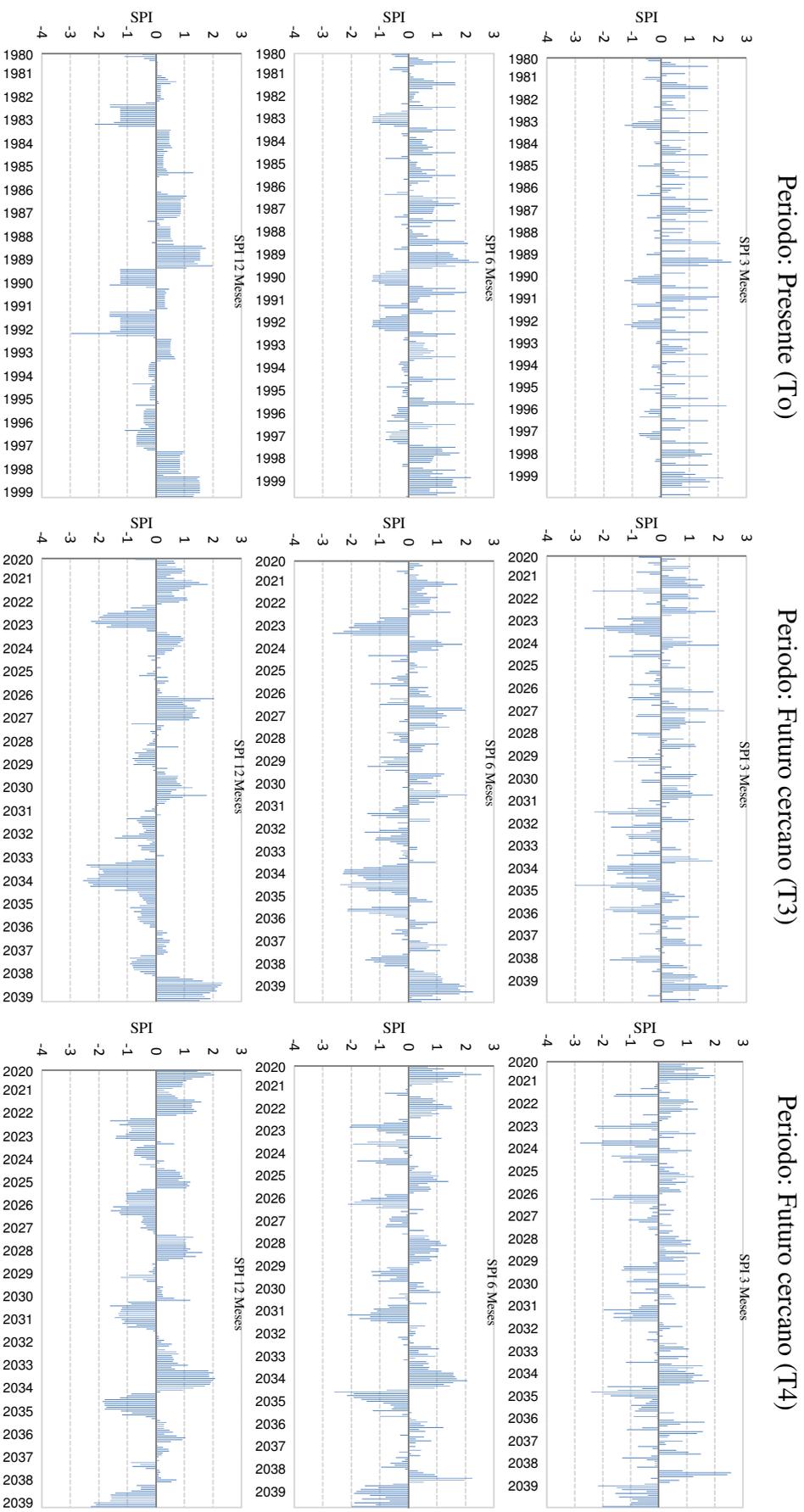


Figura 61: Evolución del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) para 3, 6 y 12 meses en la estación Oitoca. Periodo presente (1980-1999) y futuro cercano (2020-2039)

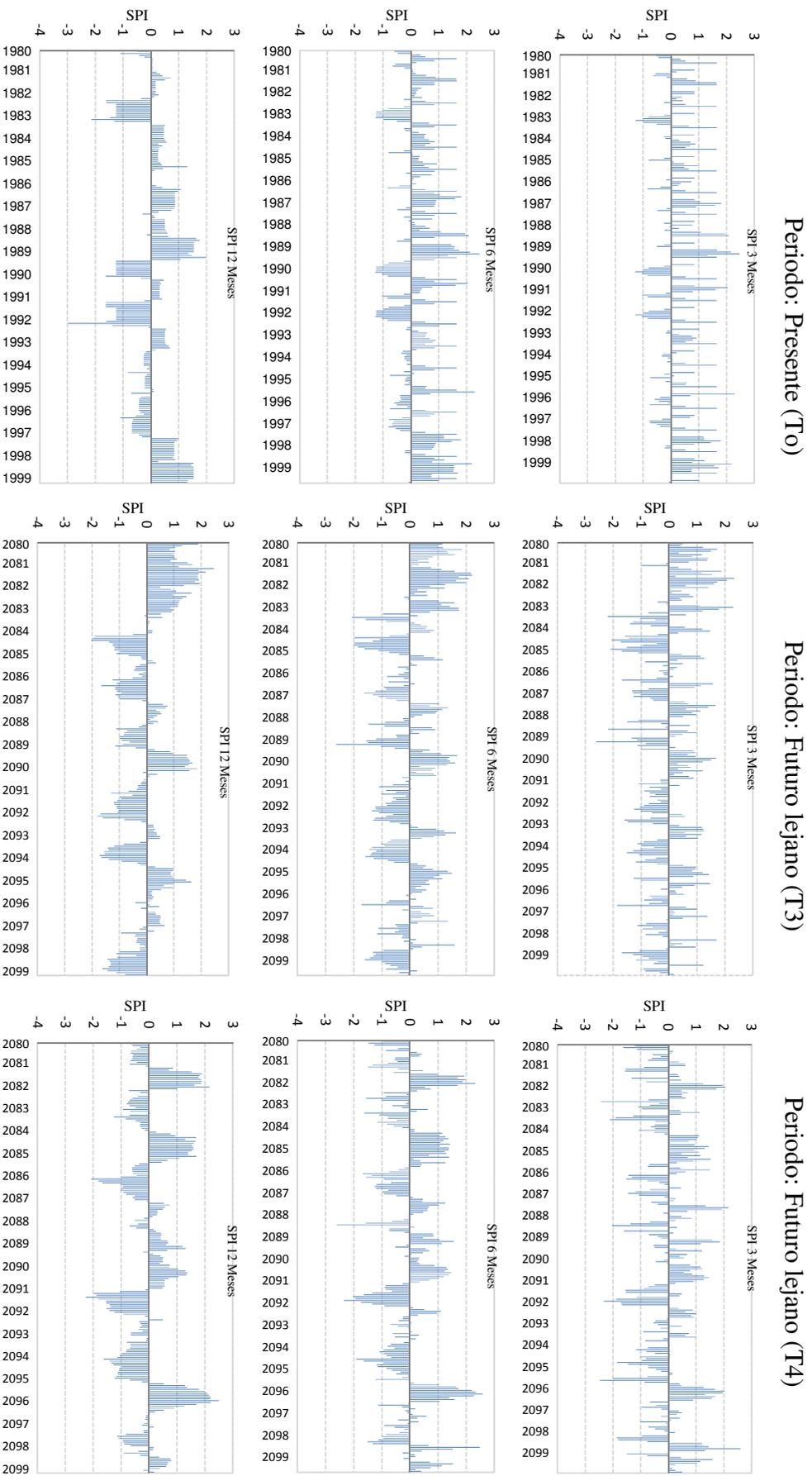


Figura 62: Evolución del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) para 3, 6 y 12 meses en la estación Otoca. Periodo presente (1980-1999) y futuro lejano (2080-2099)

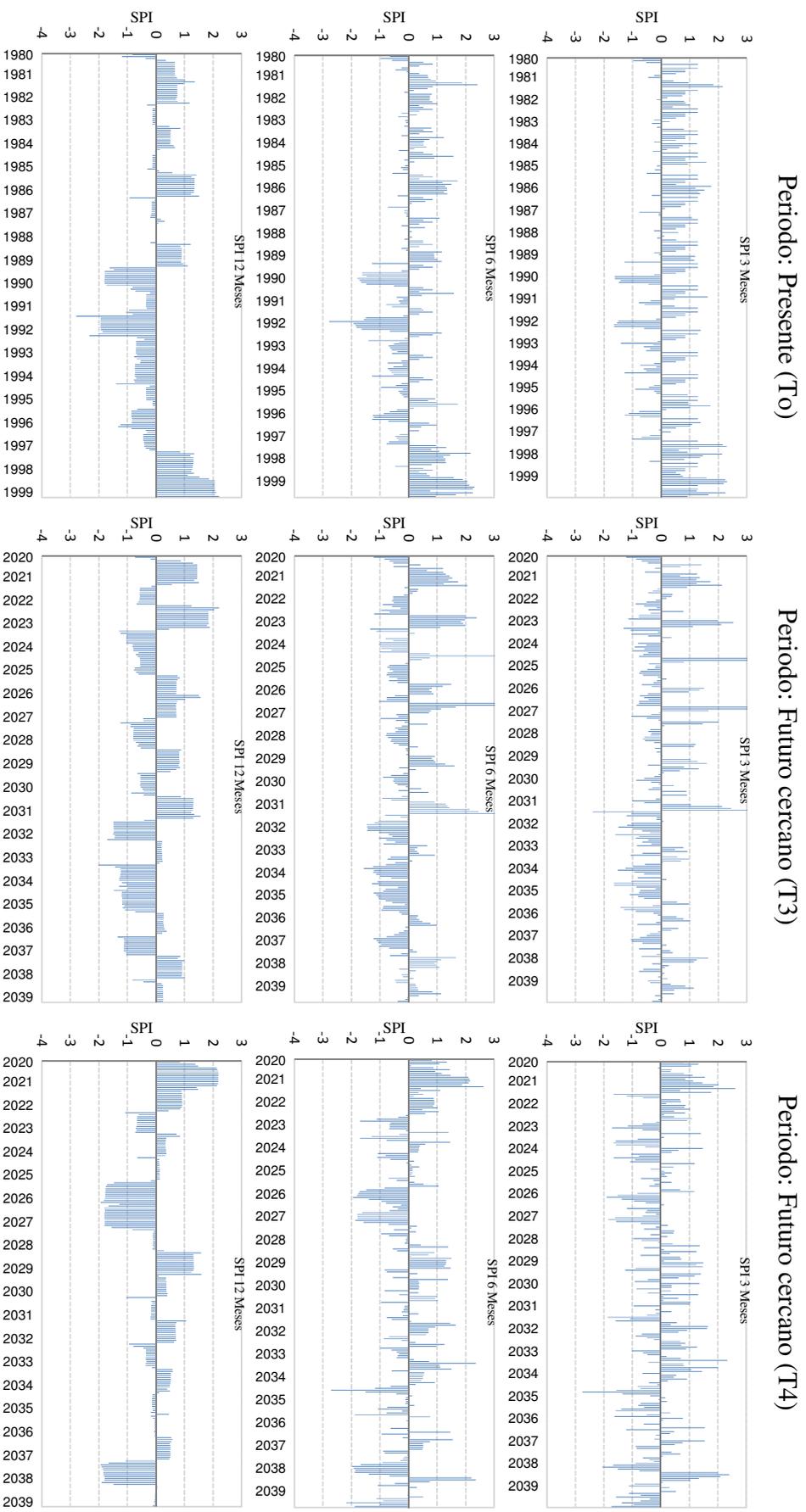


Figura 63: Evolución del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) para 3, 6 y 12 meses en la estación Pampa Blanca. Periodo presente (1980-1999) y futuro cercano (2020-2039)

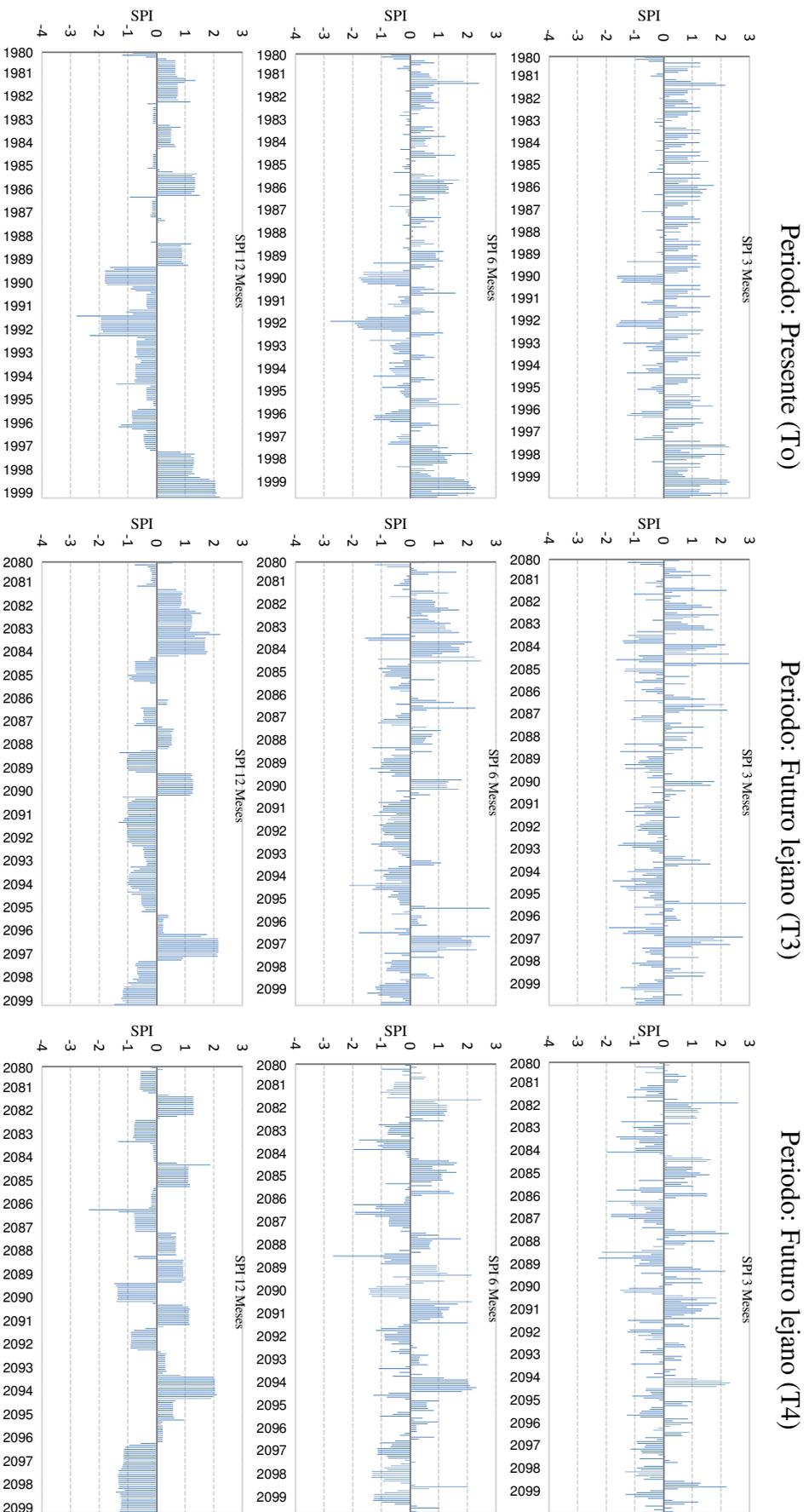


Figura 64: Evolución del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) para 3, 6 y 12 meses en la estación Pampa Blanca. Periodo presente (1980-1999) y futuro lejano (2080-2099)

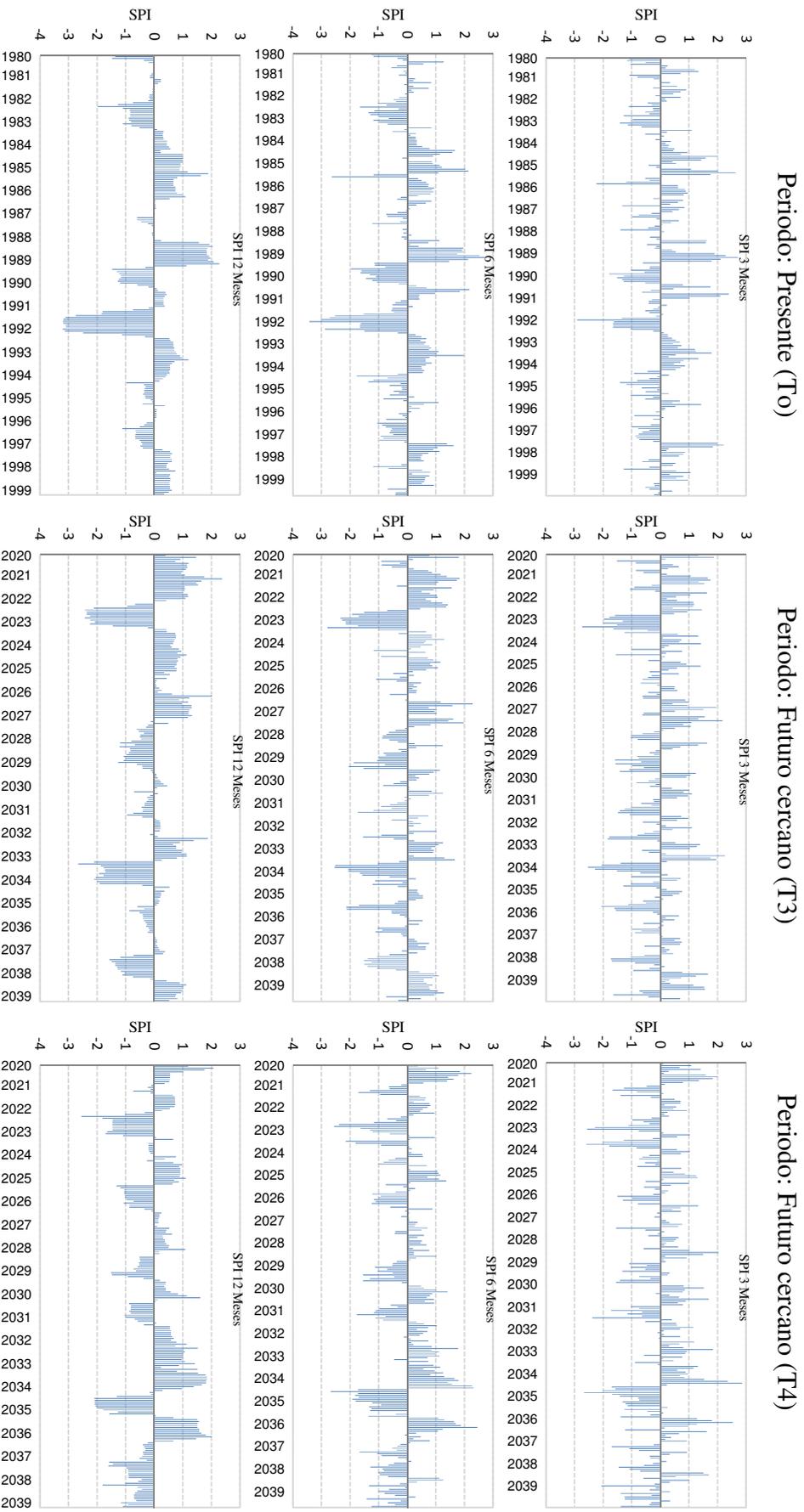


Figura 65: Evolución del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) para 3, 6 y 12 meses en la estación Puquiuo: Periodo presente (1980-1999) y futuro cercano (2020-2039)

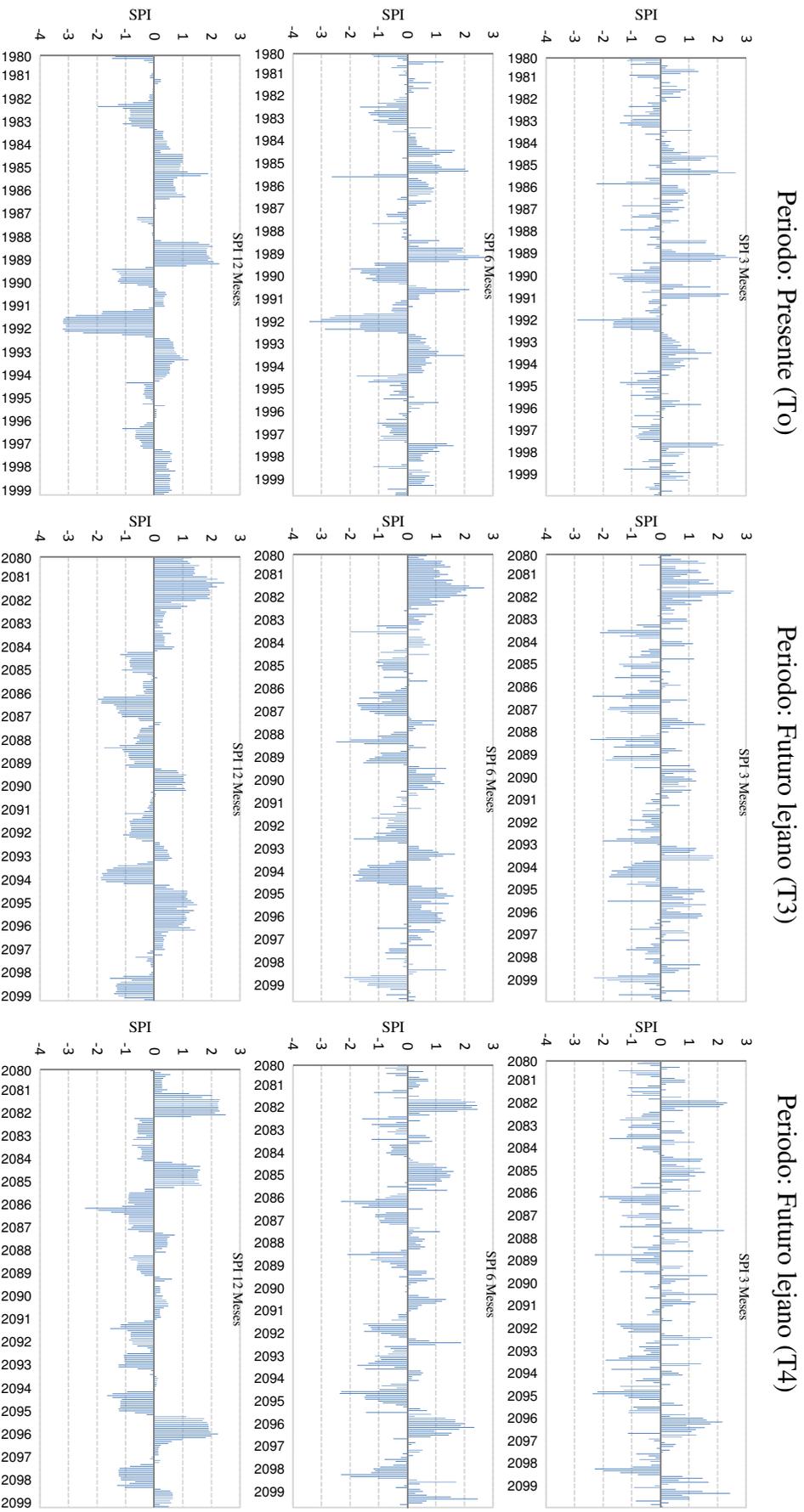


Figura 66: Evolución del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) para 3, 6 y 12 meses en la estación Puquiu. Periodo presente (1980-1999) y futuro lejano (2080-2099)

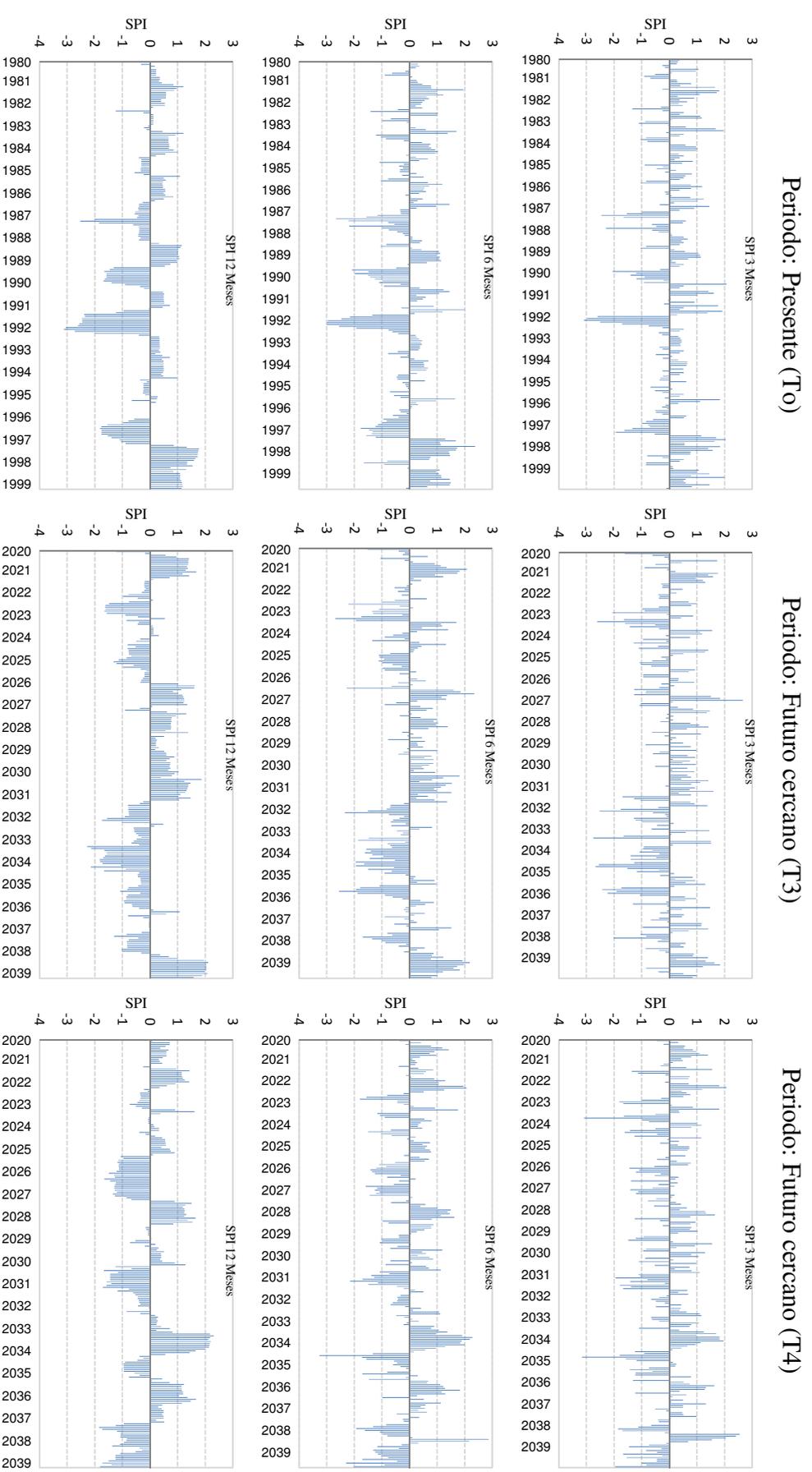


Figura 67: Evolución del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) para 3, 6 y 12 meses en la estación San Juan de Huirpachanca. Período presente (1980-1999) y futuro cercano (2020-2039)

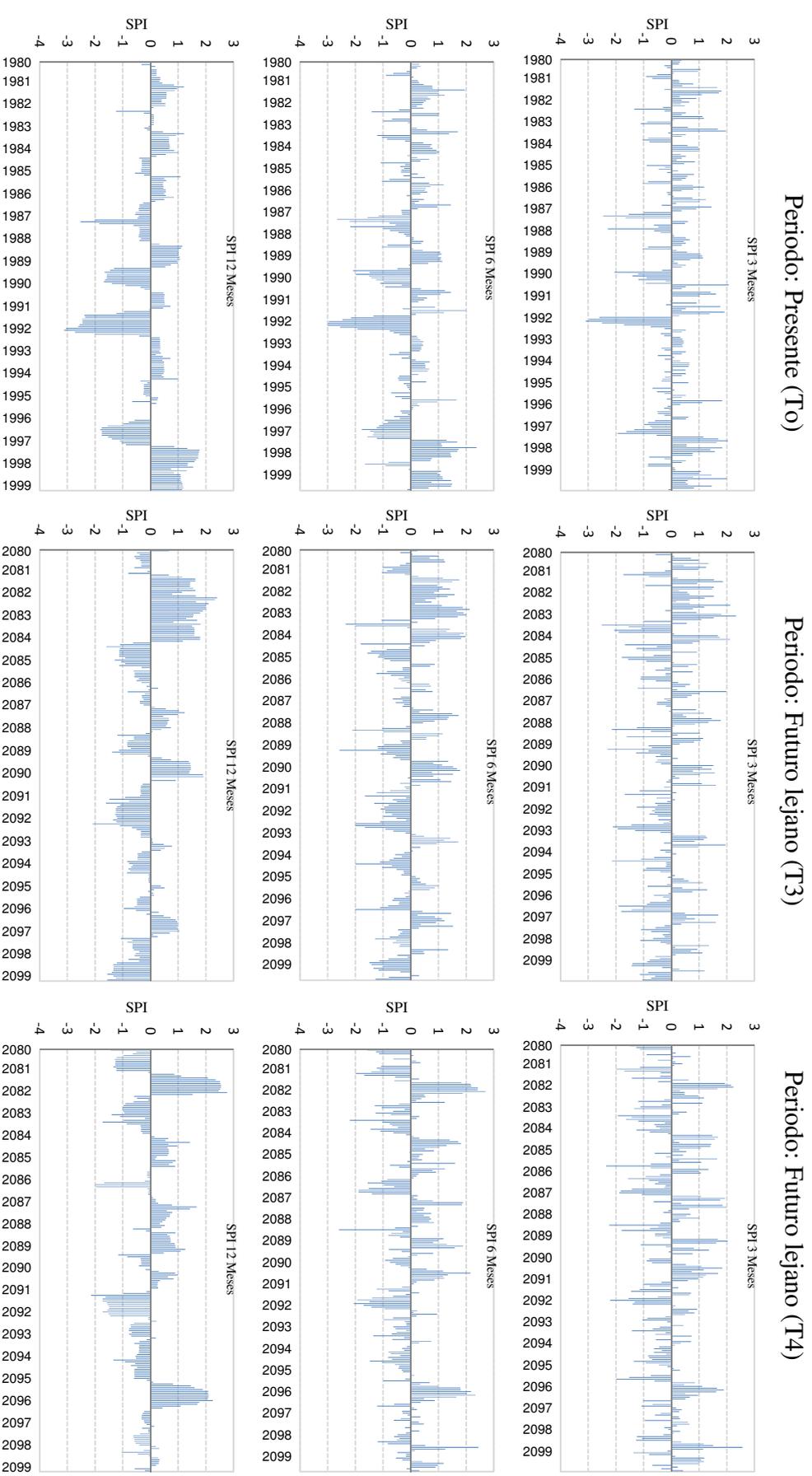


Figura 68: Evolución del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) para 3, 6 y 12 meses en la estación San Juan de Huirpamarca. Periodo presente (1980-1999) y futuro lejano (2080-2099)

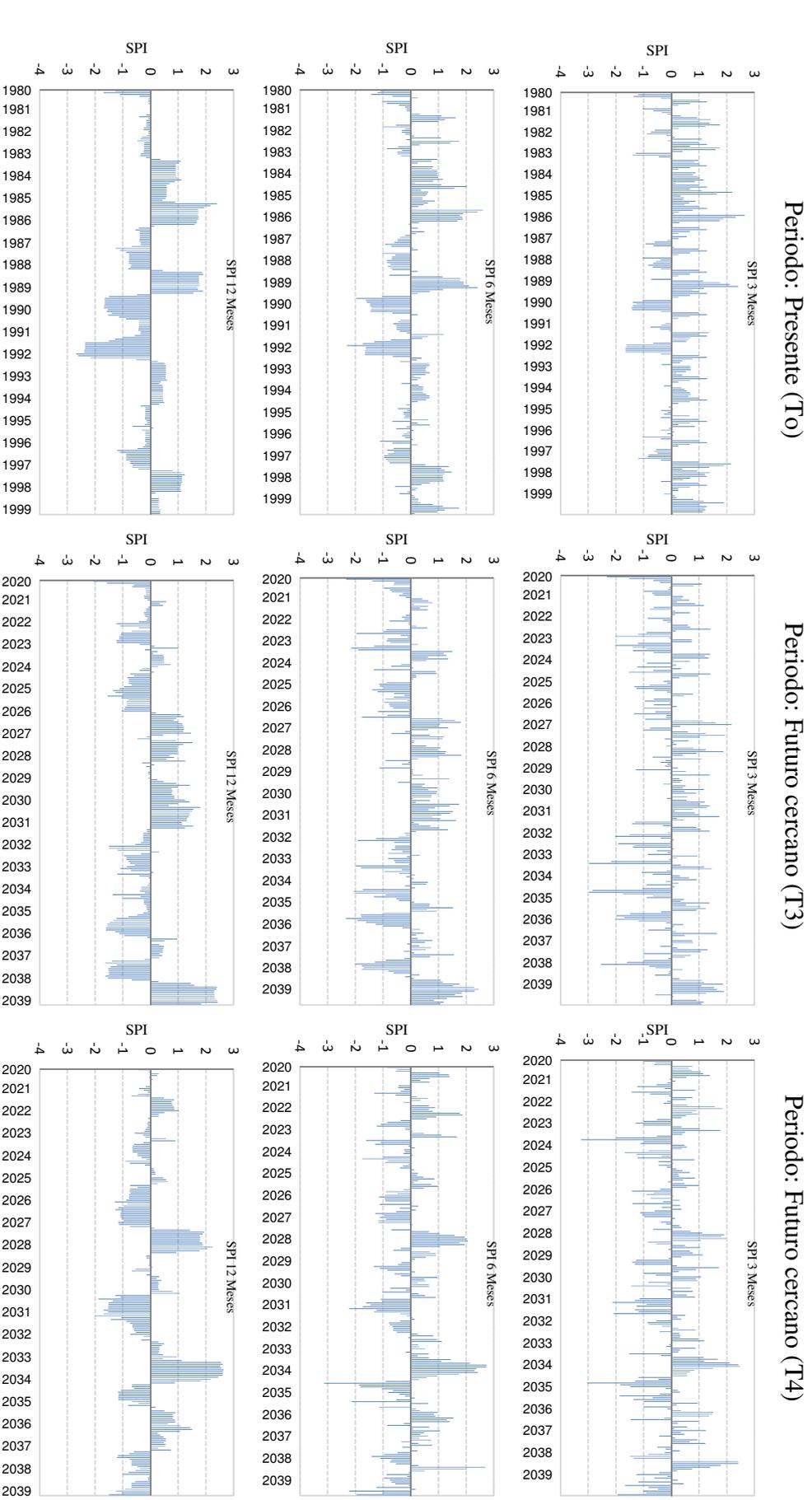


Figura 69: Evolución del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) para 3, 6 y 12 meses en la estación Santiago de Chocorvos. Periodo presente (1980-1999) y futuro cercano (2020-2039)

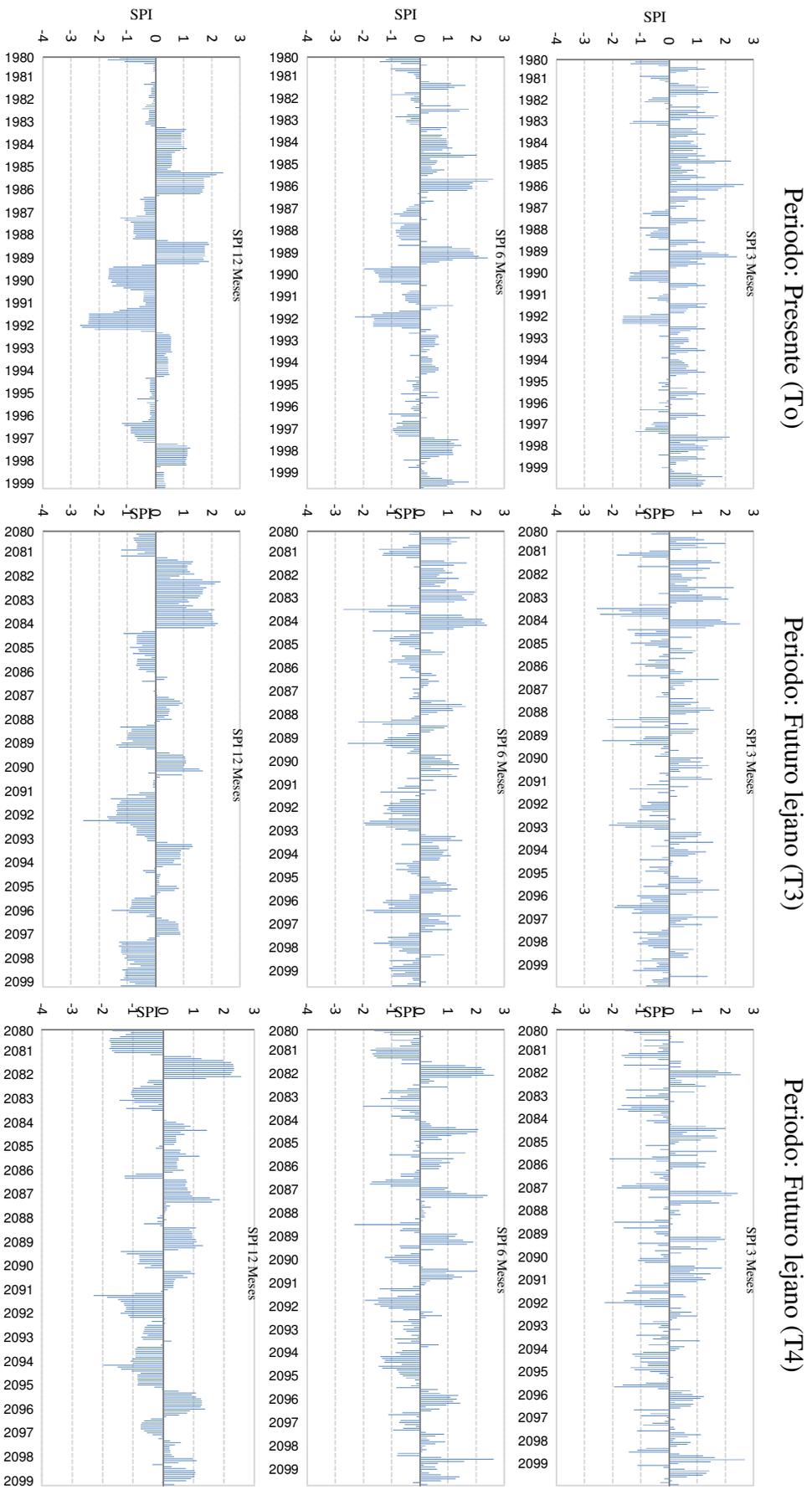


Figura 70: Evolución del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) para 3, 6 y 12 meses en la estación Santiago de Chocorvos. Periodo presente (1980-1999) y futuro lejano (2080-2099)

ANEXO 5: Diagramas de dispersión de SPI y Z score para 3, 6 y 12 meses (de izquierda a derecha). Periodo presente (1980-1999), futuro cercano (2020-2039) y futuro lejano (2080-2099).

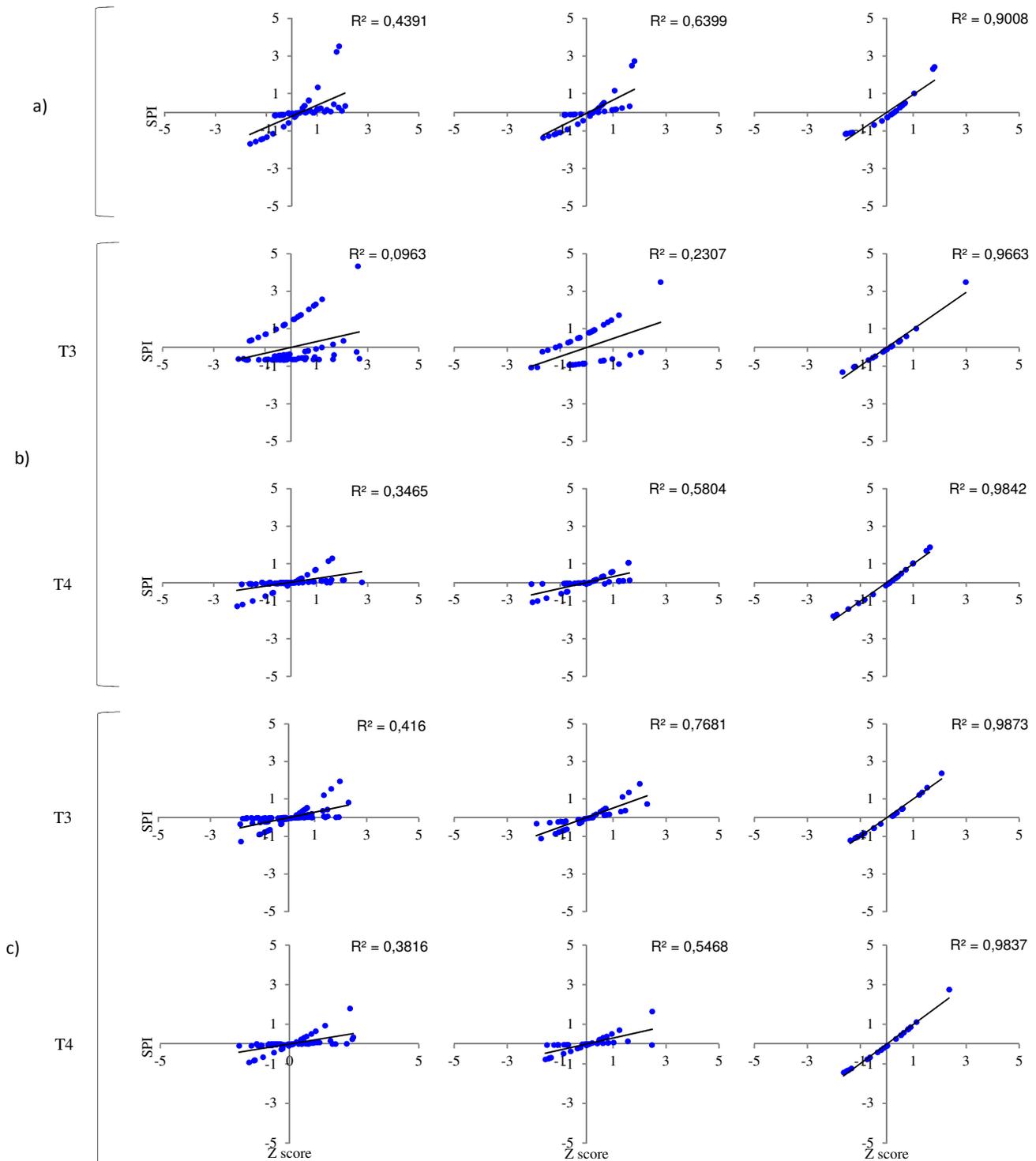


Figura 71: Diagramas de dispersión de SPI y Z score para la estación Malluchimpana para 3, 6 y 12 meses (de izquierda a derecha); y el periodo a) presente (1980-1999), b) futuro cercano (2020-2039) y c) futuro lejano (2080-2099)

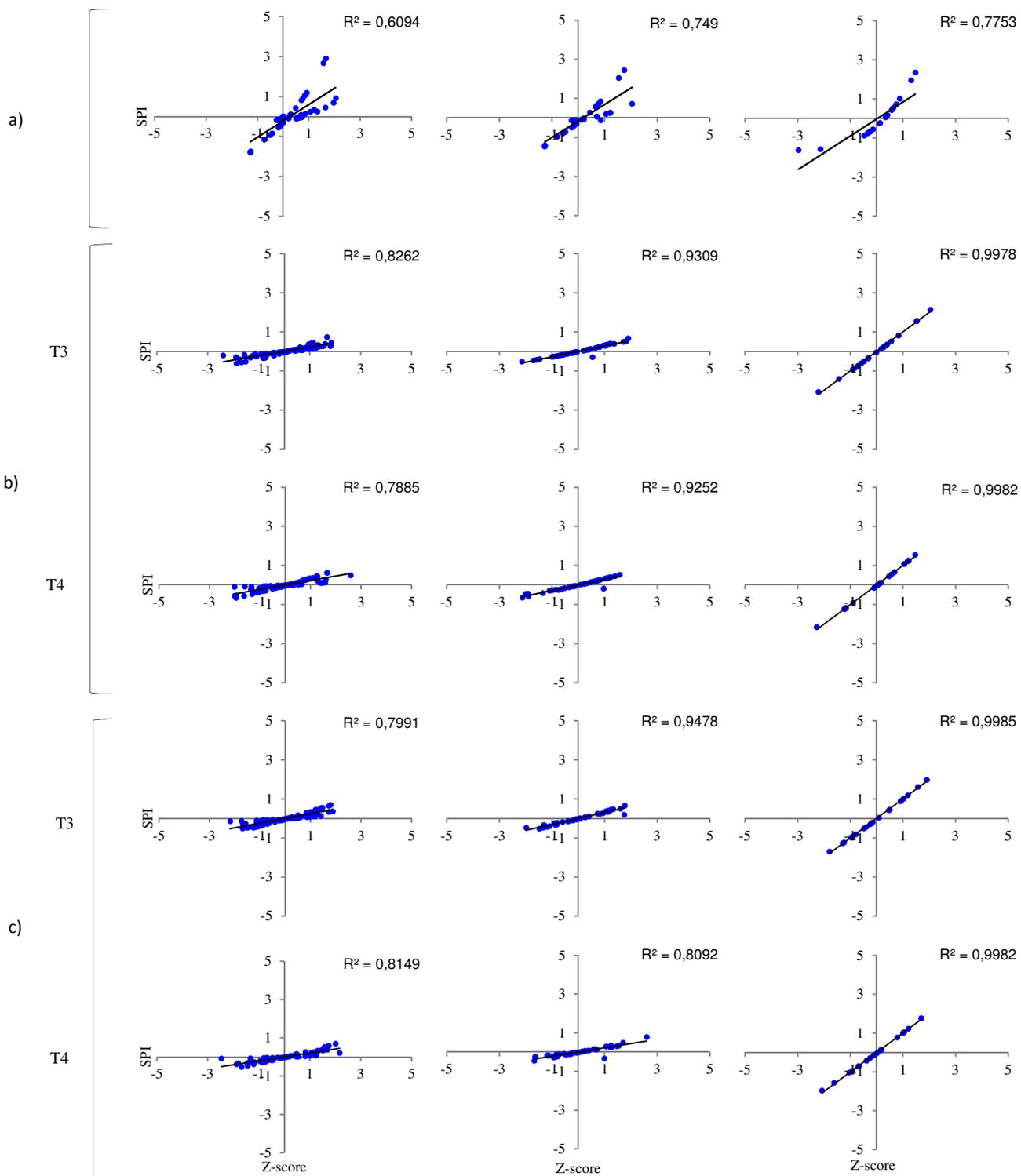


Figura 72: Diagramas de dispersión de SPI y Z score para la estación Otoca para 3, 6 y 12 meses (de izquierda a derecha); y el periodo a) presente (1980-1999), b) futuro cercano (2020-2039) y c) futuro lejano (2080-2099)

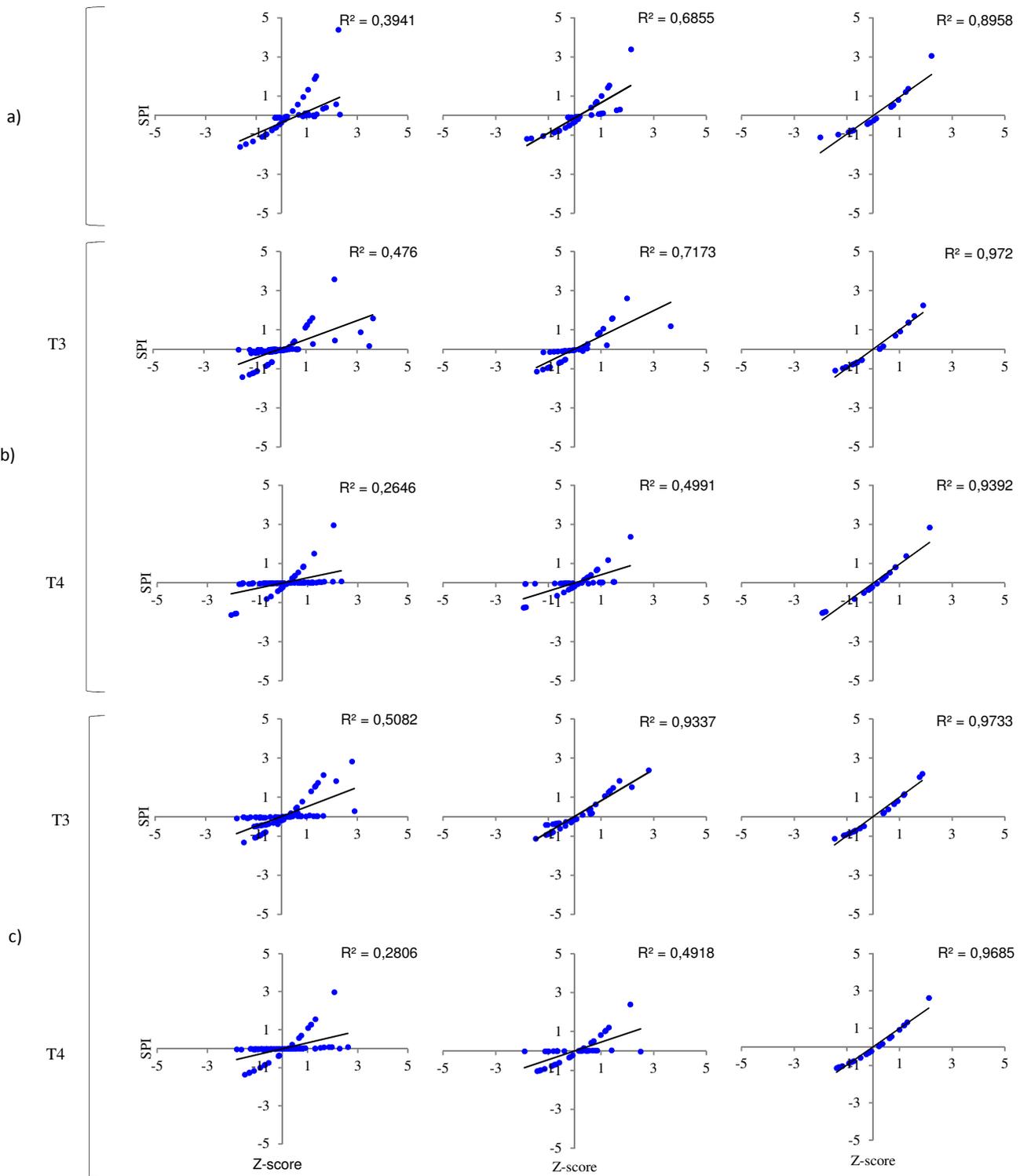


Figura 73: Diagramas de dispersión de SPI y Z score para la estación Pampa Blanca para 3, 6 y 12 meses (de izquierda a derecha); y el periodo a) presente (1980-1999), b) futuro cercano (2020-2039) y c) futuro lejano (2080-2099)

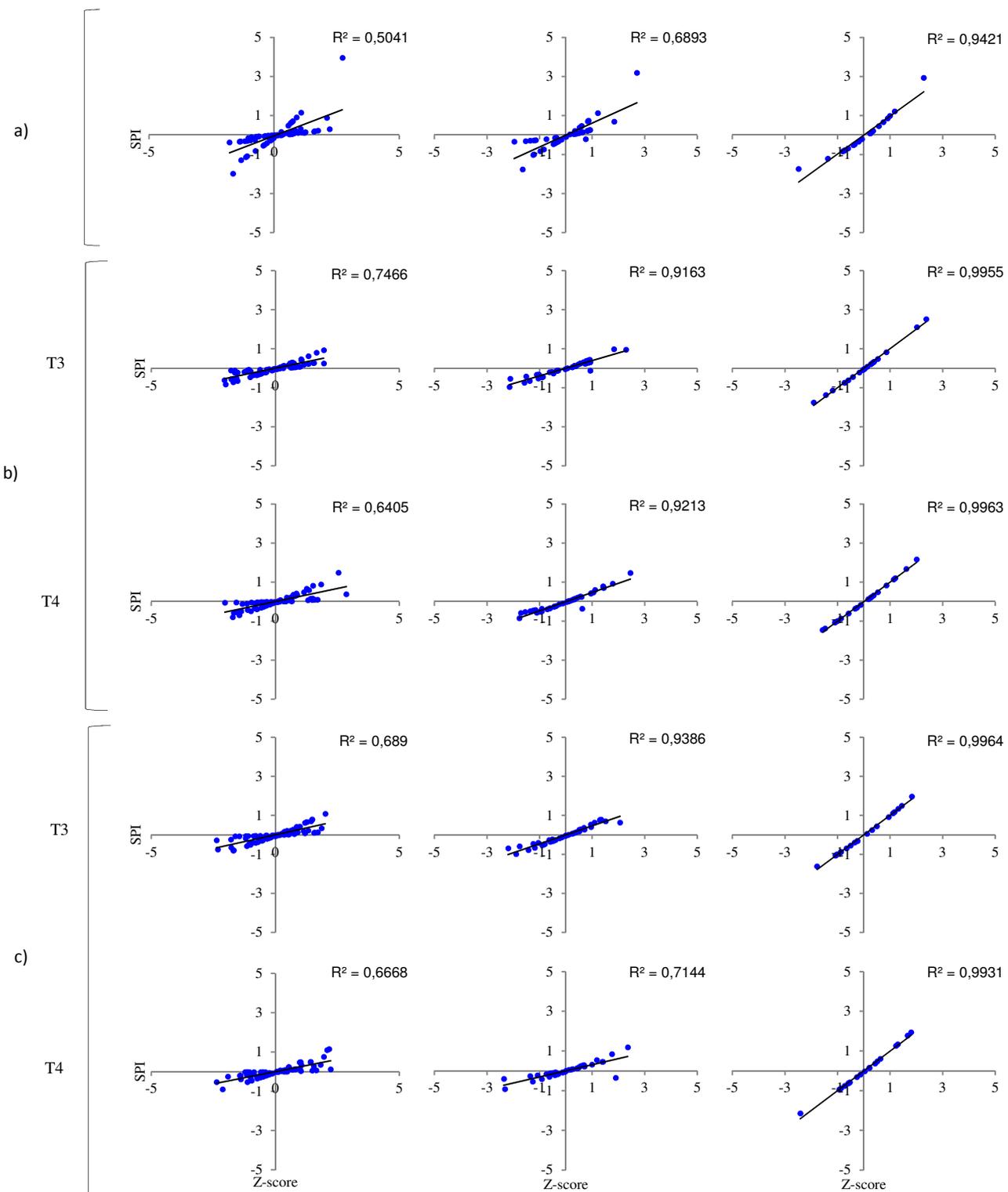


Figura 74: Diagramas de dispersión de SPI y Z score para la estación Puquio para 3, 6 y 12 meses (de izquierda a derecha); y el periodo a) presente (1980-1999), b) futuro cercano (2020-2039) y c) futuro lejano (2080-2099)

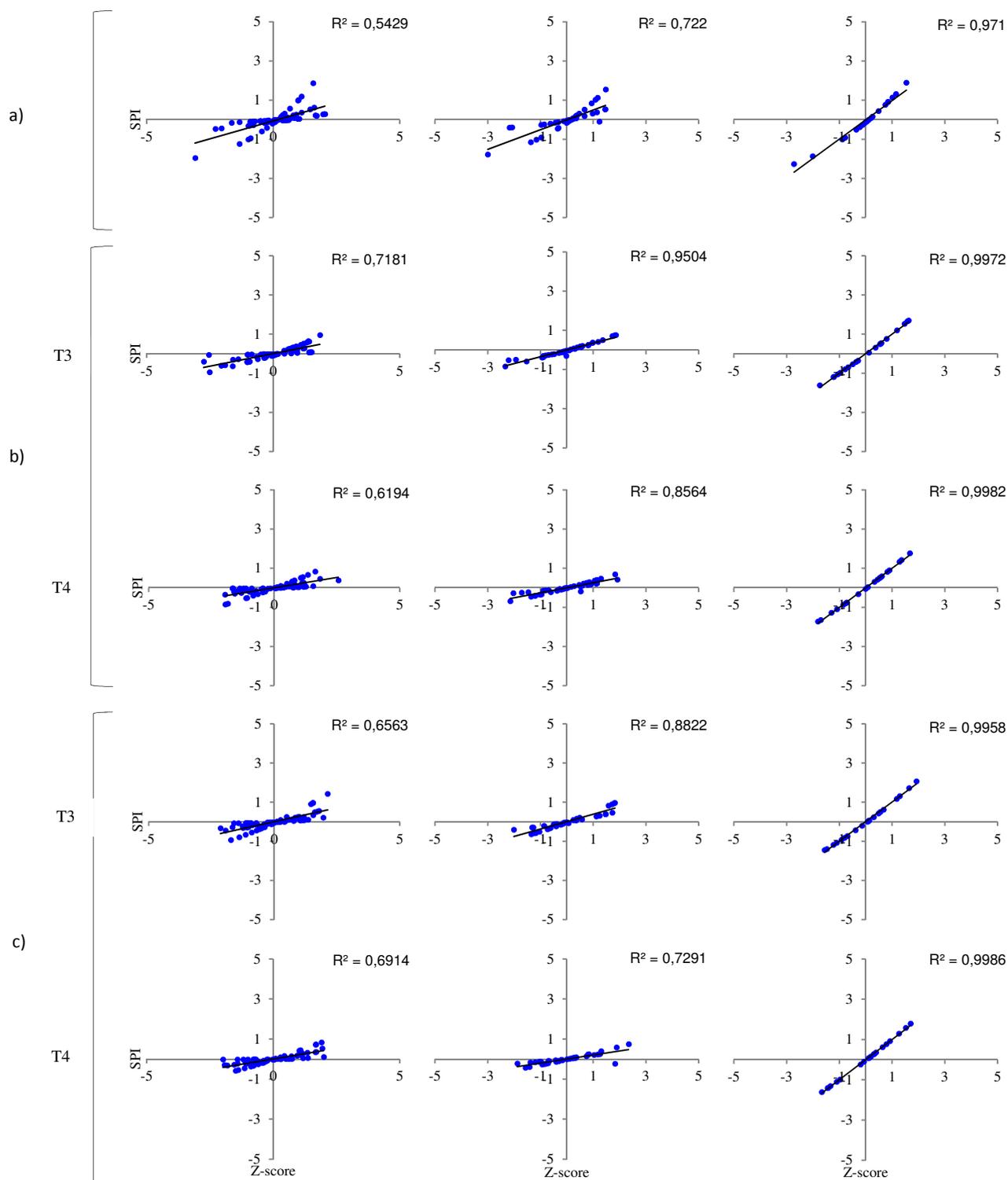


Figura 75: Diagramas de dispersión de SPI y Z score para la estación San Juan de Huirpачанча para 3, 6 y 12 meses (de izquierda a derecha); y el periodo a) presente (1980-1999), b) futuro cercano (2020-2039) y c) futuro lejano (2080-2099)