

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

**CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL Y
AMBIENTAL**



**UNIVERSIDAD NACIONAL
DE JAÉN**

**TENDENCIA DE PRECIPITACIÓN Y SEQUÍA
METEOROLÓGICA FUTURA EN LA CUENCA
CHINCHIPE UTILIZANDO MODELOS DE CIRCULACIÓN
GLOBAL**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
FORESTAL Y AMBIENTAL**

Autores: Bach. Sanderson Narcizo Campos Ruiz
Bach. Franciss Miguel Tapia Jiménez

Asesores: Mg. Candy Lisbeth Ocaña Zúñiga
Dr. Lenin Quiñones Huatangari

JAÉN – PERÚ, JUNIO 2022



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

Ley de Creación N° 29304

Universidad Licenciada con Resolución del Consejo Directivo N° 002-2018-SUNEDU/CD

FORMATO 03: ACTA DE SUSTENTACIÓN

El día 07 de julio del 2022; siendo las 09:31 horas, se reunieron mediante el aplicativo de videoconferencias Google Meet (enlace: meet.google.com/fsy-tcnm-vbn), establecido según RESOLUCIÓN DE VICEPRESIDENCIA DE INVESTIGACIÓN N° 330-2022-UNJ, los **miembros del Jurado Evaluador**:

Presidente Dr. Alexander Huamán Mera
Secretario Dr. Wilfredo Ruíz Camacho
Vocal Mg. Lenin Franchescoleth Núñez Pintado

Para evaluar la **Sustentación del Informe Final de:**

- () Trabajo de Investigación
(**X**) Tesis
() Trabajo de Suficiencia Profesional

Titulado: "TENDENCIA DE PRECIPITACIÓN Y SEQUÍA METEOROLÓGICA FUTURA EN LA CUENCA CHINCHIPE UTILIZANDO MODELOS DE CIRCULACIÓN GLOBAL"; **presentado por** los Bachilleres Sanderson Narcizo Campos Ruiz y Franciss Miguel Tapia Jiménez de la Escuela Profesional de Ingeniería Forestal y Ambiental de la Universidad Nacional de Jaén.

Después de la sustentación y defensa, **el Jurado Evaluador acuerda:**

- (**X**) Aprobar () Desaprobar (**X**) Unanimidad () Mayoría

Con la siguiente mención:

Excelente	18, 19, 20	()
Muy bueno	16, 17	(17)
Bueno	14, 15	()
Regular	13	()
Desaprobado	12 ó menos	()

Siendo las 10:22 horas del mismo día, el Jurado Evaluador concluye el acto de sustentación confirmando su participación con la suscripción de la presente.



Dr. Wilfredo Ruíz Camacho
Secretario



Dr. Alexander Huamán Mera
Presidente



Mg. Lenin Franchescoleth Núñez Pintado
Vocal

ÍNDICE

RESUMEN	XII
ABSTRACT	XIII
I. INTRODUCCIÓN	14
II. OBJETIVOS.....	17
2.1. Objetivo general.....	17
2.2. Objetivos específicos.....	17
III. MATERIAL Y MÉTODOS	18
3.1. Materiales	18
3.2. Ubicación y descripción del área de estudio.....	18
3.3. Población, muestra, muestreo.....	19
3.3.1. Población	19
3.3.2. Muestra	19
3.3.3. Muestreo	20
3.4. Fuentes de información	20
3.5. Métodos.....	20
3.6. Técnicas	20
3.7. Procedimientos.....	21
3.7.1. Recolección de datos de precipitación	22
3.7.2. Análisis exploratorio de datos (AED)	25
3.7.3. Análisis de estacionalidad, consistencia y homogeneidad de datos.....	25
3.7.4. Aplicación del método del vector regional (MVR).....	26
3.7.5. Downscaling estadístico.....	26
3.7.6. Uso de Indicadores estadísticos de ajuste	28
3.7.7. Determinación de tendencias.....	28
3.7.8. Determinación de sequía meteorológica futura.....	29
IV. RESULTADOS	31
4.1. Ajuste de escala de los GCMs en torno a las estaciones de la cuenca Chinchipe	31
4.1.1. Análisis exploratorio de datos (EDA)	31
4.1.2. Análisis de estacionalidad, consistencia y homogeneidad	34
4.1.3. Downscaling de la precipitación de los modelos de circulación global (GCM).....	38
4.1.4. GCMs con mayor ajuste respecto a la precipitación registrada.....	39
4.1.5. Escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5.....	43

4.2. Tendencia de precipitación futura bajo los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y 8.5.....	45
4.2.1. Tendencia.....	45
4.2.2. Variabilidad de la precipitación bajo los escenarios climáticos RCP 4.5 y RCP 8.5	52
4.3. Sequía meteorológica futura bajo los escenarios climáticos RCP 4.5 Y 8.5.....	52
V. DISCUSIÓN.....	56
5.1. Ajuste de escala de los GCMs en torno a las estaciones de la cuenca Chinchipe	56
5.1.1. Análisis exploratorio de datos (EDA)	56
5.1.2. Análisis estacionalidad, consistencia y homogeneidad	57
5.1.3. Downscaling de la precipitación de los modelos de circulación global (GCM) ..	58
5.1.4. GCMs con mayor ajuste respecto a la precipitación registrada.....	59
5.2. Tendencia de precipitación futura bajo los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y 8.5.....	60
5.2.1. Tendencia.....	60
5.2.2. Variabilidad de la precipitación bajo los escenarios climáticos RCP 4.5 y RCP 8.5	60
5.3. Sequía meteorológica futura bajo los escenarios climáticos RCP 4.5 Y 8.5.....	62
VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	63
6.1. Conclusiones	63
6.2. Recomendaciones	64
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	66
DEDICATORIA.....	71
AGRADECIMIENTO.....	72
ANEXOS.....	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.Lista y descripción de softwares.....	18
Tabla 2.Estaciones meteorológicas de la cuenca Chinchipe	23
Tabla 3.Modelos de Circulación Global utilizados	24
Tabla 4.Significancia del Test de Mann-Kendall	29
Tabla 5.Valores del Índice normalizado de precipitación	30
Tabla 6.Test estadísticos de tendencia.....	35
Tabla 7.Prueba T de Student.....	35
Tabla 8.Prueba F de Fisher	36
Tabla 9.Parámetros evaluados del Vector Regional.....	36
Tabla 10.Indicadores estadísticos de ajuste en torno estación meteorológica Chirinos	40
Tabla 11.Indicadores estadísticos de ajuste en torno estación meteorológica Tabaconas... 40	
Tabla 12.Indicadores estadísticos de ajuste en torno estación meteorológica Sondorillo... 41	
Tabla 13.Indicadores estadísticos de ajuste en torno estación meteorológica Hacienda Shumaya.....	42
Tabla 14.Indicadores estadísticos de ajuste en torno estación meteorológica Tuluze.....	42
Tabla 15.Tendencia de las estaciones meteorológicas bajo escenarios RCP 4.5 y 8.5	46
Tabla 16.Variabilidad porcentual de precipitación en futuro cercano y lejano.....	52
Tabla 17.SPI de estación meteorológica Chirinos.....	53
Tabla 18.SPI de estación meteorológica Tabaconas	53
Tabla 19.SPI de estación meteorológica Sondorillo.....	54
Tabla 20.SPI de estación meteorológica Hacienda Shumaya.....	55
Tabla 21.SPI de estación meteorológica Tuluze	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación de cuenca Chinchipe	19
Figura 2. Flujograma de la metodología desarrollada	22
Figura 3. Mapa de ubicación de estaciones meteorológicas en la cuenca Chinchipe	23
Figura 4. Flujograma de Quantile mapping.....	28
Figura 5. Régimen anual de precipitación registrada en las estaciones meteorológicas ..	32
Figura 6. Boxplot precipitación registrada en las estaciones meteorológicas	33
Figura 7. Histogramas de la precipitación registrada en las estaciones meteorológicas ..	34
Figura 8. Variabilidad de índices de estaciones y vector regional	37
Figura 9. Downscaling paramétrico del GCM HADGEM2-AO en torno estación Chirinos	38
Figura 10. Downscaling no paramétrico del GCM HADGEM2-AO en torno estación Chirinos	39
Figura 11. Downscaling escenarios de cambio climático RCP 4.5 y 8.5 en torno estación Chirinos	44
Figura 12. Línea de tendencia del futuro cercano y lejano de la estación Chirinos	47
Figura 13. Línea de tendencia del futuro cercano y lejano de la estación Tabaconas.....	48
Figura 14. Línea de tendencia del futuro cercano y lejano de la estación Sondorillo	49
Figura 15. Línea de tendencia del futuro cercano y lejano de la estación Hacienda Shumaya	50
Figura 16. Línea de tendencia del futuro cercano y lejano de la estación Tuluze.....	51

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1.Serie de tiempo de datos registrados estación meteorológica Tabaconas.....	74
Anexo 2.Serie de tiempo de datos registrados estación meteorológica Sondorillo.....	74
Anexo 3.Serie de tiempo de datos registrados estación meteorológica Hacienda Shumaya	75
Anexo 4.Serie de tiempo de datos registrados estación meteorológica Chirinos	75
Anexo 5.Serie de tiempo de datos registrados estación meteorológica Tuluce.....	76
Anexo 6.Distribución empírica de la precipitación registrada estación Tabaconas	76
Anexo 7.Distribución empírica de la precipitación registrada estación Sondorillo	77
Anexo 8.Distribución empírica de la precipitación registrada estación Hacienda Shumaya	77
Anexo 9.Distribución empírica de la precipitación registrada estación Chirinos	78
Anexo 10.Distribución empírica de la precipitación registrada estación Tuluce	78
Anexo 11.Downscaling no paramétrico de CCSM4 en torno estación Chirinos	79
Anexo 12.Downscaling paramétrico de CCSM4 en torno estación Chirinos	79
Anexo 13.Downscaling no paramétrico de HADGEM2 AO en torno estación Chirinos	80
Anexo 14.Downscaling paramétrico de HADGEM2 AO en torno estación Chirinos	80
Anexo 15.Downscaling no paramétrico de HADGEM2 CC en torno estación Chirinos	81
Anexo 16.Downscaling paramétrico de HADGEM2 CC en torno estación Chirinos.....	81
Anexo 17.Downscaling no paramétrico de HADGEM2 ES en torno estación Chirinos	82
Anexo 18.Downscaling paramétrico de HADGEM2 ES en torno estación Chirinos	82
Anexo 19.Downscaling no paramétrico de MIROC5 en torno estación Chirinos	83
Anexo 20.Downscaling paramétrico de MIROC5 en torno estación Chirinos	83
Anexo 21.Downscaling no paramétrico de MPI ESM LR en torno estación Chirinos	84
Anexo 22.Downscaling paramétrico de MPI ESM LR en torno estación Chirinos	84
Anexo 23.Downscaling no paramétrico de CCSM4 en torno estación Hacienda Shumaya	85
Anexo 24.Downscaling paramétrico de CCSM4 en torno estación Hacienda Shumaya	85
Anexo 25.Downscaling no paramétrico de HADGEM2 AO en torno estación Hacienda Shumaya	86
Anexo 26.Downscaling paramétrico de HADGEM2 AO en torno estación Hacienda Shumaya	86
Anexo 27.Downscaling no paramétrico de HADGEM2 CC en torno estación Hacienda Shumaya	87

Anexo 28.Downsaling paramétrico de HADGEM2 CC en torno estación Hacienda Shumaya	87
Anexo 29.Downsaling no paramétrico de HADGEM2 ES en torno estación Hacienda Shumaya	88
Anexo 30.Downsaling paramétrico de HADGEM2 ES en torno estación Hacienda Shumaya	88
Anexo 31.Downsaling no paramétrico de MIROC5 en torno estación Hacienda Shumaya	89
Anexo 32.Downsaling paramétrico de MIROC5 en torno estación Hacienda Shumaya	89
Anexo 33.Downsaling no paramétrico de MPI ESM LR en torno estación Hacienda Shumaya	90
Anexo 34.Downsaling paramétrico de MPI ESM LR en torno estación Hacienda Shumaya	90
Anexo 35.Downsaling no paramétrico de CCSM4 en torno estación Sondorillo	91
Anexo 36.Downsaling paramétrico de CCSM4 en torno estación Sondorillo	91
Anexo 37.Downsaling no paramétrico de HADGEM2 AO en torno estación Sondorillo	92
Anexo 38.Downsaling paramétrico de HADGEM2 AO en torno estación Sondorillo	92
Anexo 39.Downsaling no paramétrico de HADGEM2 CC en torno estación Sondorillo	93
Anexo 40.Downsaling paramétrico de HADGEM2 CC en torno estación Sondorillo	93
Anexo 41.Downsaling no paramétrico de HADGEM2 ES en torno estación Sondorillo	94
Anexo 42.Downsaling paramétrico de HADGEM2 ES en torno estación Sondorillo	94
Anexo 43.Downsaling no paramétrico de MIROC5 en torno estación Sondorillo	95
Anexo 44.Downsaling paramétrico de MIROC5 en torno estación Sondorillo	95
Anexo 45.Downsaling no paramétrico MPI ESM LR en torno estación Sondorillo	96
Anexo 46.Downsaling paramétrico de MPI ESM LR en torno estación Sondorillo	96
Anexo 47.Downsaling no paramétrico de CCSM4 en torno estación Tabaconas	97
Anexo 48.Downsaling paramétrico de CCSM4 en torno estación Tabaconas	97

Anexo 49.Downsaling no paramétrico de HADGEM2 AO en torno estación Tabaconas	98
.....	
Anexo 50.Downsaling paramétrico de HADGEM2 AO en torno estación Tabaconas	98
.....	
Anexo 51.Downsaling no paramétrico de HADGEM2 CC en torno estación Tabaconas	99
.....	
Anexo 52.Downsaling paramétrico de HADGEM2 CC en torno estación Tabaconas	99
.....	
Anexo 53.Downsaling no paramétrico de HADGEM2 ES en torno estación Tabaconas	100
.....	
0	
Anexo 54.Downsaling paramétrico de HADGEM2 ES en torno estación Tabaconas	100
.....	
0	
Anexo 55.Downsaling no paramétrico de MIROC5 en torno estación Tabaconas	101
.....	
Anexo 56.Downsaling paramétrico de MIROC5 en torno estación Tabaconas	101
.....	
Anexo 57.Downsaling no paramétrico de MPI ESM LR en torno estación Tabaconas	102
.....	
Anexo 58.Downsaling paramétrico de MPI ESM LR en torno estación Tabaconas	102
.....	
Anexo 59.Downsaling no paramétrico de CCSM4 en torno estación Tuluca	103
.....	
Anexo 60.Downsaling paramétrico de CCSM4 en torno estación Tuluca	103
.....	
Anexo 61.Downsaling no paramétrico de HADGEM2 AO en torno estación Tuluca	104
.....	
Anexo 62.Downsaling paramétrico de HADGEM2 AO en torno estación Tuluca	104
.....	
Anexo 63.Downsaling no paramétrico de HADGEM2 CC en torno estación Tuluca	105
.....	
Anexo 64.Downsaling paramétrico de HADGEM2 CC en torno estación Tuluca	105
.....	
Anexo 65.Downsaling no paramétrico de HADGEM2 ES en torno estación Tuluca	106
.....	
Anexo 66.Downsaling paramétrico de HADGEM2 ES en torno estación Tuluca	106
.....	
Anexo 67.Downsaling no paramétrico de MIROC5 en torno estación Tuluca	107
.....	

Anexo 68.Downscaling paramétrico de MIROC5 en torno estación Tuluce	107
Anexo 69.Downscaling no paramétrico de MPI ESM LR en torno estación Tuluce	108
Anexo 70.Downscaling paramétrico de MPI ESM LR en torno estación Tuluce	108
Anexo 71.Downscaling de escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5 en torno estación Chirinos	109
Anexo 72.Downscaling de escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5 en torno estación Tabaconas	110
Anexo 73.Downscaling de escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5 en torno estación Sondorillo	111
Anexo 74.Downscaling de escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5 en torno estación Hacienda Shumaya	112
Anexo 75.Downscaling de escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5 en torno estación Tuluce	113
Anexo 76.Variabilidad de la precipitación bajo escenarios de cambio climático en estación Chirinos	114
Anexo 77.Variabilidad de la precipitación bajo escenarios de cambio climático en estación Tabaconas	115
Anexo 78.Variabilidad de la precipitación bajo escenarios de cambio climático en estación Sondorillo	116
Anexo 79.Variabilidad de la precipitación bajo escenarios de cambio climático en estación Tabaconas	117
Anexo 80.Variabilidad de la precipitación bajo escenarios de cambio climático en estación Tuluce	118
Anexo 81.Serie de tiempo de SPI bajo escenario de cambio climático RCP 4.5 en estación Chirinos	119
Anexo 82.Serie de tiempo de SPI bajo escenario de cambio climático RCP 8.5 en estación Chirinos	120
Anexo 83.Serie de tiempo de SPI bajo escenario de cambio climático RCP 4.5 en estación Tabaconas	121
Anexo 84.Serie de tiempo de SPI bajo escenario de cambio climático RCP 8.5 en estación Tabaconas	122
Anexo 85.Serie de tiempo de SPI bajo escenario de cambio climático RCP 4.5 en estación Sondorillo	123
Anexo 86.Serie de tiempo de SPI bajo escenario de cambio climático RCP 8.5 en estación Sondorillo	124

Anexo 87.Serie de tiempo de SPI bajo escenario de cambio climático RCP 4.5 en estación Hacienda Shumaya	125
Anexo 88.Serie de tiempo de SPI bajo escenario de cambio climático RCP 8.5 en estación Hacienda Shumaya	126
Anexo 89.Serie de tiempo de SPI bajo escenario de cambio climático RCP 4.5 en estación Tuluce	127
Anexo 90.Serie de tiempo de SPI bajo escenario de cambio climático RCP 8.5 en estación Tuluce	128

RESUMEN

La variabilidad en el patrón de las precipitaciones, asociada al cambio climático, afecta la disponibilidad de recursos hídricos. El objetivo de este estudio fue determinar la tendencia de precipitación y sequía meteorológica futura en la cuenca Chinchipe, para ello se realizó el downscaling estadístico (DE) de 6 modelos de circulación global (GCMs) en torno a 5 estaciones meteorológicas de la cuenca. El DE se basó en la técnica Quantile mapping bajo métodos paramétricos y no paramétricos. Se generaron escenarios de cambio climático, utilizando las trayectorias de concentración representativas (RCP), para el futuro cercano (2030 – 2059) y lejano (2070 – 2099). La tendencia se determinó mediante el test Mann-Kendal y el modelo de regresión lineal, y para sequía se utilizó el índice de precipitación estandarizada (SPI). Los resultados indican que los GCMs con DE no paramétrico representan mejor los datos de precipitación registrada en las estaciones. Asimismo, el escenario RCP 4.5 proyecta tendencias decrecientes de precipitación que se estabilizarán en el futuro lejano. Por el contrario, bajo el escenario RCP 8.5 la tendencia decreciente se mantendrá en el futuro cercano y lejano. Por último, ambos escenarios proyectan la ocurrencia de eventos de sequía de intensidad extrema y severa en el futuro cercano y lejano.

Palabras clave: Downscaling estadístico, Quantile mapping, escenarios de cambio climático, índice de sequía estandarizada.

ABSTRACT

The variability in the rainfall pattern, associated with climate change, affects the availability of water resources. The objective of this study was to determine the future meteorological precipitation and drought trend in the Chinchipe basin, for which the statistical downscaling (DE) of 6 global circulation models (GCMs) was carried out around 5 meteorological stations in the basin. The DE was based on the Quantile mapping technique under parametric and non-parametric methods. Climate change scenarios were generated, using the representative concentration trajectories (RCP), for the near (2030 – 2059) and distant (2070 – 2099) future. The trend was determined using the Mann-Kendal test and the linear regression model, and for drought the standardized precipitation index (SPI) was used. The results indicate that the GCMs with non-parametric DE better represent the precipitation data recorded at the stations. Likewise, the RCP 4.5 scenario projects decreasing precipitation trends that will stabilize in the distant future. On the contrary, under the RCP 8.5 scenario, the downward trend will continue in the near and distant future. Finally, both scenarios project the occurrence of drought events of extreme and severe intensity in the near and distant future.

Keywords: Statistical downscaling, Quantile mapping, climate change scenarios, standardized drought index.

I. INTRODUCCIÓN

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático (IPCC) mencionan que el cambio climático supone una alteración sistemática en las propiedades estadísticas del sistema climático, siendo la actividad humana la principal causa de estas variaciones que repercuten sobre los recursos energético, la producción de alimentos y las reservas de agua del mundo (OMM, 2018; IPCC, 2013).

Para la comprensión del clima, el IPCC utiliza modelos de circulación global (GCMs), estas herramientas tienen la capacidad de representar matemáticamente las propiedades físicas, químicas y biológicas de los componentes del sistema climático (atmósfera, océano, criósfera, geosfera y biosfera), utilizando una rejilla tridimensional sobre la tierra con una resolución espacial mayor a los 100 km, (Florian et al, 2021; IPCC, 2018; Moya et al, 2015).

Los GCMs nos permiten evaluar la evolución del sistema climático bajo diferentes escenarios de cambio climático, la quinta fase del proyecto de comparación de modelos acoplados (CMIP5) del IPCC utiliza un nuevo conjunto de escenarios: las trayectorias de concentración representativas (RCP). Estos escenarios se caracterizan por su forzamiento radiativo total para el año 2100 que oscila entre 2,6 y 8,5 W/m². Los cuatro escenarios RCP comprenden un escenario de mitigación RCP 2.6 que alcanza un nivel de forzamiento muy bajo; dos escenarios de estabilización (RCP 4.5 y RCP 6.0), y el escenario RCP 8.5 que alcanza un nivel alto de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (IPCC, 2013).

Cuando se evalúa el impacto del cambio climático proyectado sobre la base de las trayectorias de concentración representativas (RCP) en una cuenca o región, los GCMs resultan insuficientes debido a su limitada resolución espacial, la cual genera una

elevada incertidumbre o sesgo respecto a los datos registrados en las estaciones meteorológicas, dificultando el modelamiento del comportamiento de variables climáticas locales. De esta manera surge la necesidad de emplear métodos de reducción de escala (downscaling) que nos ayuden a mejorar la resolución espacial de los GCMs a escala local, para obtener como resultado modelos climáticos regionales o locales que tengan en cuenta las características fisiográficas de una determinada región o cuenca que se quiera estudiar y comprender de esta manera los impactos regionales y locales del cambio climático (Florian et al, 2021).

Las técnicas de downscaling se pueden clasificar en dos grandes categorías: downscaling dinámico (DD) y estadístico (DE). El DD se basa en anidar un modelo climático regional (RCM) en un GCM, logrando tomar las condiciones iniciales y de contorno del GCM, obteniendo como resultado resoluciones más detalladas de una región o zona en particular, estas técnicas requieren un alto costo computacional (Astorayme, 2017; Córdova, 2015). Por el contrario, el DE relaciona de forma empírica las variables climáticas globales (predictores) dadas por los GCMs con las variables locales observadas en estaciones meteorológicas (predictandos, típicamente temperatura y precipitación). Estos modelos se ajustan utilizando datos del clima presente y son posteriormente aplicados para proyectar localmente las simulaciones futuras de los GCMs, con costes bajo de cómputo (Wilby et al., 2004).

En la región Cajamarca la cuenca Chinchipe constituye un importante espacio para la conservación de la biodiversidad de flora y fauna silvestre amenazada, como el romerillo, oso de anteojos y tapir de altura. Además, integra el Santuario nacional Tabaconas Namballe, en cuya área se encuentra una muestra representativa del páramo y bosques de neblina. También en la cuenca se desarrollan importantes actividades económicas agropecuarias, básicamente ganadería vacuna y cultivo del café, y en menor medida cultivos de arroz, caña y maíz. El café constituye el cultivo de mayor importancia productiva y económica para los pobladores (Llerena et al., 2010).

Las proyecciones del cambio climático en cuencas, regiones o ecosistemas locales, a partir de los datos proporcionados por los GCMs, son herramientas importantes en la planeación de estrategias para el cuidado y el aprovechamiento de los recursos naturales (Madrigal et al., 2017). Teniendo en cuenta que el impacto del cambio climático en los

recursos hídricos y la producción de cultivos en una cuenca se asocia con el comportamiento de la precipitación (Vicente, 2015), surge la necesidad de evaluar el comportamiento futuro de las precipitaciones (tendencia, variabilidad, sequías meteorológicas, etc) bajo los distintos escenarios de cambio climático del proyecto CMIP5.

La investigación tuvo por finalidad determinar la tendencia de precipitación y sequía meteorológica futura en la cuenca Chinchipe, bajo los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5 para los periodos futuro cercano (2030 – 2059) y futuro lejano (2070 – 2099). De esta manera, al conocer la tendencia de precipitación y valorar la intensidad de futuras sequías meteorológicas, se obtendrá información que puede ser utilizada para estudiar posibles impactos en las actividades socioeconómicas en la cuenca, como también adoptar estrategias en la gestión de los recursos hídricos, reducción de riesgo de desastres, protección de la salud humana, producción de alimentos, actividades turísticas y de transporte.

II. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Determinar la tendencia y sequía meteorológica futura en la cuenca Chinchipe utilizando modelos de circulación global (GCMs).

2.2. Objetivos específicos

Ajustar la escala de los modelos de circulación global (GCMs) en torno a las estaciones de la cuenca Chinchipe.

Determinar la tendencia de precipitación en la cuenca Chinchipe bajo los escenarios climáticos con trayectoria de concentración representativas (RCP) 4.5 y 8.5 para los periodos 2030 – 2059 y 2070 – 2099.

Evaluar la sequía meteorológica futura para los periodos 2030 – 2059 y 2070 – 2099 en la cuenca Chinchipe, mediante el índice de precipitación estandarizada (SPI) bajo los escenarios climáticos RCP 4.5 y RCP 8.5.

III. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1. Materiales

Se utilizaron los softwares (ver Tabla 1):

Tabla 1.

Lista y descripción de softwares

Software	Descripción
R	Lenguaje de programación que permitió realizar análisis estadístico y el downscaling estadístico.
Qgis	Programa utilizado para la generación de mapas referentes a la cuenca a estudiada.
Hydracces	Programa que permitió aplicar el método del Vector Regional.
SPI_L_6	Programa utilizado para el cálculo de Índice de precipitación estandarizada.
Trend	Programa que permitió aplicar las pruebas estadísticas de tendencia.
Excel	Hoja de cálculo que sirvió para el procesamiento de los datos de precipitación.

3.2. Ubicación y descripción del área de estudio

La cuenca Chinchipe se encuentra ubicada en la zona norte del departamento de Cajamarca, cuenta con una extensión de 6 539 km², abarcando en su totalidad la provincia de San Ignacio y la parte norte de la provincia de Jaén. La cuenca es atravesada por el río Chinchipe, este es alimentado por los ríos Chirinos y Tabaconas para unirse finalmente al río Marañón.

Según Llerena et al (2010) la cuenca tiene una altitud que varía entre los 500 y 3800 metros sobre el nivel del mar (msnm), aproximadamente el 50 % del territorio de la cuenca alcanza altitudes del rango de los 1200 – 2000 msnm. La precipitación total anual (mm/año) se encuentra entre los 800 – 2000 mm/año. La temperatura media mensual de la cuenca alcanza registros dentro del rango de los 22° – 25° C, la temperatura mínima es de 16° C y la temperatura máxima alcanza los 32° C.

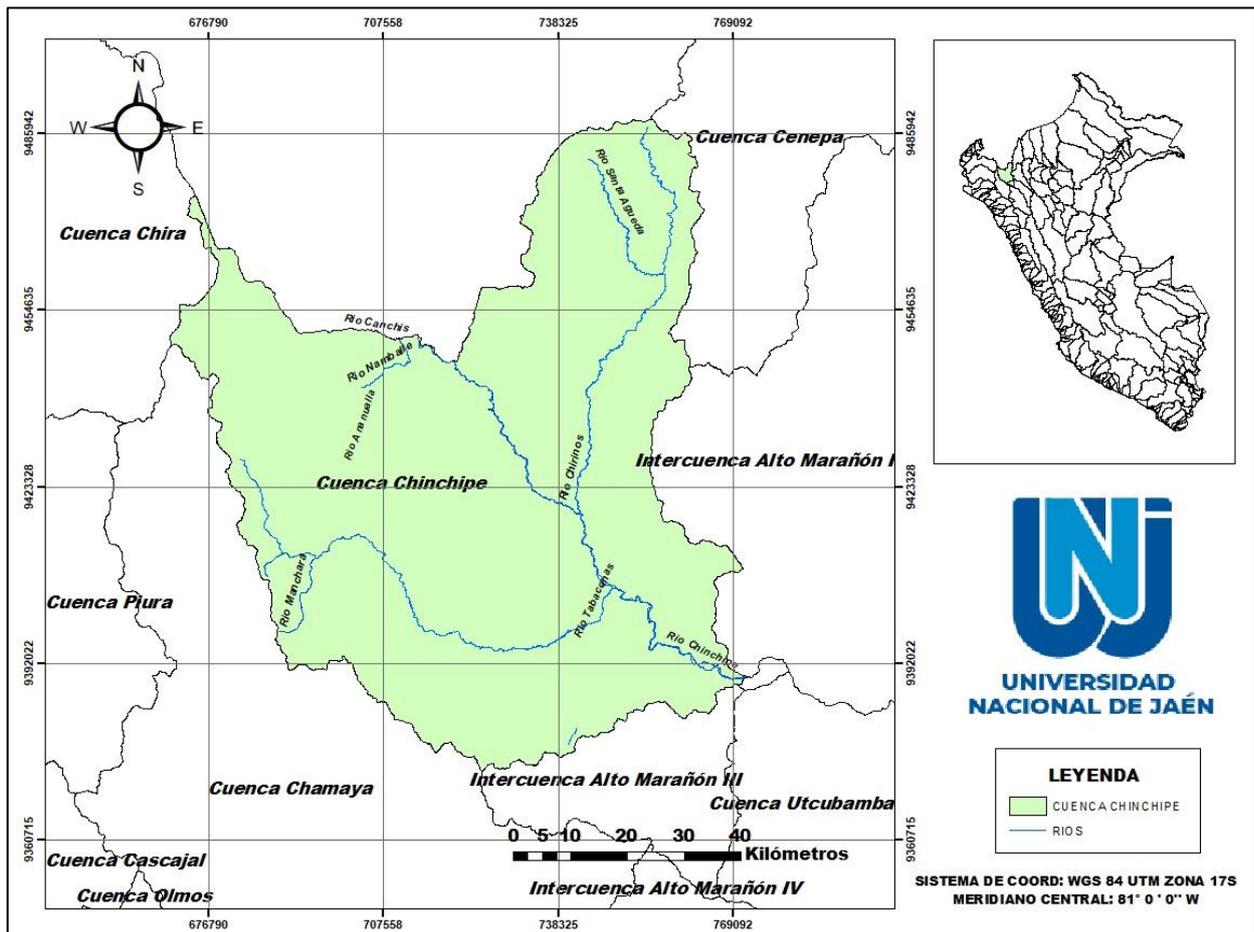


Figura 1. Mapa de ubicación de cuenca Chinchipe

3.3. Población, muestra, muestreo

3.3.1. Población

Estuvo conformada por los datos de precipitación obtenidos de las 5 estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca Chinchipe (Chirinos, Tabaconas, Hacienda Shumaya, Sondorillo y Tuluze) de un periodo de 43 años (1970-2013).

3.3.2. Muestra

Constituida por la precipitación registrada en las estaciones meteorológicas de la cuenca Chinchipe, para el periodo consecutivo 1992 – 2013.

3.3.3. Muestreo

Se realizó un muestreo del tipo no probabilístico, debido a que los datos se recogieron en un proceso que no brindó a todos los individuos de la población iguales oportunidades de ser seleccionados, en este caso el punto de referencia fue que las estaciones seleccionadas debían tener como mínimo 20 años consecutivos de datos de precipitación y estos datos cumplir con las condiciones que establece el análisis de consistencia (consistencia de la media y desviación estándar).

3.4. Fuentes de información

La información que se utilizó procedió de fuentes secundarias, constituida por las bases de datos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), estos contienen datos de precipitación de las estaciones meteorológicas de la red de SENAMHI que se encuentran en la cuenca Chinchipe.

3.5. Métodos

Esta investigación desarrolló el método deductivo, porque partió de información general constituida por los registros históricos de precipitación obtenida de Estaciones meteorológicas (precipitación registrada) y de predictores como los Modelos de circulación global (precipitación modelada) que permitieron llegar a una conclusión específica respecto a la tendencia de la precipitación y presencia de sequías meteorológicas en la cuenca Chinchipe.

3.6. Técnicas

a) Técnica documental:

Para la obtención de datos se utilizó la técnica de documentos y registros, esta técnica consistió en examinar los datos presentes en documentos ya existentes, como bases de datos, actas, informes, registros de asistencia, etc.

b) Técnicas estadísticas:

Para el análisis de los datos en esta investigación se utilizaron las siguientes técnicas estadísticas:

- ✓ Prueba T de Student y F de Fisher para comprobar la consistencia y homogeneidad la precipitación registrada por las estaciones meteorológicas.
- ✓ Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe, error cuadrático medio, coeficiente de correlación y coeficiente de determinación para comprobar el nivel de ajuste logrado por parte de la precipitación modelada una vez aplicado el downscaling estadístico.
- ✓ Test estadísticos de Mann-Kendall y Regresión lineal para determinar la existencia de tendencias en las series RCP 4.5 y RCP 8.5.

3.7. Procedimientos

Con finalidad de cumplir los objetivos propuestos la investigación desarrolló el procedimiento metodológico de la Figura 2. Se puede apreciar en el flujograma que los datos de entrada, están constituidos por las precipitaciones de las estaciones meteorológicas seleccionadas, así como también por las precipitaciones modeladas por los GCMs. Mientras que los datos de salida están conformados por los resultados de tendencia y los episodios de sequía futura.

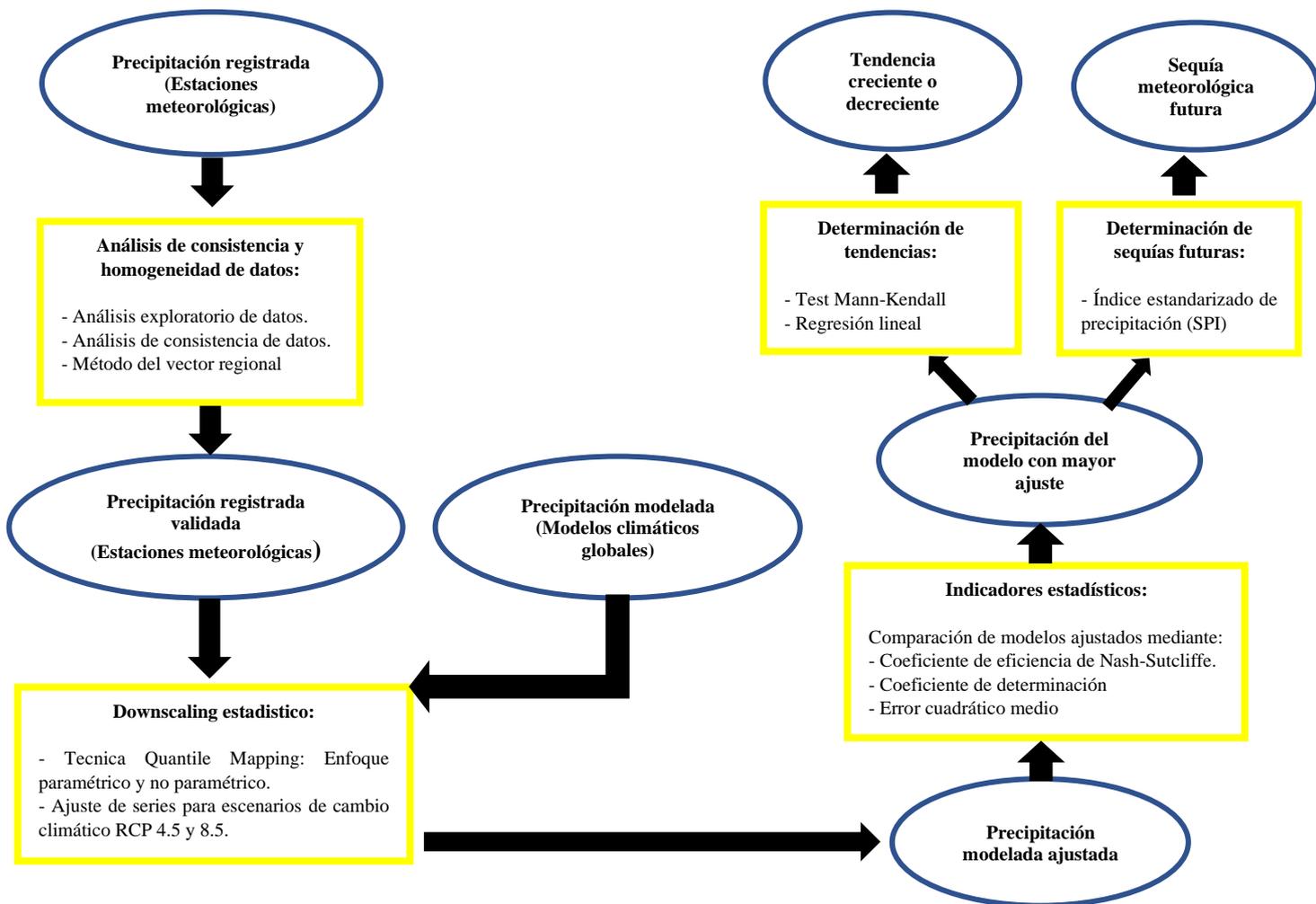


Figura 2. *Flujograma de la metodología desarrollada*

3.7.1. Recolección de datos de precipitación

a) Precipitación registrada:

Se recolectaron los registros históricos mensuales de precipitación correspondiente a 5 estaciones meteorológicas ubicadas dentro y próximas a la cuenca Chinchipe. Estas estaciones pertenecen al SENAMHI y se utilizaron los datos del periodo 1992 – 2013. La Tabla 2 muestra el nombre de cada estación, el tipo, las coordenadas UTM y la altitud a la que se encuentran.

Tabla 2.

Estaciones meteorológicas de la cuenca Chinchipe

Nº	Nombre	Tipo	Norte (UTM)	Este (UTM)	Altitud (msnm)
1	Chirinos	Convencional- Meteorológica	733000,70	9412839,10	1772
2	Tabaconas	Convencional- Meteorológica	690061,10	9412178,60	1892
3	Hacienda Shumaya	Convencional- Meteorológica	681654,80	9404995,00	1991
4	Sondorillo	Convencional- Meteorológica	673818,30	9409553,70	1917
5	Tuluze	Convencional- Meteorológica	683081,90	9394337,00	2209

En la figura 2 se puede observar la ubicación espacial de las estaciones meteorológicas. De esta manera se tiene que las estaciones Tabaconas y Chirinos se encuentran dentro de la cuenca mientras que las estaciones Sondorillo, Hacienda Shumaya y Tuluze se ubican próximas a ella.

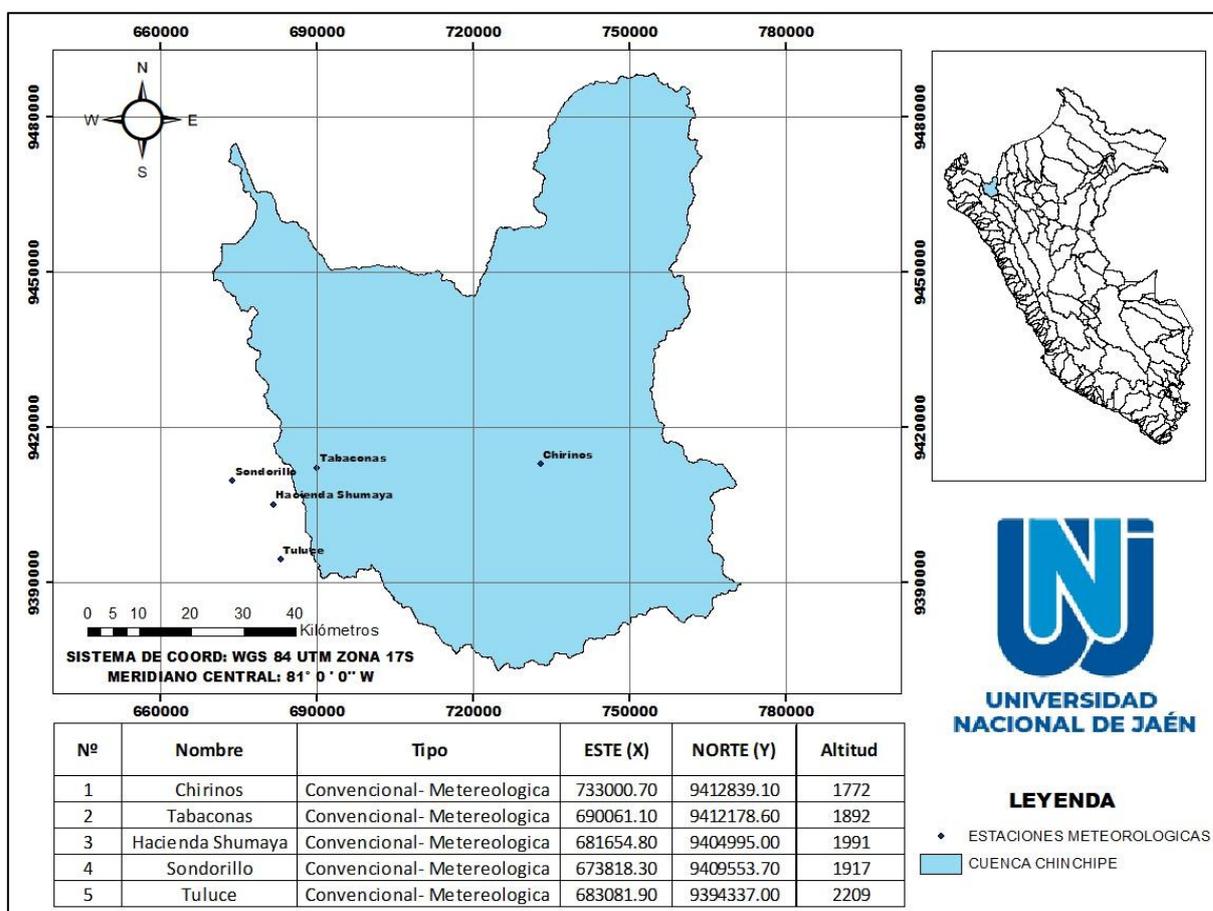


Figura 3. Mapa de ubicación de estaciones meteorológicas en la cuenca Chinchipe

b) Precipitación modelada:

La selección de los Modelos de Circulación global (MCGs) se realizó a partir del inventario del proyecto CMIP5, filtrando los modelos que mejor modulan el clima de Sudamérica, entre estos según Acuña et al. (2019) se encuentran: CCSM4, HadGem2-AO, HadGem2-ES y MPI-ESM-LR. También se tomaron en cuenta otros modelos que se han utilizado en diferentes trabajos de investigación.

La Tabla 3 muestra la institución que desarrollo cada uno de los GCMs, así como también su resolución atmosférica. A partir de los modelos se seleccionaron datos históricos de precipitación modelada para el periodo 1992 – 2013 como también datos proyectados al futuro cercano (2030 – 2059) y futuro lejano (2070 – 2099) de los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5. Se emplearon los términos futuro cercano y lejano tal y como lo realizaron Segovia (2016) y Córdova (2015) en sus trabajos de investigación para periodos de entre 20 y 30 años.

Tabla 3.
Modelos de Circulación Global utilizados

Nº	Modelos	Institución	Resolución atmosférica (longitud x latitud)
1	CCSM4	National center for Atmospheric Research (NCAR-USA)	1,25 x 0,942408
2	HadGem2-AO	National Institute of Meteorological Research/Korea Meteorological Administration (Corea)	1,875 x 1,25
3	HadGem2-ES	Met Office Hadley Centre (Reino Unido)	1,875 x 1,25
4	HadGem2-CC	Met Office Hadley Center	1,88 x 1,24
5	MPI-ESM-LR	Max Plank Institute for Meteorology (Alemania)	1,875 x 1,8496
6	MIROC5	National Institute For Environmental Studies and Japan Agency for Marine- Earth Science and Technology, Japón	1,406 x 1,39

3.7.2. Análisis exploratorio de datos (AED)

Se aplicó el AED a la precipitación registrada con la finalidad de maximizar el entendimiento de los datos, al describir su comportamiento, distribución y detectar valores atípicos. Las técnicas que se utilizaron se desarrollaron en el programa R y son las siguientes:

- ✓ Gráficos de series temporales: herramientas que nos permitió visualizar el comportamiento de datos a lo largo del tiempo.
- ✓ Boxplots: resumió la distribución de los datos mostrándonos la posición de sus cuartiles y de los valores atípicos (outliers).
- ✓ Histogramas: permitieron tener una representación gráfica de la distribución de frecuencias.
- ✓ Gráficos de probabilidad normal: permitieron visualizar y determinar si un conjunto de datos numéricos proviene o no de una distribución normal.

3.7.3. Análisis de estacionalidad, consistencia y homogeneidad de datos

Se buscó detectar si existe tendencia e inconsistencia en la media o en la desviación estándar en la precipitación registrada de las estaciones seleccionadas. La evaluación se realizó en el programa Excel, de la siguiente manera:

- a) La precipitación registrada de cada estación meteorológica se dividió en 2 submuestras (N1 y N2).
- b) Se realizó la prueba T de Student para evaluar si los valores medios de las submuestras (N1 y N2) son estadísticamente iguales o diferentes.
- c) Posteriormente se realizó la prueba F de Fisher para evaluar si los valores de las desviaciones estándar de las submuestras (N1 y N2) son estadísticamente iguales o diferentes.

- d) Por último, en los casos en que los parámetros media y desviación estándar de las submuestras (N1 y N2) resultan estadísticamente iguales, la información original no se corrigió, por ser consistente con un nivel de significancia del 0.05.

Aquellas estaciones meteorológicas que presentaron tendencias estadísticamente significativas e inconsistencia estadística significativa en sus medias y desviaciones estándar fueron corregidas utilizando el método empleado por Villon (2006), con la finalidad de cumplir con los requisitos de estacionalidad, consistencia y homogeneidad requeridos para realizar proyecciones climáticas (OMM, 2018).

3.7.4. Aplicación del método del vector regional (MVR)

El MVR permitió determinar si las estaciones pertenecen a una misma zona climática bajo un mismo régimen de precipitación, esto se logró al comparar el comportamiento de la precipitación registrada de las estaciones meteorológicas con una estación ficticia llamada vector, para el cálculo de esta estación vector se utilizó el concepto de precipitación media extendida al periodo de trabajo (Espinoza, 2005). El proceso de este método se llevó a cabo en el programa Hydraccess, La evaluación se realizó teniendo en cuenta los parámetros de desviación estándar de los desvíos (D.E.D) y la correlación (R) entre estaciones y el vector regional.

3.7.5. Downscaling estadístico

Después que se comprobó la estacionalidad, consistencia y homogeneidad de la precipitación registrada de las estaciones meteorológicas, se procedió a realizar la reducción de escala de los GCMs con la técnica Quantile mapping en el programa R Studio, en el siguiente orden:

- a) Primero se descargó e inició el Package ‘qmap’.
- b) Luego se generaron Scripts a partir de la información proporcionada por Gudmundsson (2016), en el que establece ajustes empíricos de variables climáticas globales utilizando mapeo de cuantiles.

- c) Después los Scripts se ajustaron a enfoque paramétrico y enfoque no paramétricos.
- d) A continuación, se ingresó la precipitación registrada y la precipitación modelada.
Precipitación registrada: periodo 1992 – 2013
Precipitación modelada: histórico (1992 – 2013), RCP 4.5 (al 2100) y RCP 8.5 (al 2100)
- e) Posteriormente al ejecutar el Script, este encontró una función H que ajuste la distribución de la precipitación modelada histórica (1992 – 2013) a distribución de la precipitación registrada (1992 – 2013).
- f) Después esta función H se utilizó para ajustar la precipitación modelada histórica (1992 – 2013), como también la precipitación modelada de los escenarios de cambio climáticos RCP 4.5 y RCP 8.5 al 2100.
- g) Al finalizar se obtuvo 3 archivos de datos para cada estación meteorológica por cada modelo utilizado: precipitación modelada histórica (1992 – 2013) ajustado, precipitación modelada RCP 4.5 ajustado y RCP 8.5 ajustado.

La Figura 4 muestra de manera resumida la secuencia de procesos de Quantile mapping, que tiene como datos de entrada a las precipitaciones registradas y modeladas y como datos de salida a las precipitaciones ajustadas.

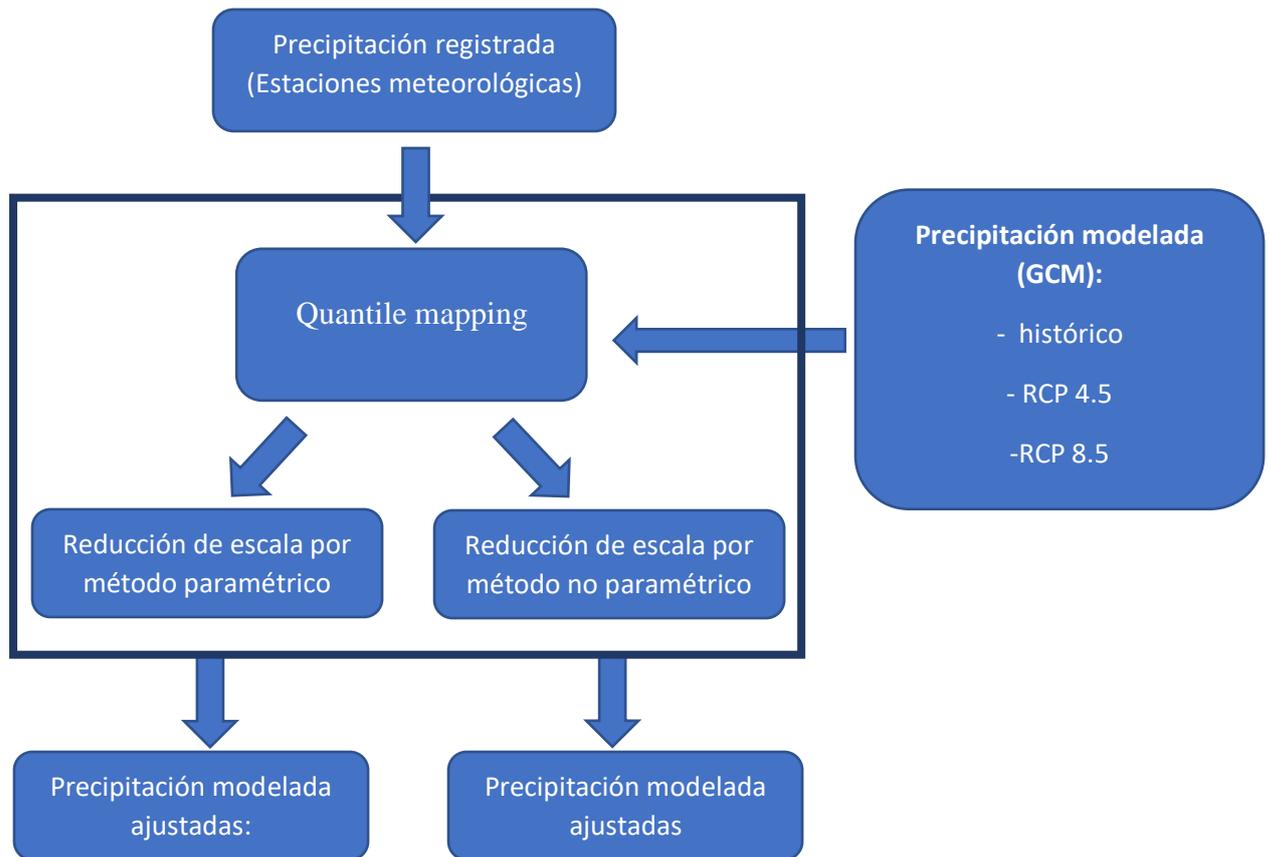


Figura 4. *Flujograma de Quantile mapping*

3.7.6. Uso de Indicadores estadísticos de ajuste

Antes de realizar el análisis de tendencia y de sequía meteorológica con los resultados de Quantile mapping, se eligió los modelos que lograron un mayor ajuste con la precipitación registrada de las estaciones meteorológicas. Para lograr esto, se utilizaron los indicadores estadísticos: coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe, error cuadrático medio, coeficiente de correlación de Pearson y coeficiente de determinación en el programa Excel. La precipitación modelada histórica ajustada de cada GCM que alcanzó los mejores valores en los indicadores, fue aquella que logró el mayor ajuste y por tanto tiene la capacidad de reproducir de mejor manera la precipitación registrada.

3.7.7. Determinación de tendencias

Con los modelos que lograron el mayor ajuste respecto a la precipitación registrada, se realizó el análisis de tendencia de la precipitación modelada

bajo los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5 para los periodos futuro cercano (2030 – 2059) y lejano (2070 – 2099) en la cuenca Chinchipe. El análisis de tendencia se realizó en el programa Trend con nivel de significancia del 0.05 para las pruebas estadísticas de tendencia de Test Mann-Kendall (Tabla 4) y el modelo de regresión lineal.

Tabla 4.
Significancia del Test de Mann-Kendall

Significancia ($\alpha = 0.05$)	Simbología	Z
Sin tendencia	ST	0
Tendencia significativa creciente	TSC	> +1,96
Tendencia significativa decreciente	TSD	< -1,96
Tendencia no significativa creciente	TNSC	< +1,96
Tendencia no significativa decreciente	TNSD	> -1,96

Fuente: Alves et al., 2015

3.7.8. Determinación de sequía meteorológica futura

Para finalizar se procedió a determinar los periodos de sequía futuros de la precipitación modelada bajo los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5 en la cuenca Chinchipe. Para esto se utilizó el índice de precipitación estandarizada (SPI) a través del programa SPI_L_6.

Para el cálculo del SPI se tuvo en cuenta la probabilidad de precipitación para cualquier escala temporal, mediante el sistema de clasificación de valores de la Tabla 5 utilizado por McKee et al (1993, citado en OMM, 2012). Los periodos de sequía tienen lugar siempre que el SPI sea continuamente negativo y alcance una intensidad de -1,0 o inferior. El periodo de sequía finaliza cuando el SPI alcanza valores positivos.

Tabla 5.*Valores del Índice normalizado de precipitación*

Índice	Intensidad
2,0 y más	extremadamente húmedo
1,5 a 1,99	muy húmedo
1,0 a 1,49	moderadamente húmedo
-0,99 a 0,99	normal o aproximadamente normal
-1,0 a -1,49	moderadamente seco
-1,5 a -1,99	severamente seco
-2 y menos	extremadamente seco

Fuente: (OMM, 2012)

IV. RESULTADOS

4.1. Ajuste de escala de los GCMs en torno a las estaciones de la cuenca Chinchipe

4.1.1. Análisis exploratorio de datos (EDA)

✓ Régimen anual de la precipitación registrada

La Figura 5 describe el comportamiento promedio mensual multianual de la precipitación registrada en las 5 estaciones meteorológica. Se observa un periodo de mayor precipitación que inicia en diciembre y termina en abril, un periodo seco en los meses de junio hasta septiembre, por último, un periodo de transición que corresponde a los meses de mayo, octubre y noviembre. Los valores máximos de precipitación se registran en los meses de febrero, marzo y abril, por el contrario, los niveles mínimos de precipitación corresponden a los meses de julio, agosto y septiembre.

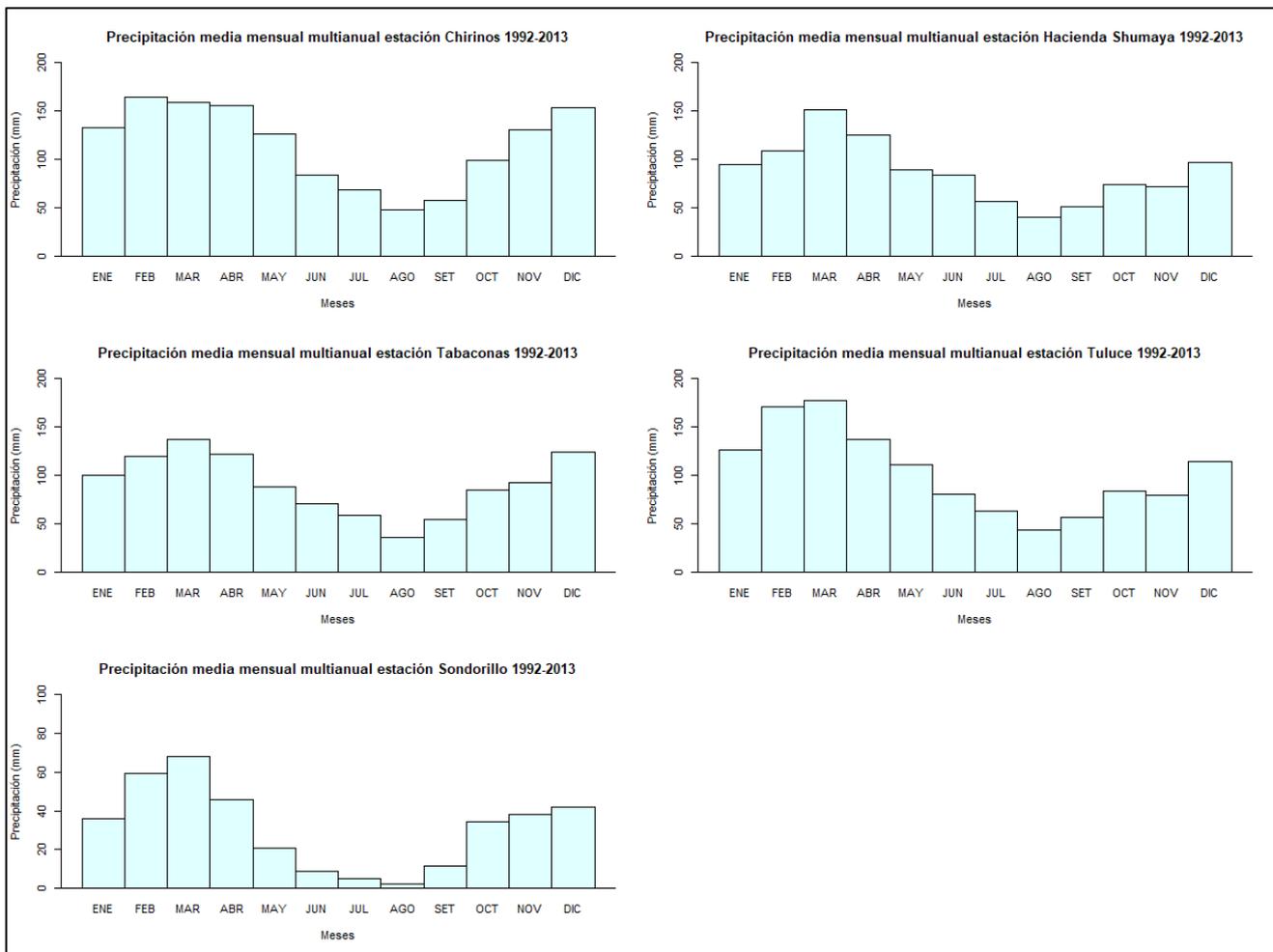


Figura 5. Régimen anual de precipitación registrada en las estaciones meteorológicas

✓ **Valores atípicos de la precipitación registrada**

En la Figura 6 se observa la presencia de datos atípicos de la precipitación mensual registrada en las 5 estaciones meteorológicas, también se evidencio que la estación Sondorillo presenta valores de precipitación por debajo de la media de las demás estaciones. Las precipitaciones atípicas se registraron durante los años 1993 - 1994; 1998 - 1999; 2005 - 2006 y 2007- 2008.

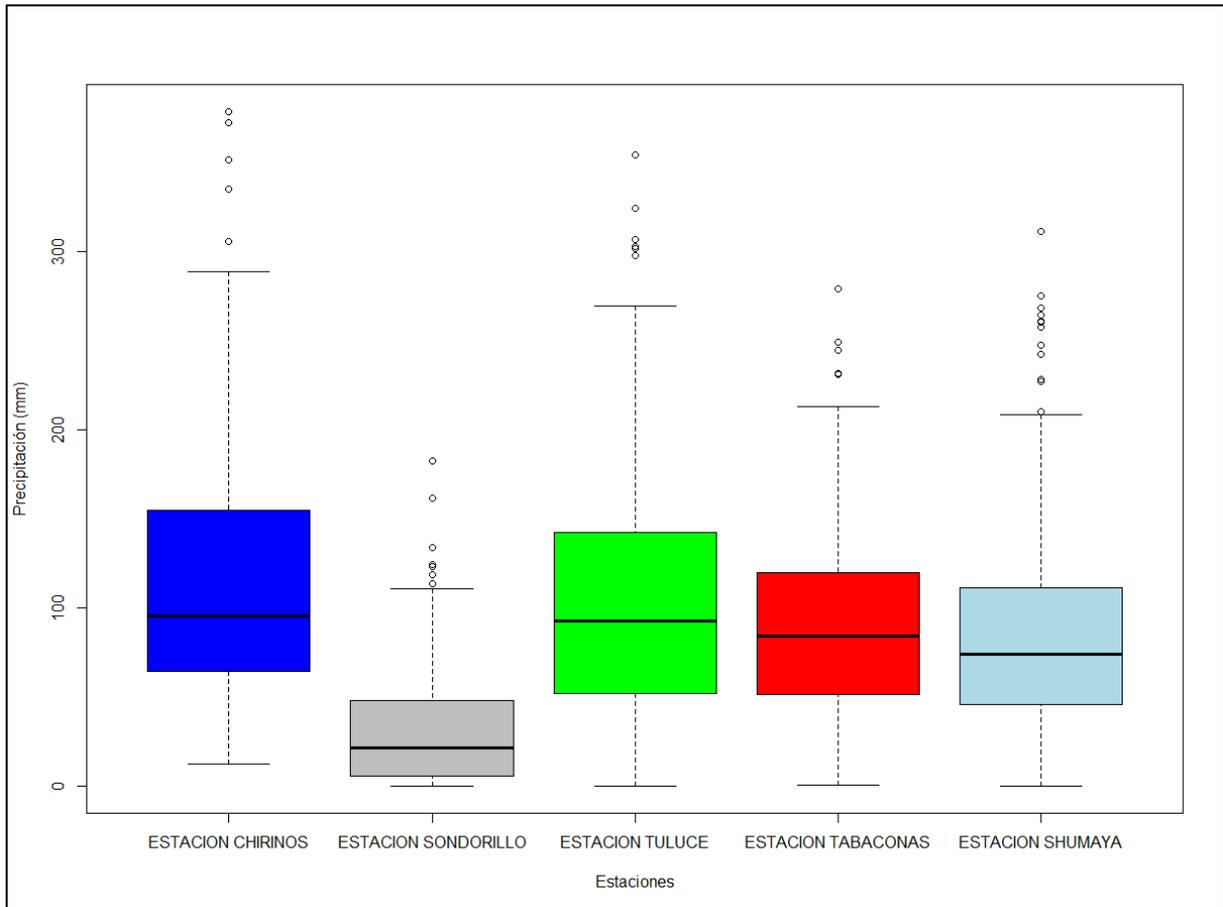


Figura 6. *Boxplot precipitación registrada en las estaciones meteorológicas*

✓ **Distribución de la precipitación registrada**

La Figura 7 muestra los histogramas de precipitación mensual registrada, las funciones de distribución empírica de la precipitación registrada y una función de distribución teórica normal para cada estación meteorológica. Se obtuvo como resultado que ninguna de las estaciones estudiadas adopta una distribución normal en su precipitación registrada.

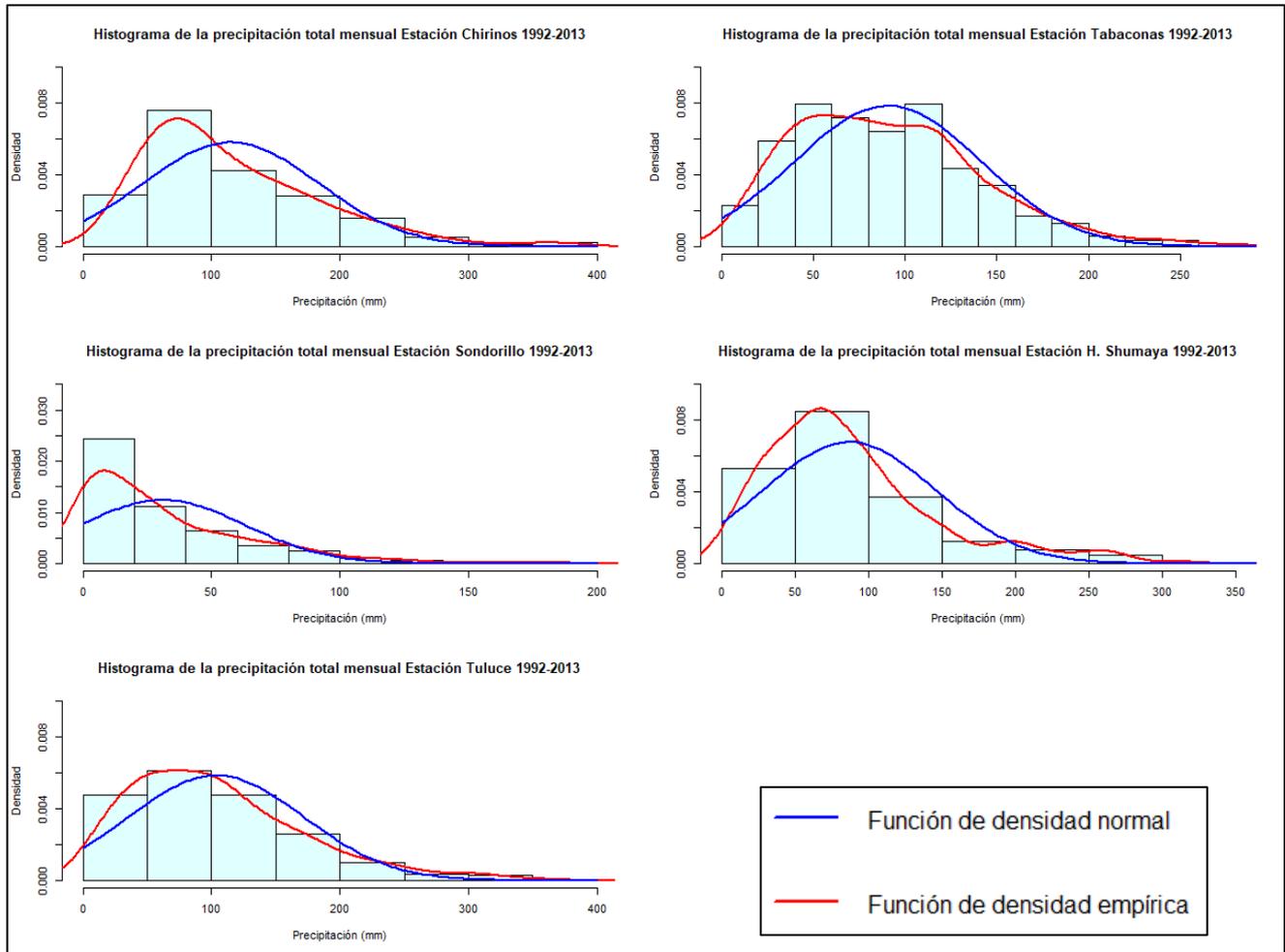


Figura 7. Histogramas de la precipitación registrada en las estaciones meteorológicas

4.1.2. Análisis de estacionalidad, consistencia y homogeneidad

✓ Estacionalidad

La Tabla 6 muestra los resultados de los test estadísticos Mann-Kendall y el modelo de regresión lineal con una significancia (α) del 0.05. Se puede apreciar que los valores calculados de la precipitación registrada en las estaciones Chirinos y Sondorillo se encuentran por debajo de los valores críticos 1.96 y 1.977 siendo no significativos (N.S), por tanto, ambas estaciones no presentan tendencias significativas. Al contrario, se evidencio tendencia decreciente estadísticamente significativa en la estación Hacienda Shumaya, debido a que él valor absoluto del valor calculado $- 2.15$ del modelo de regresión lineal es mayor al valor crítico 1.977. De la misma manera también se aprecia que existen tendencias crecientes estadísticamente significativas en las estaciones Tabaconas y

Tuluce, debido a que sus valores calculados son mayores que los valores críticos para ambas pruebas utilizadas.

Tabla 6.
Test estadísticos de tendencia

Estación meteorológica	Test estadísticos	Valor calculado	Significancia	Resultado	Descripción
			$\alpha = 0.05$		
Estación Chirinos	Mann-Kendall	1.368	1.96	N.S	Estacionalidad
	Regresión Lineal	0.828	1.977	N.S	
Estación Tabaconas	Mann-Kendall	3.133	1.96	S	Tendencia creciente
	Regresión Lineal	2.882	1.977	S	
Estación Sondorillo	Mann-Kendall	-0.863	1.96	N.S	Estacionalidad
	Regresión Lineal	-0.576	1.977	N.S	
Estación Tuluce	Mann-Kendall	2.334	1.96	S	Tendencia creciente
	Regresión Lineal	2.685	1.977	S	
Estación Hacienda Shumaya	Mann-Kendall	-1.634	1.96	N.S	Tendencia decreciente
	Regresión Lineal	-2.15	1.977	S	

✓ **Consistencia y homogeneidad**

Los resultados de las pruebas T de Student (Tabla 7), con una significancia (α) del 0.05, indican que las medias de las estaciones Tabaconas y Hacienda Shumaya presentaron inconsistencia estadísticamente significativa. Al contrario, las estaciones Chirinos, Sondorillo y Tuluce presentaron medias consistentes.

Tabla 7.
Prueba T de Student

Estación meteorológica	Valor calculado	Significancia	Resultado	Descripción
		$\alpha = 0.05$		
Estación Chirinos	0.69	1.969	N.S	Media consistente
Estación Tabaconas	2.69	1.969	S	Media inconsistente
Estación Sondorillo	0.96	1.969	N.S	Media consistente
Estación Tuluce	1.64	1.969	N.S	Media consistente
Estación Hacienda Shumaya	3.05	1.969	S	Media inconsistente

Las pruebas F de Fisher (Tabla 8), con una significancia (α) del 0.05, arrojaron como resultado que las desviaciones estándar de los datos mensuales de precipitación de las estaciones Tabaconas, Sondorillo y Hacienda Shumaya presentaron inconsistencia estadísticamente significativa, mientras tanto las estaciones Chirinos y Tuluce mostraron desviaciones estándar consistentes.

Tabla 8.*Prueba F de Fisher*

Estación meteorológica	Valor calculado	Significancia $\alpha = 0.05$	Resultado	Descripción
Estación Chirinos	1.15	1.33	N.S	Desviación estándar consistente
Estación Tabaconas	0.87	0.75	S	Desviación estándar inconsistente
Estación Sondorillo	0.97	0.75	S	Desviación estándar inconsistente
Estación Tuluca	0.65	0.75	N.S	Desviación estándar consistente
Estación Hacienda Shumaya	1.94	1.33	S	Desviación estándar inconsistente

✓ **Vector regional**

A partir de la precipitación mensual registrada corregida de cada estación meteorológica se realizó el vector regional con las precipitaciones anuales para el periodo de estudio (1992 – 2013). Como resultado se obtuvo que las correlaciones entre el vector regional y las estaciones están por encima de $R > 0.6$, mientras que la D.E.D presenta valores por debajo de 0.15 (Tabla 9). Por otra parte, gráficamente la variabilidad de los índices anuales del Vector y de las estaciones (Figura 8) muestra un comportamiento similar entre las estaciones y el vector regional.

Tabla 9.*Parámetros evaluados del Vector Regional*

Estaciones meteorológicas	D.E.D	Correl./Vector
Estación Chirinos	0.084	0.89
Estación Tabaconas	0.139	0.67
Estación Tuluca	0.143	0.75
Estación Hacienda Shumaya	0.139	0.87
Estación Sondorillo	0.148	0.88

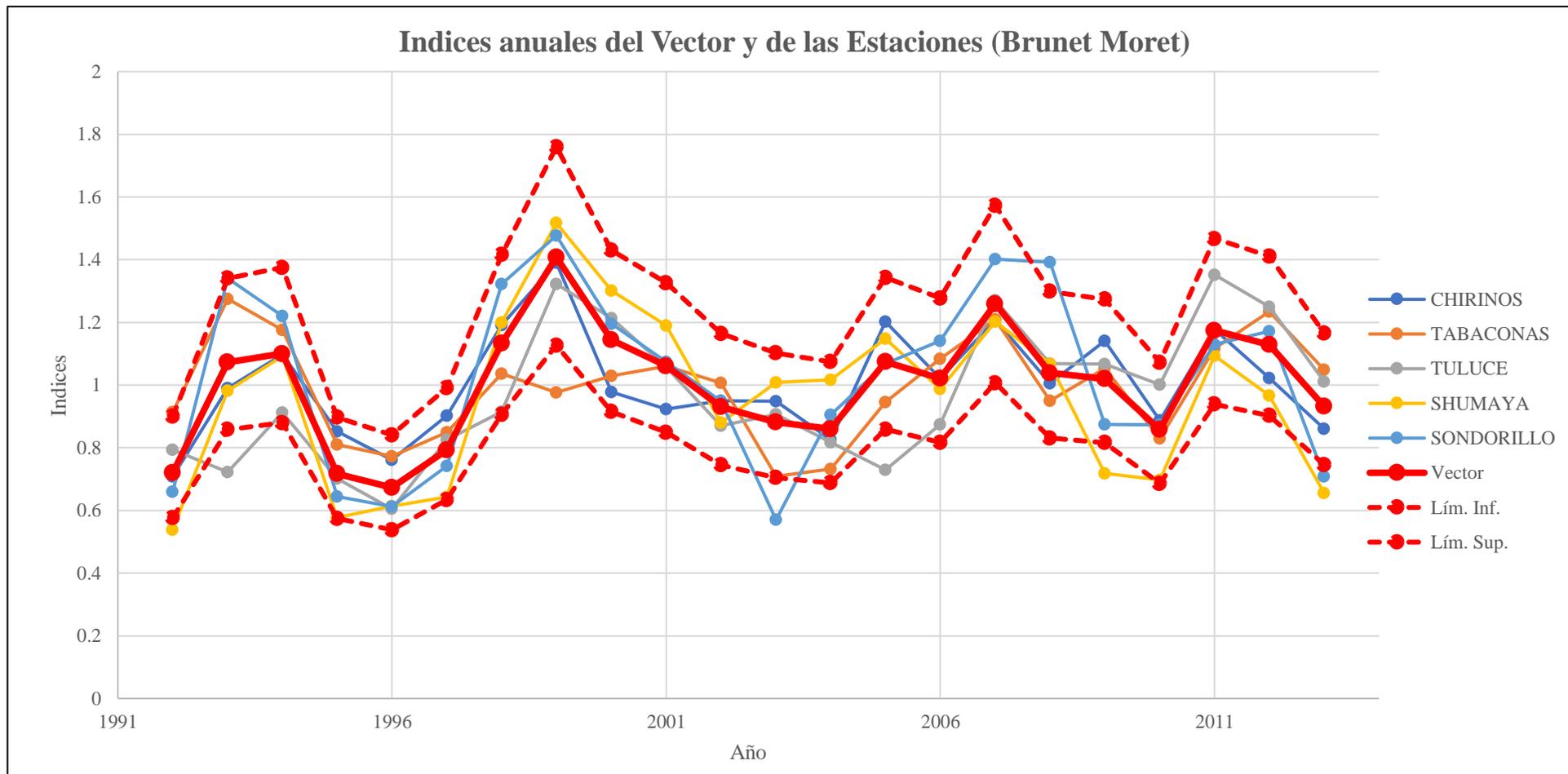


Figura 8. Variabilidad de índices de estaciones y vector regional

Nota. El gráfico muestra un comportamiento similar entre los índices anuales del vector y las estaciones meteorológicas. En el periodo 1992 – 2013, los índices de las estaciones permanecen la mayor parte del tiempo dentro del límite superior e inferior del vector.

4.1.3. Downscaling de la precipitación de los modelos de circulación global (GCM)

La aplicación del downscaling estadístico con la técnica quantile mapping bajo los métodos paramétricos y no paramétricos, utilizando los datos mensuales de precipitación modelada de los GCM (CCSM4, HADGEM2 AO, HADGEM2 CC, HADGEM2 ES, MIROC5 y MPI ESM LR) y los datos mensuales de precipitación registrada de cada una de las estaciones meteorológicas estudiadas. Arrojaron como resultado para cada estación 6 GCM ajustados por método empleado, las Figuras 9 y 10, presentan las funciones de distribuciones empíricas tanto de la estación meteorológica, GCM y el GCM ajustado. Gráficamente, se observa como al aplicar los métodos de Quantile mapping las funciones de distribuciones empíricas de los GCM se ajustan a las distribuciones de las estaciones meteorológicas (Anexos 11 - 70).

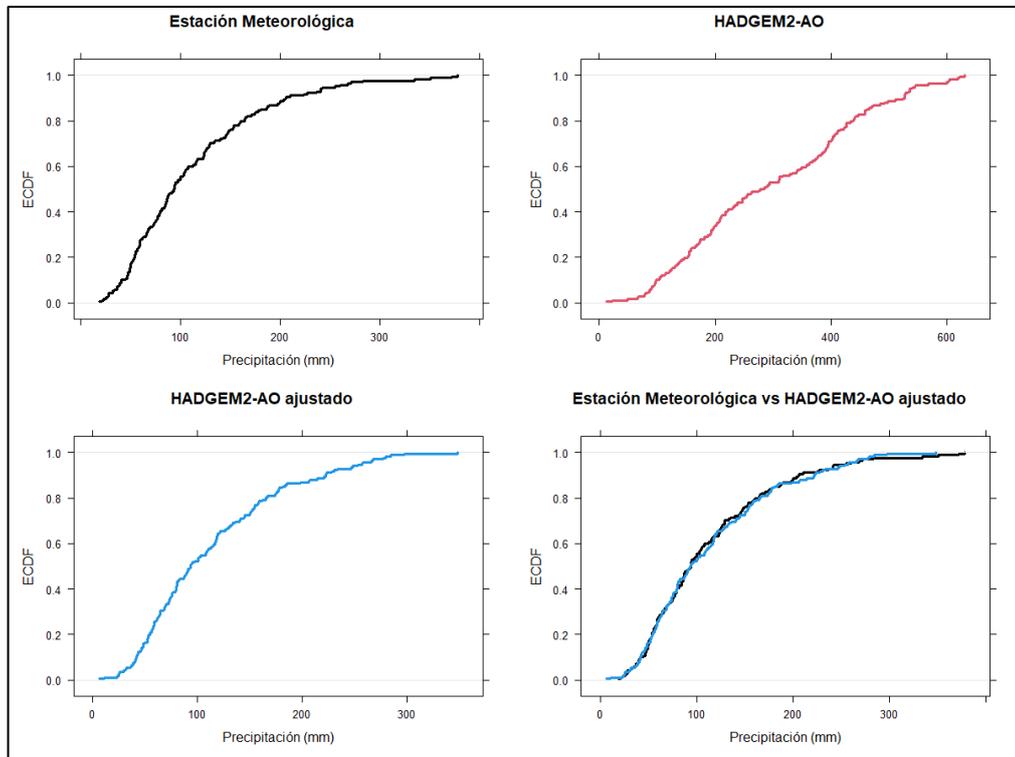


Figura 9. Downscaling paramétrico del GCM HADGEM2-AO en torno estación Chirinos

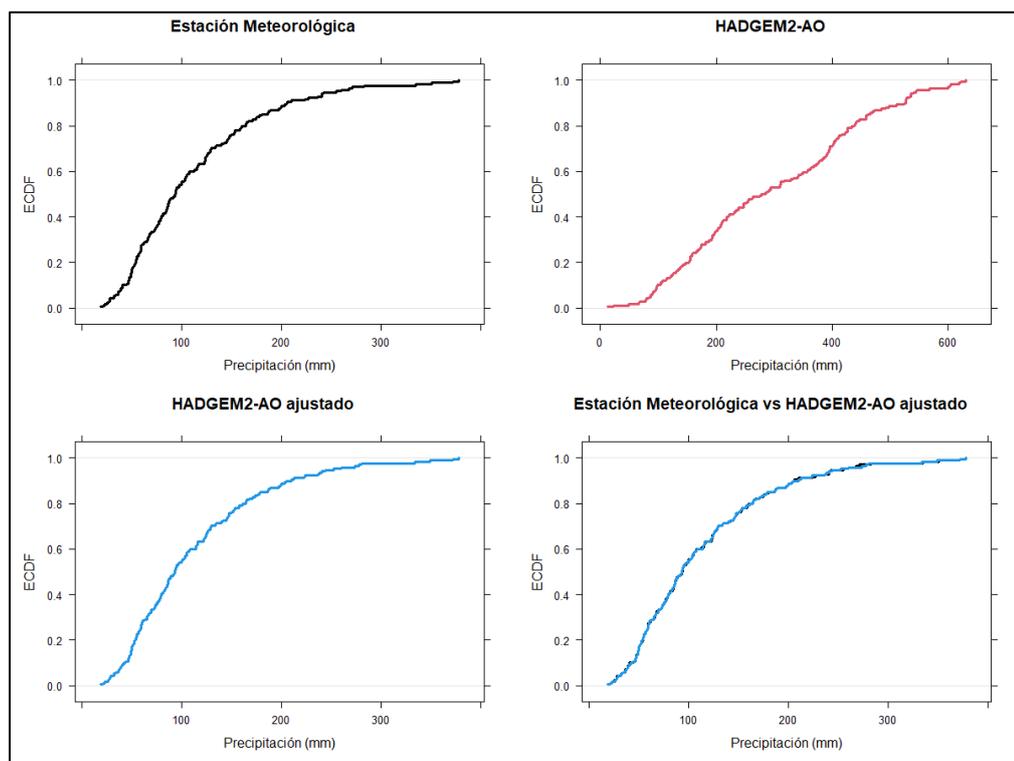


Figura 10. *Downscaling no paramétrico del GCM HADGEM2-AO en torno estación Chirinos*

Nota. La aplicación del downscaling no paramétrico, a la precipitación del modelo HADGEM2-AO, logro el mayor ajuste respecto a la precipitación registrada en la estación Chirinos.

4.1.4. GCMs con mayor ajuste respecto a la precipitación registrada

Se utilizaron los indicadores estadísticos: Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), error cuadrático medio (RMSE), coeficiente de correlación de Pearson (R) y coeficiente de determinación (R^2). Cada GCM ajustado fue evaluado a escala promedio mensual multianual respecto a la precipitación registrada de cada estación meteorológica, como resultado se obtuvo lo siguiente:

✓ Estación meteorológica Chirinos:

La Tabla 10 muestra que los GCM con downscaling no paramétrico obtuvieron un mayor ajuste respecto a la estación Chirinos. Siendo el modelo HADGEM2 AO quien mejor explica la precipitación registrada de la estación, logrando valores más cercanos a 1 en NSE 0.73, R 0.88, R^2 0.78 y los valores más bajos para RMSE 27.36.

Tabla 10.*Indicadores estadísticos de ajuste en torno estación meteorológica Chirinos*

GCM	Método	Indicador estadístico			
		NSE	R	R ²	RMSE
CCM4	Downscaling paramétrico	0.61	0.86	0.74	27.36
	Downscaling no paramétrico	0.65	0.87	0.75	25.83
HADGEM2 AO	Downscaling paramétrico	0.63	0.85	0.72	27.03
	Downscaling no paramétrico	0.73	0.88	0.78	22.93
HADGEM2 CC	Downscaling paramétrico	0.57	0.83	0.68	28.83
	Downscaling no paramétrico	0.57	0.83	0.68	28.59
HADGEM2 ES	Downscaling paramétrico	0.5	0.81	0.66	30.98
	Downscaling no paramétrico	0.6	0.84	0.7	27.72
MIROC5	Downscaling paramétrico	0.42	0.83	0.68	33.21
	Downscaling no paramétrico	0.46	0.83	0.69	32.27
MPI ESM LR	Downscaling paramétrico	0.19	0.68	0.46	39.37
	Downscaling no paramétrico	0.39	0.73	0.54	34.25

✓ **Estación meteorológica Tabaconas:**

El GCM HADGEM2 AO con downscaling no paramétrico logro explicar de mejor manera la precipitación registrada de la estación Tabaconas, al obtener valores más cercanos a 1 de NSE 0.73, R 0.88, R² 0.78 y los valores más bajos de RMSE 15.58 (Tabla 11).

Tabla 11.*Indicadores estadísticos de ajuste en torno estación meteorológica Tabaconas*

GCM	Método	Indicador estadístico			
		NSE	R	R ²	RMSE
CCM4	Downscaling paramétrico	0.43	0.79	0.62	22.53
	Downscaling no paramétrico	0.45	0.79	0.62	22.27
HADGEM2 AO	Downscaling paramétrico	0.72	0.88	0.78	15.78
	Downscaling no paramétrico	0.73	0.88	0.78	15.58
HADGEM2 CC	Downscaling paramétrico	0.6	0.83	0.69	18.88
	Downscaling no paramétrico	0.57	0.82	0.67	19.65
HADGEM2 ES	Downscaling paramétrico	0.58	0.83	0.7	14.86
	Downscaling no paramétrico	0.62	0.85	0.71	18.33
MIROC5	Downscaling paramétrico	0.31	0.78	0.61	24.9
	Downscaling no paramétrico	0.27	0.76	0.58	25.46
MPI ESM LR	Downscaling paramétrico	0.33	0.73	0.53	24.46
	Downscaling no paramétrico	0.43	0.75	0.56	22.6

✓ **Estación meteorológica Sondorillo:**

Respecto a la estación Sondorillo, el MCG CCSM4 con downscaling no paramétrico logro un mayor ajuste de la precipitación registrada, al obtener valores más cercanos a 1 en NSE 0.86, R 0.95, R² 0.89 y valores más bajos en RMSE 7.53 (Tabla 12).

Tabla 12.

Indicadores estadísticos de ajuste en torno estación meteorológica Sondorillo

GCM	Método	Indicador estadístico			
		NSE	R	R ²	RMSE
CCM4	Downscaling paramétrico	0.85	0.94	0.89	7.89
	Downscaling no paramétrico	0.86	0.95	0.89	7.53
HADGEM2 AO	Downscaling paramétrico	0.85	0.93	0.87	7.93
	Downscaling no paramétrico	0.85	0.93	0.86	7.95
HADGEM2 CC	Downscaling paramétrico	0.86	0.94	0.89	7.48
	Downscaling no paramétrico	0.81	0.92	0.85	8.75
HADGEM2 ES	Downscaling paramétrico	0.84	0.94	0.88	8.02
	Downscaling no paramétrico	0.84	0.93	0.87	8.1
MIROC5	Downscaling paramétrico	0.66	0.91	0.83	11.8
	Downscaling no paramétrico	0.68	0.91	0.83	11.35
MPI ESM LR	Downscaling paramétrico	0.69	0.87	0.76	11.34
	Downscaling no paramétrico	0.8	0.91	0.82	9.1

✓ **Estación meteorológica Hacienda Shumaya:**

El GCM HADGEM2 AO con downscaling paramétrico logro explicar de mejor manera la precipitación registrada de la estación Shumaya, al lograr obtener los valores más cercanos a 1 de NSE 0.7 , R 0.89, R² 0.8 y el valor más bajo de RMSE 21.84 (Tabla 13).

Tabla 13.*Indicadores estadísticos de ajuste en torno estación meteorológica Hacienda Shumaya*

GCM	Método	Indicador estadístico			
		NSE	R	R ²	RMSE
CCM4	Downscaling paramétrico	0.21	0.73	0.53	35.43
	Downscaling no paramétrico	0.21	0.73	0.53	35.64
HADGEM2 AO	Downscaling paramétrico	0.7	0.89	0.8	21.84
	Downscaling no paramétrico	0.69	0.89	0.79	22.31
HADGEM2 CC	Downscaling paramétrico	0.66	0.87	0.75	23.47
	Downscaling no paramétrico	0.63	0.86	0.74	24.29
HADGEM2 ES	Downscaling paramétrico	0.6	0.86	0.75	25.14
	Downscaling no paramétrico	0.59	0.86	0.74	25.7
MIROC5	Downscaling paramétrico	0.01	0.73	0.53	39.87
	Downscaling no paramétrico	0.09	0.74	0.55	38.1
MPI ESM LR	Downscaling paramétrico	0.36	0.77	0.59	32.05
	Downscaling no paramétrico	0.47	0.79	0.63	29.09

✓ Estación meteorológica Tuluce:

La Tabla 14, muestra los indicadores estadísticos para los datos obtenidos de la Estación Tuluce. El MCG HADGEM2 AO con downscaling no paramétrico logro el mayor ajuste respecto a precipitación registrada de la estación, al obtener los valores más próximos a 1 de NSE 0.83, R 0.92, R² 0.85 y los valores más bajos de RMSE 17.01.

Tabla 14.*Indicadores estadísticos de ajuste en torno estación meteorológica Tuluce*

GCM	Método	Indicador estadístico			
		NSE	R	R ²	RMSE
CCM4	Downscaling paramétrico	0.5	0.81	0.65	28.72
	Downscaling no paramétrico	0.53	0.81	0.66	27.85
HADGEM2 AO	Downscaling paramétrico	0.8	0.92	0.85	18.11
	Downscaling no paramétrico	0.83	0.92	0.85	17.01
HADGEM2 CC	Downscaling paramétrico	0.78	0.91	0.82	19.23
	Downscaling no paramétrico	0.78	0.91	0.82	19.34
HADGEM2 ES	Downscaling paramétrico	0.73	0.9	0.8	21.02
	Downscaling no paramétrico	0.77	0.9	0.82	19.79
MIROC5	Downscaling paramétrico	0.4	0.79	0.63	31.69
	Downscaling no paramétrico	0.41	0.8	0.64	31.35
MPI ESM LR	Downscaling paramétrico	0.67	0.87	0.75	23.6
	Downscaling no paramétrico	0.76	0.9	0.8	20.01

4.1.5. Escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5

Los resultados de downscaling bajo los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5, de los GCMs con mayor ajuste para cada estación meteorológica, se muestran en los Anexos 71 - 75. En la Figura 11, se aprecia el resultado del ajuste de las proyecciones de precipitación bajo los escenarios de cambio climático para el periodo 1992 – 2100 para la estación meteorológica Chirinos. La línea de color azul representa a las proyecciones del modelo sin reducción de escala (downscaling). Mientras que, la línea de color naranja representa a las proyecciones del modelo con downscaling.

Finalmente, a partir de los resultados obtenidos para los escenarios de cambio climáticos, se utilizaron solamente los datos de la precipitación ajustada para los periodos 2030 – 2059 (futuro cercano) y 2070 – 2099 (futuro lejano) por cada estación meteorológica. Con la finalidad de estudiar las tendencias y episodios de sequía futuros.

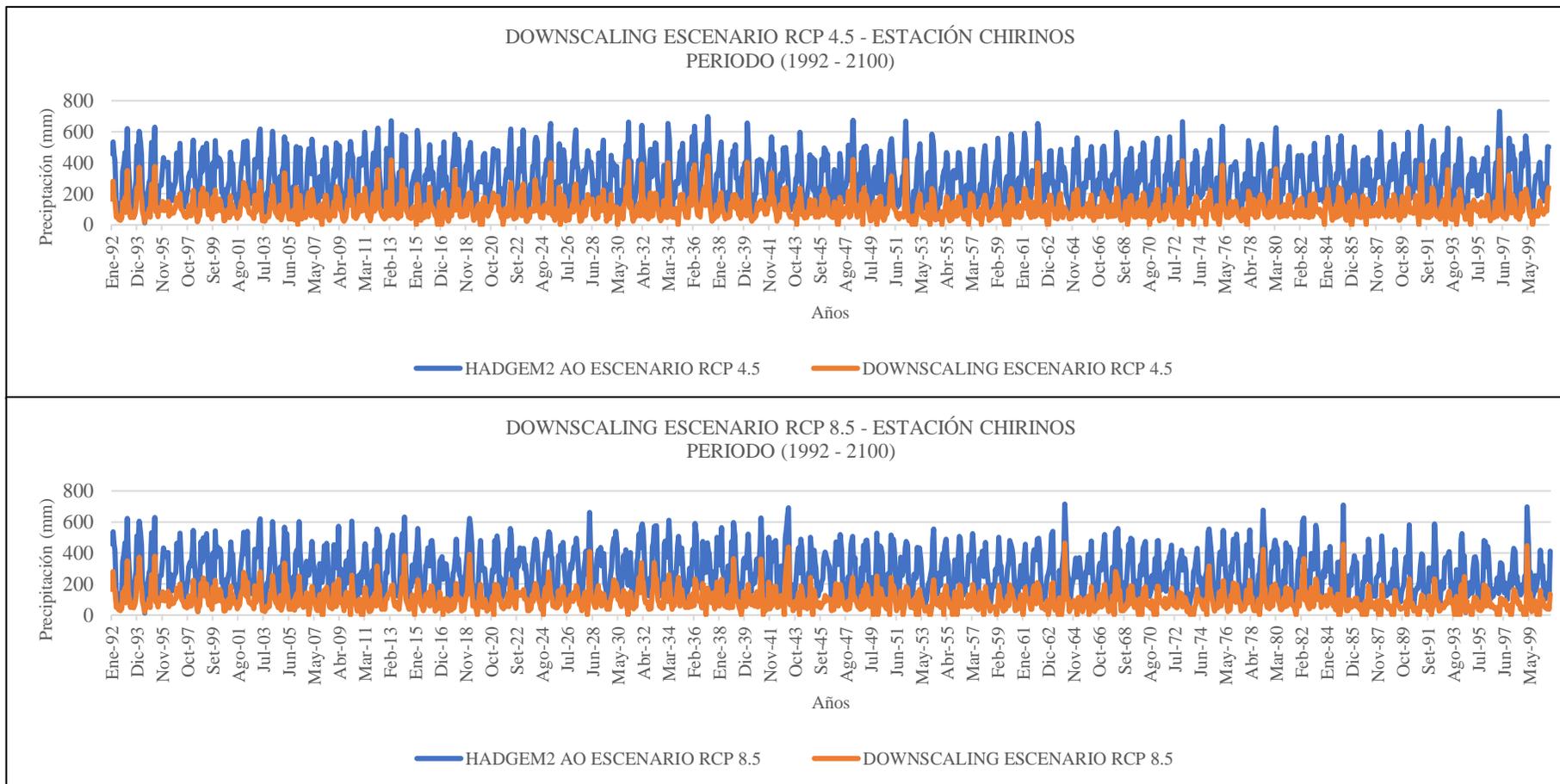


Figura 11. Dowsaling escenarios de cambio climático RCP 4.5 y 8.5 en torno estación Chirinos

Nota. Al aplicar downscaling a la precipitación proyectada por los GCMs bajo los escenarios de cambio climático, se logra observar como las sobreestimaciones de los modelos son corregidos y adecuados en torno a la estación de destino.

4.2. Tendencia de precipitación futura bajo los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y 8.5

4.2.1. Tendencia

Se usaron los test estadísticos de regresión lineal y Mann-Kendall para los periodos futuro cercano (2030 – 2059) y futuro lejano (2070 – 2099) con una significancia (α) del 0.05. Los resultados se resumen en la Tabla 15, respecto al escenario de cambio climático RCP 4.5 las estaciones de Chirinos, Tabaconas, Hacienda Shumaya y Tuluce experimentaran una precipitación con tendencia decreciente estadísticamente significativa en el futuro cercano, sin embargo, en el futuro lejano no se presentan tendencias que sean significativas.

Respecto al escenario de cambio climático RCP 8.5, los resultados demuestran que la precipitación en las estaciones Chirinos, Tabaconas, Hacienda Shumaya y Tuluce experimentaran tendencias decrecientes estadísticamente significativas en el futuro cercano y lejano. La precipitación en la estación Sondorillo representa un caso particular debido a que no experimentara tendencias que sean significativas bajo ningún escenario climático. Por último, se representó de manera grafica las líneas de tendencia de cada estación meteorológica (Figuras 12 – 16).

Tabla 15.*Tendencia de las estaciones meteorológicas bajo escenarios RCP 4.5 y 8*

Estación meteorológica	Escenario climático	Periodo	Test estadísticos	Valor calculado	Significancia	Resultado	Descripción
					$\alpha = 0.05$		
Chirinos	RCP 4.5	Futuro cercano	Mann-Kendall	-2.648	1.96	S	Tendencia significativa decreciente
			Regresion Lineal	-3.026	1.975	S	
	Futuro lejano	Mann-Kendall	0.769	1.96	N.S	Sin tendencia significativa	
		Regresion Lineal	0.961	1.975	N.S		
	RCP 8.5	Futuro cercano	Mann-Kendall	-3.478	1.96	S	Tendencia significativa decreciente
			Regresion Lineal	-3.734	1.975	S	
Futuro lejano	Mann-Kendall	-3.043	1.96	N.S	Tendencia significativa decreciente		
	Regresion Lineal	-2.392	1.975	N.S			
Tabaconas	RCP 4.5	Futuro cercano	Mann-Kendall	-2.744	1.96	S	Tendencia significativa decreciente
			Regresion Lineal	-3.179	1.975	S	
	Futuro lejano	Mann-Kendall	0.832	1.96	N.S	Sin tendencia significativa	
		Regresion Lineal	0.787	1.975	N.S		
	RCP 8.5	Futuro cercano	Mann-Kendall	-3.555	1.96	S	Tendencia significativa decreciente
			Regresion Lineal	-4.06	1.975	S	
Futuro lejano	Mann-Kendall	-2.76	1.96	S	Tendencia significativa decreciente		
	Regresion Lineal	-2.044	1.975	S			
Sondorillo	RCP 4.5	Futuro cercano	Mann-Kendall	-0.123	1.96	N.S	Sin tendencia significativa
			Regresion Lineal	-0.698	1.975	N.S	
	Futuro lejano	Mann-Kendall	0.832	1.96	N.S	Sin tendencia significativa	
		Regresion Lineal	0.787	1.975	N.S		
	RCP 8.5	Futuro cercano	Mann-Kendall	-0.25	1.96	N.S	Sin tendencia significativa
			Regresion Lineal	-0.419	1.975	N.S	
Futuro lejano	Mann-Kendall	0.09	1.96	N.S	Sin tendencia significativa		
	Regresion Lineal	0.05	1.975	N.S			
Hacienda shumaya	RCP 4.5	Futuro cercano	Mann-Kendall	-2.885	1.96	S	Tendencia significativa decreciente
			Regresion Lineal	-2.975	1.975	S	
	Futuro lejano	Mann-Kendall	0.953	1.96	N.S	Sin tendencia significativa	
		Regresion Lineal	0.853	1.975	N.S		
	RCP 8.5	Futuro cercano	Mann-Kendall	-3.432	1.96	S	Tendencia significativa decreciente
			Regresion Lineal	-3.625	1.975	S	
Futuro lejano	Mann-Kendall	-2.495	1.96	S	Tendencia significativa decreciente		
	Regresion Lineal	-1.565	1.975	N.S			
Tuluca	RCP 4.5	Futuro cercano	Mann-Kendall	-2.744	1.96	S	Tendencia significativa decreciente
			Regresion Lineal	-3.179	1.975	S	
	Futuro lejano	Mann-Kendall	0.832	1.96	N.S	Sin tendencia significativa	
		Regresion Lineal	0.787	1.975	N.S		
	RCP 8.5	Futuro cercano	Mann-Kendall	-3.482	1.96	S	Tendencia significativa decreciente
			Regresion Lineal	-3.606	1.975	S	
Futuro lejano	Mann-Kendall	-2.797	1.96	S	Tendencia significativa decreciente		
	Regresion Lineal	-2.028	1.975	S			

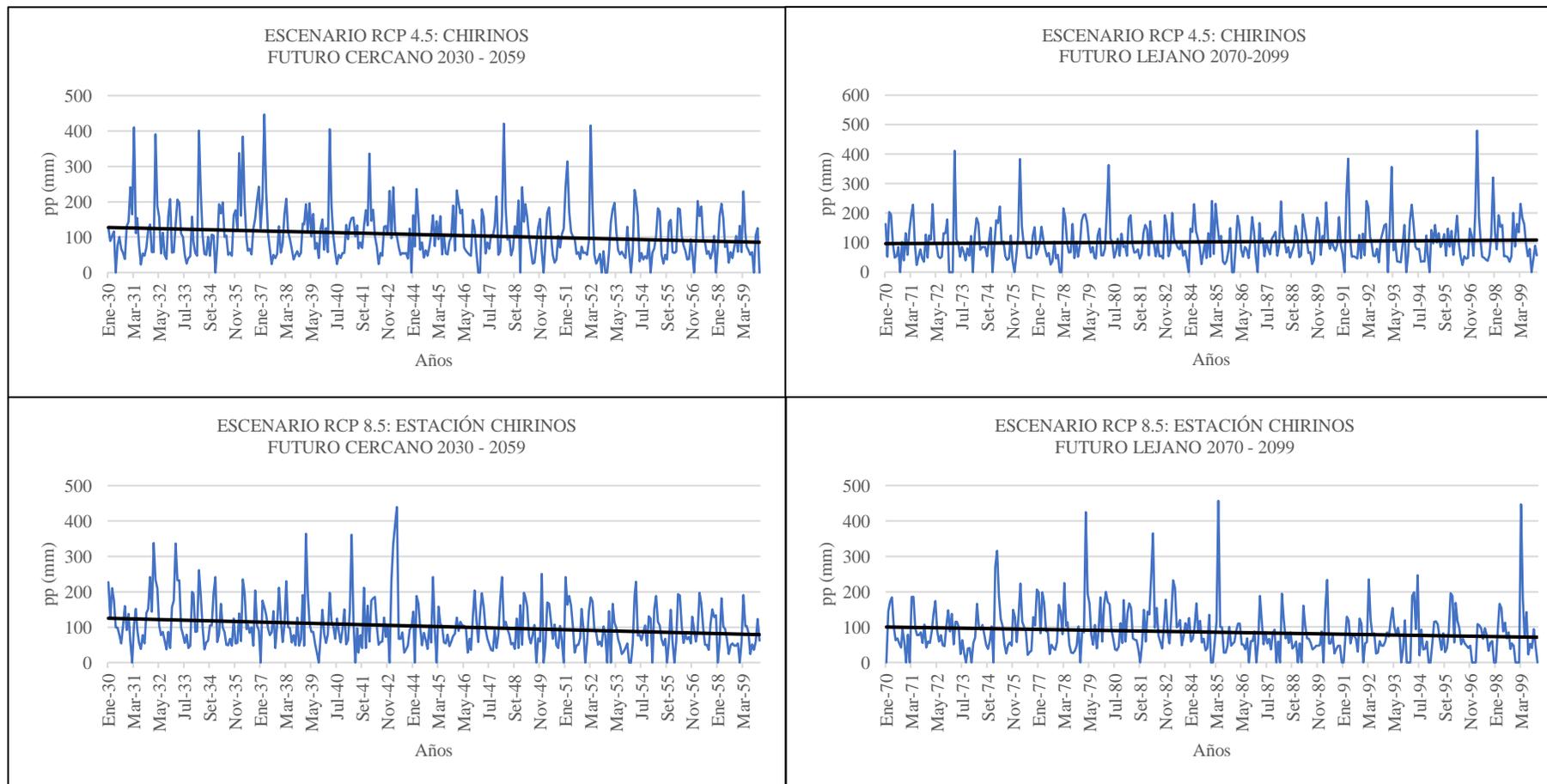


Figura 12. Línea de tendencia del futuro cercano y lejano de la estación Chirinos

Nota. En la gráfica se observa que bajo el escenario RCP 4.5, la precipitación en la estación Chirinos experimentara un decrecimiento en el futuro cercano que se estabiliza en el futuro lejano. Por el contrario, bajo el escenario RCP 8.5 el decrecimiento se mantiene tanto en el futuro cercano como en el futuro lejano.

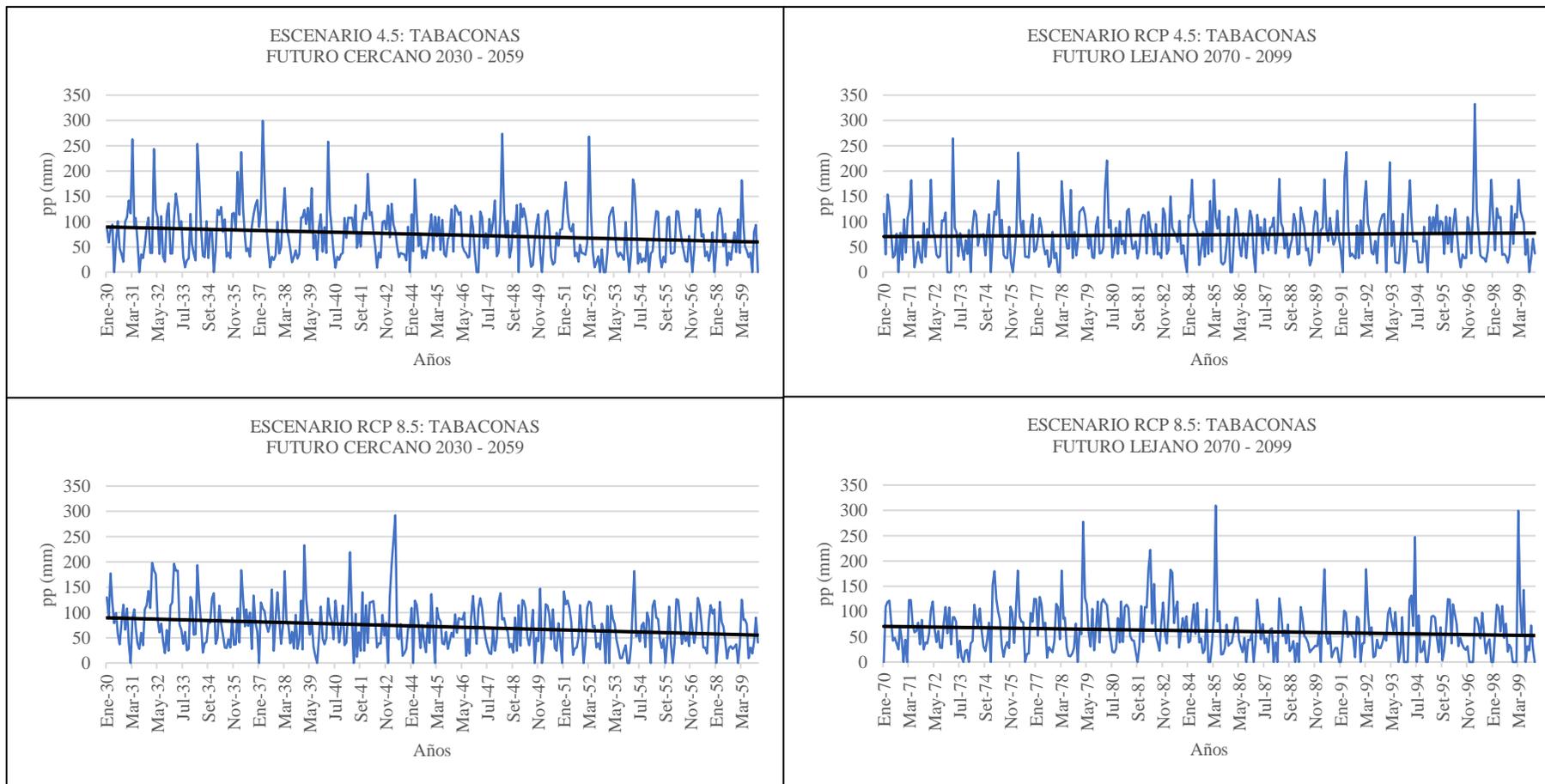


Figura 13. Línea de tendencia del futuro cercano y lejano de la estación Tabaconas

Nota. En la gráfica se observa que bajo el escenario RCP 4.5, la precipitación en la estación Tabaconas experimentara un decrecimiento en el futuro cercano que se estabiliza en el futuro lejano. Por el contrario, bajo el escenario RCP 8.5 el decrecimiento se mantiene tanto en el futuro cercano como en el futuro lejano.

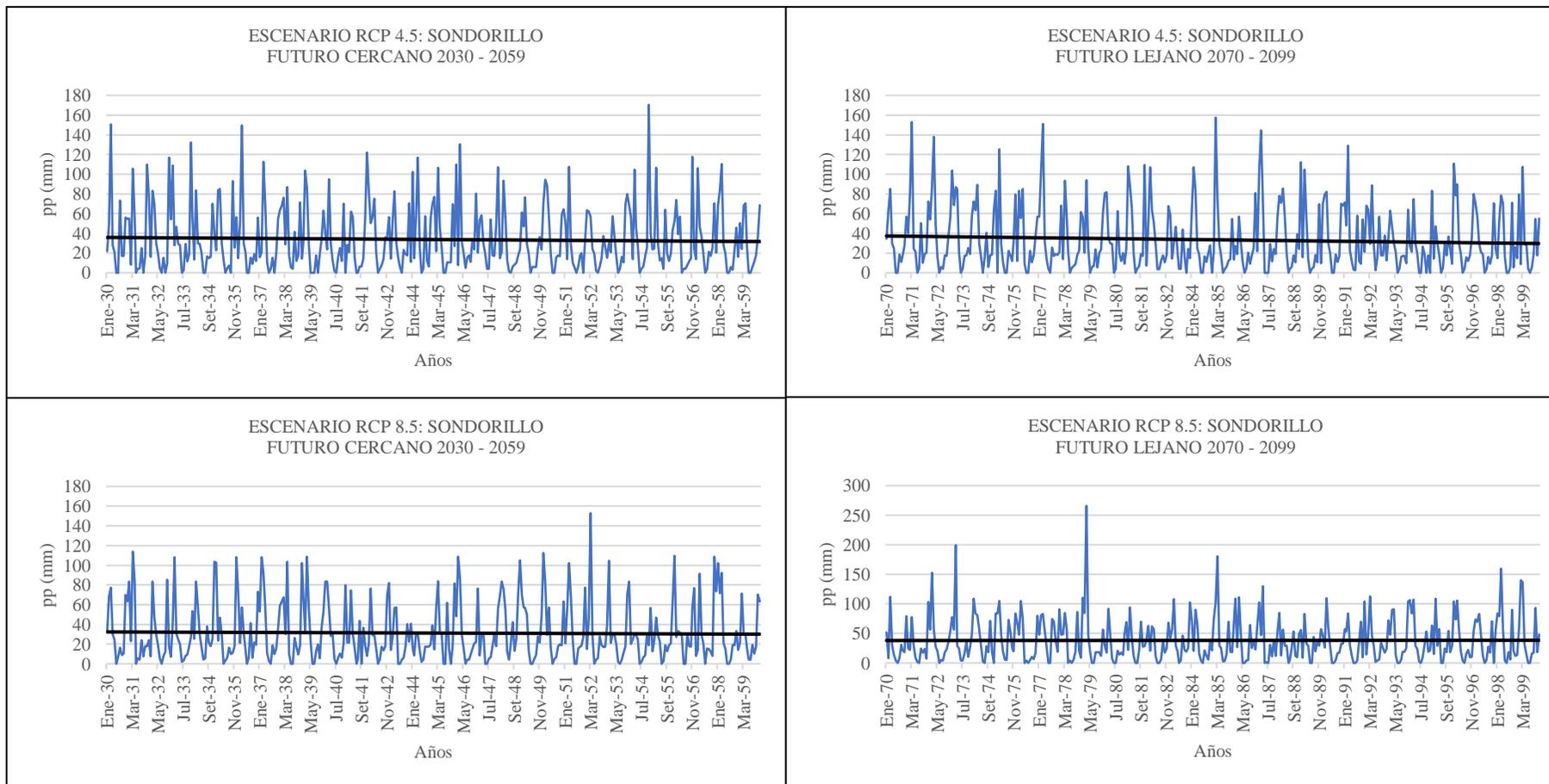


Figura 14. Línea de tendencia del futuro cercano y lejano de la estación Sondorillo

Nota. En la gráfica se observa que la precipitación en la estación Sondorillo no experimentara tendencias bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5.

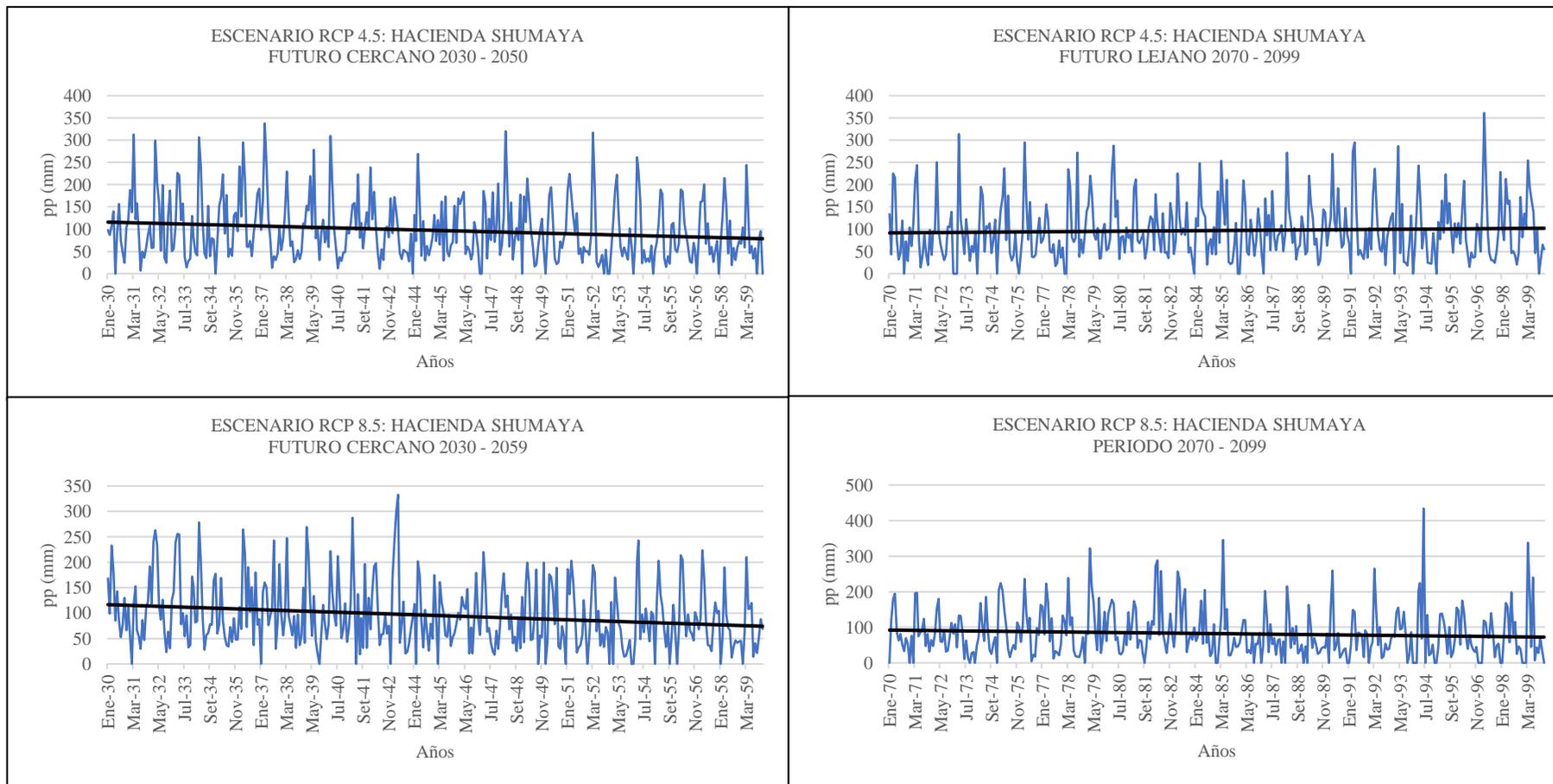


Figura 15. Línea de tendencia del futuro cercano y lejano de la estación Hacienda Shumaya

Nota. En la gráfica se observa que bajo el escenario RCP 4.5, la precipitación en la estación Hacienda Shumaya experimentara un decrecimiento en el futuro cercano que se estabiliza en el futuro lejano. Por el contrario, bajo el escenario RCP 8.5 el decrecimiento se mantiene tanto en el futuro cercano como en el futuro lejano.

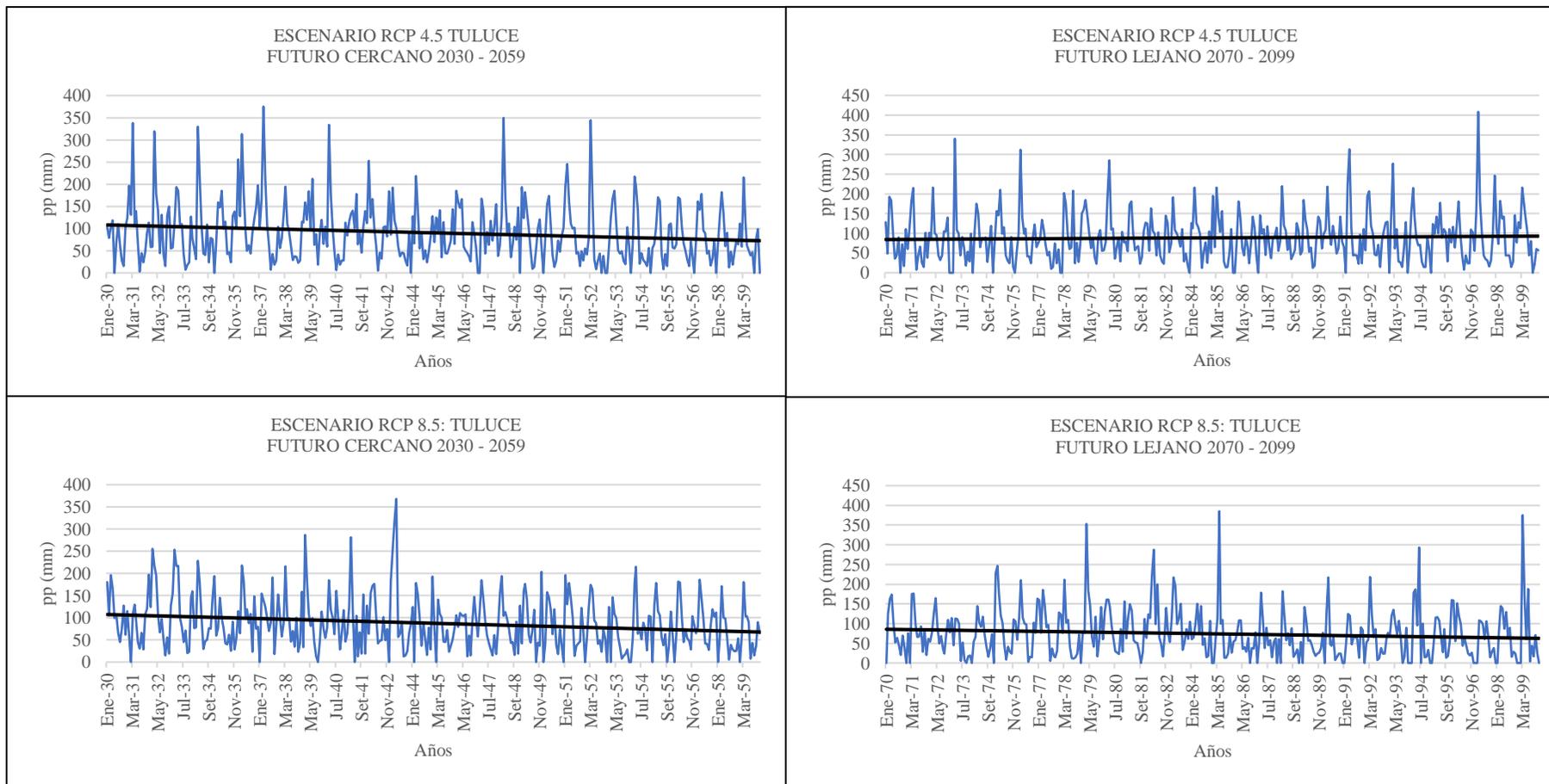


Figura 16. Línea de tendencia del futuro cercano y lejano de la estación Tuluca

Nota. En la gráfica se observa que bajo el escenario RCP 4.5, la precipitación en la estación Tuluca experimentaría un decrecimiento en el futuro cercano que se estabiliza en el futuro lejano. Por el contrario, bajo el escenario RCP 8.5 el decrecimiento se mantiene tanto en el futuro cercano como en el futuro lejano.

4.2.2. Variabilidad de la precipitación bajo los escenarios climáticos RCP 4.5 y RCP 8.5

Se estudió el cambio o variabilidad en términos porcentuales de la precipitación total promedio multianual de los periodos proyectados (futuro cercano y lejano) por cada estación meteorológica, tomando como referencia los datos de precipitación registrada (1992 – 2013). Los resultados obtenidos en la Tabla 16, demuestran que el modelo HADGEM2 AO plantea un decrecimiento de la precipitación en el futuro cercano y lejano para las estaciones meteorológicas Chirinos, Tabaconas, Hacienda Shumaya y Tuluca bajo ambos escenarios climáticos. Así mismo en este grupo de estaciones mencionadas el mayor decrecimiento se da bajo el escenario RCP 8.5. Por otra parte, tenemos que el modelo CCSM4 plantea un incremento de la precipitación en la estación Sondorillo bajo el escenario climático RCP 4.5, mientras que bajo el escenario RCP 8.5 alcanza el mayor incremento en el futuro lejano.

Tabla 16.

Variabilidad porcentual de precipitación en futuro cercano y lejano

Estación meteorológica	Variabilidad (%) RCP 4.5		Variabilidad (%) RCP 8.5	
	Futuro cercano	Futuro lejano	Futuro cercano	Futuro lejano
Chirinos	-7.5	-10.7	-11.3	-25.5
Tabaconas	-9.6	-10.2	-12.2	-25.4
Sondorillo	2.8	1.9	-5	16.2
Hacienda shumaya	-1	-1.3	-2.9	-16.2
Tuluca	-12.9	-14.4	-15.6	-28.5

4.3. Sequía meteorológica futura bajo los escenarios climáticos RCP 4.5 Y 8.5

✓ Estación meteorológica Chirinos

La Tabla 17 muestra que el modelo HADGEM2 AO bajo el escenario de cambio climático RCP 4.5 proyecta una ocurrencia de 2 eventos de sequía extrema y 15 de sequía severa para el futuro cercano, para el futuro lejano determinó la ocurrencia de 12 eventos de sequía extrema y 14 de sequía severa. Respecto a la proyección del modelo bajo el escenario RCP 8.5 se encontraron 9 eventos de

sequía extrema y 16 eventos de sequía severa para el futuro cercano, también se determinaron 29 eventos de sequía severa en el futuro lejano.

Tabla 17.
SPI de estación meteorológica Chirinos

SPI	Categoría	Ocurrencia			
		Escenario climático RCP 4.5		Escenario climático RCP 8.5	
		Futuro cercano	Futuro lejano	Futuro cercano	Futuro lejano
"0 a -0.99"	Sequía leve	129	118	138	107
"-1 a -1.49"	Sequía moderada	37	24	20	36
"-1.5 a -1.99"	sequía severa	15	14	16	29
< -2	sequía extrema	2	12	9	0

✓ **Estación meteorológica Tabaconas**

Los resultados del SPI para la estación Tabaconas (Tabla 18) muestran que el modelo HADGEM2 AO proyecta bajo el escenario de cambio climático RCP 4.5 la ocurrencia de 5 eventos de sequía extrema y 17 de sequía severa para el futuro cercano, mientras que para el futuro lejano los eventos de sequía extrema son 16 y 11 eventos de sequía severa. Bajo el escenario RCP 8.5 el modelo proyecta la ocurrencia de 16 eventos de sequía extrema y 9 de sequía severa para el futuro cercano, en cambio para el futuro lejano se proyectan 26 eventos de sequía severa.

Tabla 18.
SPI de estación meteorológica Tabaconas

SPI	Categoría	Ocurrencia			
		Escenario climático RCP 4.5		Escenario climático RCP 8.5	
		Futuro cercano	Futuro lejano	Futuro cercano	Futuro lejano
"0 a -0.99"	Sequía leve	125	118	129	97
"-1 a -1.49"	Sequía moderada	30	22	21	41
"-1.5 a -1.99"	sequía severa	17	11	9	26
< -2	sequía extrema	5	16	16	0

✓ **Estación meteorológica Sondorillo**

Los resultados de SPI para la estación Sondorillo (Tabla 19) muestran que el modelo CCSM4 proyecta bajo el escenario de cambio climático RCP 4.5 la ocurrencia de 12 eventos de sequía extrema y 27 de sequía severa para el futuro cercano, bajo el mismo escenario en el futuro lejano la ocurrencia de eventos de sequía extrema y severa es de 19 y 17 respectivamente. En el escenario RCP 8.5 el modelo proyecta para el futuro cercano la ocurrencia de 10 eventos de sequía extrema y 21 de sequía severa, para el futuro lejano se determinó la ocurrencia de 4 eventos de sequía extrema y 25 de sequía severa.

Tabla 19.

SPI de estación meteorológica Sondorillo

SPI	Categoría	Ocurrencia			
		Escenario climático RCP 4.5		Escenario climático RCP 8.5	
		Futuro cercano	Futuro lejano	Futuro cercano	Futuro lejano
"0 a -0.99"	Sequía leve	78	93	84	92
"-1 a -1.49"	Sequía moderada	37	24	42	40
"-1.5 a -1.99"	sequía severa	27	17	21	25
< -2	sequía extrema	12	19	10	4

✓ **Estación meteorológica Hacienda Shumaya**

La Tabla 20, muestra los resultados del SPI para la estación Hacienda Shumaya, determinándose que el modelo HADGEM2 AO proyecta bajo el escenario de cambio climático RCP 4.5 la ocurrencia de 5 eventos de sequía extrema y 15 de sequía severa para el futuro cercano, mientras que para el futuro lejano se determinó la ocurrencia de 16 eventos de sequía extrema y 6 de sequía severa.

Bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5 el modelo proyecta para el futuro cercano la ocurrencia de 14 eventos de sequía extrema y 14 de sequía severa, en cambio para el futuro lejano se proyecta la ocurrencia de 4 eventos de sequía extrema y 22 de sequía severa.

Tabla 20.*SPI de estación meteorológica Hacienda Shumaya*

SPI	Categoría	Ocurrencia			
		Escenario climático RCP 4.5		Escenario climático RCP 8.5	
		Futuro cercano	Futuro lejano	Futuro cercano	Futuro lejano
"0 a -0.99"	Sequía leve	127	115	125	92
"-1 a -1.49"	Sequía moderada	37	32	21	37
"-1.5 a -1.99"	sequía severa	15	6	14	22
< -2	sequía extrema	5	16	14	4

✓ **Estación meteorológica Tuluca**

El SPI para la estación Tuluca (Tabla 21) determinó que el modelo HADGEM2 AO proyecta bajo el escenario de cambio climático RCP 4.5 la ocurrencia de 1 evento de sequía extrema y 12 de sequía severa para el futuro cercano, además proyecta la ocurrencia de 15 eventos de sequía extrema y 10 de sequía severa para el futuro lejano.

Por último, bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5 el modelo proyecta la ocurrencia de 15 eventos de sequía extrema y 11 de sequía severa para el futuro cercano, mientras que para el futuro lejano determinó la ocurrencia de 1 evento de sequía extrema y 25 de sequía severa.

Tabla 21.*SPI de estación meteorológica Tuluca*

SPI	Categoría	Ocurrencia			
		Escenario climático RCP 4.5		Escenario climático RCP 8.5	
		Futuro cercano	Futuro lejano	Futuro cercano	Futuro lejano
"0 a -0.99"	Sequía leve	123	114	128	97
"-1 a -1.49"	Sequía moderada	44	28	21	42
"-1.5 a -1.99"	sequía severa	12	10	11	25
< -2	sequía extrema	1	15	15	1

V. DISCUSIÓN

5.1. Ajuste de escala de los GCMs en torno a las estaciones de la cuenca Chinchipe

5.1.1. Análisis exploratorio de datos (EDA)

Los resultados del análisis exploratorio de datos demuestran que las precipitaciones promedio mensual multianual de las estaciones (Figura 5), describen un comportamiento marcado por un periodo lluvioso (diciembre – abril), un periodo seco (junio – octubre) y uno de transición (mayo, octubre y noviembre). Este comportamiento de la precipitación en la cuenca Chinchipe se sustenta según SENAMHI (2016, 2021) en factores condicionantes como los patrones de circulación atmosférica que ocasiona la recurrencia de lluvias en los meses de septiembre hasta abril, como también a la baja altitud y fragmentación de la cordillera norte del Perú. Los resultados concuerdan con las investigaciones realizada por Rivasplata (2019) y Díaz (2013) quienes determinaron regímenes de precipitaciones marcadas por un periodo lluvioso y otro periodo seco en la cuenca de la quebrada Huertas en la sierra norte del país como también en las cuencas Ilave y Coata de la sierra sur respectivamente. En la misma línea Lagos et al (2008) mencionan que de manera general en la sierra peruana la época de precipitaciones comienza en septiembre terminando en mayo, con picos en los meses de enero, febrero y marzo, bajando considerablemente en abril iniciando así el periodo seco hasta agosto.

La presencia de valores atípicos en la precipitación registrada de las estaciones meteorológicas (Figura 6), guarda relación con lo señalado por Muñoz et al (2020), quienes indican que la existencia de valores atípicos en las series de precipitación se debe a anomalías asociadas a fenómenos físicos

que ocurren en el medio ambiente, por lo tanto, no deben ser omitidos en los posteriores análisis.

Los histogramas de la Figura 7 evidenciaron que, al superponer la función de distribución empírica de la precipitación registrada y una función de distribución teórica normal en cada histograma, los datos de precipitación de las estaciones estudiadas no se ajustan a una distribución normal, concordando con lo expuesto por la OMM (2018) en su guía de prácticas climatológicas, en ella se establece que por lo general los datos de precipitación se ajustan a una distribución gamma. En esa misma línea, Castro y Carvajal (2010) señalan que es importante conocer si los datos de precipitación siguen una distribución normal o no, ya que de ello depende la utilización de técnicas estadísticas cuantitativas paramétricas o no paramétricas en posteriores análisis. También indican que las pruebas o técnicas paramétricas asumen que los datos se asemejan a una distribución normal y son susceptibles a la presencia de datos atípicos, en cambio las pruebas no paramétricas no asumen supuestos de normalidad. Es por ello que, en base a los resultados obtenidos, se utilizaron pruebas o técnicas estadísticas paramétricas y no paramétricas en los posteriores análisis de estacionalidad, consistencia, homogeneidad y downscaling estadístico.

5.1.2. Análisis estacionalidad, consistencia y homogeneidad

La evaluación estadística de la estacionalidad, consistencia y homogeneidad de la precipitación registrada (1992 – 2013), determinó que las estaciones de Chirinos y Sondorillo presentan estacionalidad, por el contrario, las estaciones de Hacienda Shumaya, Tabaconas y Tuluze presentaron tendencias estadísticamente significativas con un nivel de significancia del 0.05 (Tabla 6). Castro y Carvajal (2010) mencionan que la ausencia de estacionalidad se debe a procesos asociados al cambio climático que afectan la distribución temporal y espacial de las precipitaciones.

Al estudiar la consistencia de las precipitaciones registradas con una significancia del 0.05, se encontró inconsistencia estadísticamente significativa en las medias y desviaciones estándar de las estaciones

Tabaconas y Shumaya, asimismo la estación Sondorillo solo presento inconsistencia estadísticamente significativa en su desviación estándar (Tablas 7 y 8). Según La OMM (2018) la mayoría de la información climatológica no es homogénea debido a errores aleatorios o sistemáticos que generan sesgos bruscos o graduales. Del mismo modo, Villon (2006) menciona que las inconsistencias y falta de homogeneidad son producto de factores naturales y antropogénicos que se manifiestan en forma de saltos o tendencias, afectando la estabilidad de la media y la varianza del conjunto de datos estudiado, por lo tanto, deben ser corregidos a fin de cumplir con los supuestos de estacionalidad, homogeneidad y consistencia.

Los resultados de correlación (R) superiores a 0.6 y de desviación estándar de los desvíos (D.E.D) inferiores a 0.15 respecto al vector regional (Tabla 9), demuestran que las 5 estaciones meteorológicas pertenecen a una misma zona climática, concordando con Espinoza (2005), quien menciona que valores bajos de D.E.D y valores altos y cercanos entre sí de R, demuestran que la zona en estudio es homogénea climáticamente. Por otra parte, la investigación desarrollada por Segovia (2016) llevo a obtener valores de R superiores a 0.8 y de D.E.D inferiores a 0.3 en la cuenca Rio grande, además de lograr clasificar varias zonas climáticas. Debe mencionarse que esto es posible debido al buen número de estaciones meteorológicas encontradas en dicha cuenca, siendo una limitante en la cuenca Chinchipe debido a que no se cuenta con un gran número de estaciones para un estudio más detallado de zonas climáticas.

5.1.3. Downscaling de la precipitación de los modelos de circulación global (GCM)

Los resultados de downscaling estadístico con la técnica quantile mapping utilizando métodos no paramétricos evidenciaron de manera gráfica un mayor ajuste de la distribución empírica de la precipitación modelada de los GCMs a la distribución de la precipitación registrada de las estaciones meteorológicas (Anexos 11 -70). Estos resultados demuestran que los métodos paramétricos tienen una mayor aplicabilidad. Sin embargo, tal como lo menciona Gudmundsson et al (2012) para evaluar el correcto desempeño

de los métodos paramétricos y no paramétricos se necesitan técnicas estadísticas que me permitan determinar si la precipitación modelada logró representar las características de la precipitación registrada en una misma escala temporal.

5.1.4. GCMs con mayor ajuste respecto a la precipitación registrada

Guanuchi (2015) y Vicente (2015) mencionan que dentro del conjunto de técnicas que nos permiten evaluar o validar el desempeño de un modelo se encuentran: el coeficiente de eficiencia de nash-sutcliffe (NSE), coeficiente de correlación de Pearson (R), coeficiente de determinación (R²) y error cuadrático medio (RMSE). Estas técnicas nos permitieron seleccionar los modelos con downscaling que lograron la mayor capacidad de predicción de la precipitación registrada a una escala promedio mensual multianual.

Tras la aplicación de estos indicadores estadísticos a los datos de promedio mensual multianual de los modelos ajustado, se obtuvo como resultado que HADGEM2 AO con downscaling no paramétrico logro explicar de mejor manera la distribución de la precipitación registrada de las estaciones meteorológicas de Chirinos, Tabaconas y Tuluca. Mientras que HADGEM2 AO con downscaling paramétrico logro el mayor ajuste a la distribución de la precipitación en la estación Hacienda Shumaya. Por último, CCSM4 con downscaling no paramétrico logro explicar de mejor manera los datos registrados de precipitación de la estación Sondorillo (Tablas 10 – 14).

El hecho de que la precipitación registrada de 4 de las 5 estaciones haya logrado ser explicadas de mejor manera por los métodos no paramétricos se debe según Gudmundsson et al (2012) a que estos métodos tienen la ventaja adicional de que se pueden aplicar sin necesidad de supuestos sobre la distribución de los datos y por lo tanto son recomendados para ser aplicados en la mayoría de los casos. Los hallazgos concuerdan con la investigación de Gudmundsson et al (2012) en cuyo trabajo realizado en 82 estaciones meteorológicas en Noruega determinaron que las transformaciones no paramétricas tienen la mayor habilidad para ajustar la distribución de los datos de precipitación modelada a la distribución de la precipitación

registrada. En el Perú las investigaciones de reducción de escala de precipitación llevados a cabo por Segovia (2016) en la cuenca Rio Grande y Astorayme (2017) en la cuenca río Rímac, concluyeron que los métodos no paramétricos logran el mayor ajuste de la precipitación modelada respecto a la precipitación registrada.

5.2. Tendencia de precipitación futura bajo los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y 8.5

5.2.1. Tendencia

Los resultados de tendencias de la Tabla 15, demuestran que el modelo CCSM4 apunta a que la precipitación en la estación Sondorillo no presentara tendencias significativas bajo los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5. Sin embargo, el modelo HADGEM2 AO, bajo el escenario de cambio climático RCP 4.5, proyecta en las estaciones meteorológicas Chirinos, Tabaconas, Hacienda Shumaya y Tuluca una tendencia decreciente significativa de precipitación para el futuro cercano, mientras que en el futuro lejano no existen tendencias significativas. La ausencia de tendencia en el periodo futuro lejano se explica debido a que el escenario RCP 4.5 según el IPCC (2013) logra estabilizar el forzamiento radiactivo a medida que se acerca al final del siglo XXI, lo que significa que también las emisiones de gases de efecto invernadero se estabilizan. Bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5 (Tabla 15) el modelo HADGEM2 AO proyecta tendencias decrecientes significativas de precipitación tanto para el futuro cercano como para el futuro lejano en las estaciones Chirinos, Tabaconas, Hacienda Shumaya y Tuluca. Estos resultados se explican debido a que el escenario RCP 8.5 según el IPCC (2013) contempla una emisión elevada de gases de efecto invernadero hasta finales del siglo XXI, por lo tanto, el forzamiento radiactivo va creciendo a diferencia del escenario RCP 4.5.

5.2.2. Variabilidad de la precipitación bajo los escenarios climáticos RCP 4.5 y RCP 8.5

Para un mayor entendimiento de los resultados de tendencia, se procedió a utilizar ecuaciones propuestas por SENAMHI (2013b) para el cálculo de

cambios porcentuales de precipitación. Los resultados de la Tabla 16, demuestran que el modelo HADHEM2 AO proyecta para las estaciones Chirinos, Tabaconas, Hacienda Shumaya y Tuluca un decrecimiento entre 1 % y 14.4 % bajo el escenario RCP 4.5, mientras que este decrecimiento se intensifica bajo el escenario RCP 8.5 variando entre 3 % y 28.5%. Estos resultados demuestran que bajo escenarios con grandes emisiones de gases de efecto invernadero se experimentarían las mayores variabilidades en la precipitación de la cuenca Chinchipe. Además, estos hallazgos concuerdan con los encontrados por Acuña et al (2019), quienes trabajaron en escenarios de cambio climático con la familia de modelos HADGEM2 en los andes centrales del Perú, encontrando una reducción de la precipitación del 10% bajo el escenario RCP 8.5 para el periodo 2016 – 2045. Cabe acotar que el análisis gráfico de la precipitación media mensual multianual (Anexos 76 – 80) demuestra que la variabilidad proyectada por el modelo HADGEM2 AO bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 corresponde a decrecimientos en los meses lluviosos de noviembre, diciembre, enero y febrero para las estaciones Chirinos, Tabaconas, Hacienda Shumaya y Tuluca. Estos resultados se relacionan a los encontrados por Acuña et al (2019) quienes al utilizar la familia de modelos HADGEM2 en los andes centrales del Perú encontraron una disminución de la precipitación para en los meses de diciembre, enero y febrero bajo el escenario RCP 8.5 para el periodo 2016 – 2045.

Basados en los resultados obtenidos podemos inferir que la cuenca Chinchipe bajo el escenario de cambio climático RCP 4.5 experimentaría una tendencia significativa decreciente de precipitación en el futuro cercano, este comportamiento llegaría a ser estacionario en el futuro lejano. Sin embargo, bajo el escenario RCP 8.5 la cuenca experimentaría tendencias decrecientes tanto para el futuro cercano como para el futuro lejano. Palomino (2016) en su estudio de proyecciones de cambio climático para la precipitación en América tropical utilizando técnicas de downscaling estadístico a 20 GCM del proyecto CMIP5, encontró una disminución de la precipitación para los escenarios RCP 4.5 Y 8.5 para el periodo 2071 – 2100. Teniendo en cuenta que los modelos utilizados en el presente estudio pertenecen al proyecto

CMIP5 podemos establecer que los resultados de Palomino (2016) guardan relación con las tendencias decrecientes de precipitación encontradas en la cuenca Chinchipe.

5.3. Sequía meteorológica futura bajo los escenarios climáticos RCP 4.5 Y 8.5

Los resultados de las Tablas 17 – 21, demuestran que bajo el escenario de cambio climático RCP 4.5 los modelos HADGEM2 AO y CCSM4 proyectan la ocurrencia de un mayor número de eventos de sequías de intensidad extrema para el futuro lejano en las estaciones Chirinos, Tabaconas, Sondorillo, Hacienda Shumaya y Tuluze. Por otra parte, bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5 las estaciones experimentarían una mayor ocurrencia de eventos de intensidad extrema en el futuro cercano, en cambio para el futuro lejano habrá un mayor número de eventos de sequías de intensidad severa. SENAMHI (2013a) manifiesta que los efectos del cambio climático se ven reflejados en la presencia de eventos extremos de sequías.

Basados en los resultados obtenidos podemos inferir que la cuenca Chinchipe bajo el escenario de cambio climático RCP 4.5, experimentaría un mayor número de eventos de sequía severa en el futuro cercano, en cambio los eventos de sequía extrema prevalecerían en el futuro lejano. El escenario RCP 8.5 plantea un mayor número de sequías extremas en el futuro cercano, intensificándose las sequías severas para el futuro lejano. Las investigaciones realizadas por Segovia (2016) en la cuenca Río Grande y Córdova (2015) en la cuenca Chancai-Huaral bajo las proyecciones del GCM MRI evidencian que para el periodo 2080 – 2099 la cuenca Río Grande experimentaría una ocurrencia menor de sequías extremas, esto también se refleja para el periodo 2034 – 2094 de la cuenca Chancai-Huaral con episodios secos que no llegan a índices extremos. Estos resultados guardan relación con los encontrados por la presente investigación en la cuenca Chinchipe.

Por último, los resultados obtenidos a futuro tanto de tendencia de precipitación y los eventos de sequía determinados, presentan incertidumbre asociada a los modelos de circulación global y los métodos de downscaling estadísticos utilizados, tal y como lo expresa SENAMHI (2013b): las proyecciones del comportamiento del clima futuro poseen dosis de incertidumbre. Sin embargo, son herramientas que nos permiten conocer los posibles desafíos a los que nos enfrentaremos en el futuro.

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

La aplicación del downscaling estadístico con métodos paramétrico y no paramétrico de la técnica quantile mapping demostró lograr ajustar las funciones de distribución de la precipitación modelada de los GCMs (HADGEM2 AO, HADGEM2 ES, HADGEM2 CC, MIROC5, CCSM4 y MPI ESM LR) a la función de distribución de la precipitación registrada de las 5 estaciones meteorológicas estudiadas de la cuenca Chinchipe. Mediante indicadores estadísticos se determinó que el modelo HADGEM2 AO con downscaling no paramétrico logro el mayor ajuste con la precipitación registrada de las estaciones Chirinos, Tabaconas y Tuluze. El mismo modelo, pero con downscaling paramétrico logro representar de mejor manera la precipitación de la estación Hacienda Shumaya. Por último, el modelo CCSM4 con downscaling no paramétrico logro el mayor ajuste con los la precipitación de la estación Sondorillo.

Bajo el escenario de cambio climático RCP 4.5 el modelo HADGEM2 AO proyectó para las estaciones Chirinos, Tabaconas, Hacienda Shumaya y Tuluze tendencias significativas decrecientes de precipitación para el futuro cercano (2030 – 2059) mientras que de estacionalidad para el futuro lejano (2070 – 2099). EL mismo modelo bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5 proyecto tendencias significativas decrecientes tanto en el futuro cercano como lejano para las estaciones anteriormente nombradas. Por otra parte, el modelo CCMS4 bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 no proyecta tendencias significativas tanto en el futuro cercano como en el futuro lejano para la estación Sondorillo.

Los modelos HADGEM2 AO y CCSM4 proyectan que bajo el escenario climático RCP 4.5, todas las estaciones estudiadas experimentarán una mayor ocurrencia de eventos de sequía severa para el futuro cercano, mientras que para el futuro lejano prevalecerán las sequías extremas. Mientras que bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5 los modelos proyectan un mayor número de eventos de sequías extremas el futuro cercano, en cambio, en el futuro lejano prevalecerán las sequías severas.

Basados en los resultados puntuales de las estaciones estudiadas, se concluye que la cuenca Chinchipe experimentara bajo el escenario de cambio climático RCP 4.5 tendencias decrecientes de precipitación que se estabilizaran en el futuro lejano. Sin embargo, bajo el escenario RCP 8.5 esta tendencia decreciente de precipitación se mantendrá tanto en el futuro cercano como el futuro lejano. Finalmente, la cuenca experimentara bajo el escenario RCP 4.5 un mayor número eventos de sequía severa en el futuro cercano, en cambio los eventos de sequía extrema prevalecerán en el futuro lejano. El escenario RCP 8.5 plantea que la cuenca experimentara un mayor número de sequías extremas en el futuro cercano, intensificándose las sequías severas para el futuro lejano.

6.2. Recomendaciones

Al SENAMHI, se sugiere ampliar el número de estaciones meteorológicas en la cuenca Chinchipe, con la finalidad de contar con una mayor cantidad de información hidrometeorológica que facilite los procesos de modelamiento para comprender las características climatológicas futuras de la cuenca.

Para los investigadores que pretendan realizar estudios de la misma naturaleza, se recomienda utilizar varias técnicas de downscaling estadístico con los datos proporcionados por los GCMs del proyecto CMIP5 y del reciente CMIP6, con la finalidad de encontrar modelos que describan de mejor manera el clima del Perú.

A las personas interesadas en profundizar en este tipo de estudios, se sugiere utilizar diferentes índices de sequía y realizar comparaciones, para de esta manera ampliar la investigación y lograr resultados más precisos.

A las universidades e instituciones de nuestra región Cajamarca se recomienda realizar estudios de la misma modalidad en las cuencas, con la finalidad de obtener datos más precisos del comportamiento futuro de las variables climáticas, lo cual permitirá adoptar estrategias en la gestión de los recursos hídricos.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Acuña, Flores, Llacza y Rorher . (2019). Escenarios futuros de cambio climático desde modelos globales para localidades de los Andes centrales. *Anales Científicos*, 80 (2), 476-494. <http://dx.doi.org/10.21704/ac.v80i2.1482>
- Astorayme, M. A. (2017). Configuración de modelos climáticos, hidrológicos e hidráulicos en la cuenca del río Rímac, Perú. [Tesis para optar el grado de Magister, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio institucional de la Pontificia Universidad Católica del Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/8506>
- Alves, T.L.B., Azevedo, P.V. y Farias, A.A. (2015). Comportamento da precipitação pluvial e sua relação com o relevo nas microrregiões do Cariri Oriental e Ocidental do estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 8(6), 1601-1614.
- Castro y Carvajal. (2010). Análisis de tendencia y homogeneidad de series climatológicas. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, (9),15-25. ISSN: 1692-9918. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=231116434002>
- Córdova. (2015). Análisis de la precipitación futura en la cuenca Chancay-Huaral mediante el modelo GCM-MRI. [Tesis para optar el título profesional, Universidad Nacional Agraria la Molina]. Repositorio institucional Universidad Nacional Agraria la Molina. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/2174>

- Díaz. (2013). Estudio de Caracterización Climática de la Precipitación Pluvial y Temperatura del aire para las Cuencas de los ríos Coata e Ilave. SENAMHI.
- Espinoza. (2005). Manual escrito con motivo del curso taller: Utilización del método del Vector Regional con HYDRACCESS. SENAMHI – Perú. Septiembre 2005. Colaboración de Philippe Vauchel (IRD-Peru) y Josyane Ronchail (UP7 –LOCEAN, Paris)
- Florian, Salas y Builes. (2021). Análisis de la precipitación y la evaporación en el Orinoco colombiano según los modelos climáticos regionales del experimento CORDEX-CORE. *TecnoLógicas*, vol. 24, nro. 52, e2144, 2021. <https://doi.org/10.22430/22565337.2144>
- Guanuchi, J. C. (2015). Análisis comparativo de downscaling estadístico y dinámico en las cuencas de los ríos Paute y Jubones. [Tesis para optar el título profesional, Universidad de Cuenca]. Repositorio institucional Universidad de Cuenca. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/21352>
- Gudmundsson, L. (2016). Statistical Transformations for Post-Processing Climate Model Output. Repository CRAN. <https://cran.r-project.org/web/packages/qmap/qmap.pdf>
- Gudmundsson, L., Bremnes, J. B., Haugen, J. E. y Engen-Skaugen, T. (2012). Technical Note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations; A comparison of methods. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3383-3390.
- IPCC. (2018). Anexo I: Glosario [Matthews J.B.R. (ed.)]. En: Calentamiento global de 1,5 °C, Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza [Masson-Delmotte V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R.

Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor y T. Waterfield (eds.)).

IPCC. (2013). 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. Cambridge University Press.

Lagos, Silva, Nickl y Mosquera. (2008). El Niño? related precipitation variability in Perú. *Advances in Geosciences*, European Geosciences Union, 14, pp.231-237. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00297103>

Llerena, Cruz-Burga, Durt, Marcelo-Peña, Martínez y Ocaña. (2010). Gestión ambiental de un ecosistema frágil. Los bosques nublados de San Ignacio, Caja- marca, cuenca del río Chinchipe. *Soluciones Prácticas*, Lima.

Madrigal, Flores, Solera y Andreu. (2017). Corrección del sesgo en los estadísticos de las series de precipitación de cambio climático, en la cuenca del río Angulo. <https://www.researchgate.net/publication/317400970>

Moya, Ortega y Jurado. (2015). Evaluación del Modelo Climático Global MIROC5 y estimaciones de temperatura y precipitaciones para las zonas sur y norte del Perú. *Apuntes de Ciencia & Sociedad*, 5(2), 188–195. <http://dx.doi.org/10.18259/acs.2015028>

Muñoz, Bedoya y Rincón. (2020). Aplicación de redes neuronales para la reconstrucción de series de tiempo de precipitación y temperatura utilizando información satelital. *Revista EIA*, 17(34), julio - diciembre, Reia34008. <https://doi.org/10.24050/reia.v17i34.1292>

OMM. (2018). Guía de prácticas climatológicas. Suiza. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10027

OMM. (2012). Índice normalizado de precipitación Guía del usuario.

Palomino. (2016). Proyecciones de cambio climático para la precipitación en América tropical mediante técnicas de downscaling estadístico. [Tesis para optar el

- grado de Doctor, Universidad de Granada]. Repositorio institucional Universidad de Granada. <http://hdl.handle.net/10481/41555>
- Rivasplata. (2019). Generación de escorrentía superficial a partir de información climática en la cuenca de la quebrada Huertas – Chilete, Cajamarca. [Tesis para optar el título profesional, Universidad Nacional de Cajamarca]. Repositorio institucional Universidad Nacional de Cajamarca. <http://repositorio.unc.edu.pe/handle/UNC/3580>
- Segovia, K. S. (2016). Precipitación estimada y sequía meteorológica futura en la cuenca río Grande mediante el modelo de circulación global MRI. [Tesis para optar el título profesional, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio institucional Universidad Nacional Agraria la Molina. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/2489>
- SENAMHI. (2021). Climas del Perú – Mapa de clasificación climática nacional. <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01404SENA-4.pdf>
- SENAMHI. (2016). Ciclos horarios de precipitación en el Perú utilizando información satelital. <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01401SENA-34.pdf>
- SENAMHI. (2013a). Caracterización de periodos secos y húmedos cuenca del río Rímac. <https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/637>
- SENAMHI. (2013b). Evaluación de los modelos CMIP5 del IPCC en el Perú: proyecciones al año 2030 en la región Puno, reporte ejecutivo. <https://hdl.handle.net/20.500.12542/225>
- Vicente. (2015). Proyección de la lluvia futura para las cuencas del sur del Perú usando modelos de circulación global CMPI3 Y MRI. [Tesis para optar el título profesional, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio institucional Universidad Nacional Agraria la Molina.
- Villon. (2006). Hidrología estadística. Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Wilby, R.L., Charles, S.P., Zorita, E., Timbal, B., Whetton, P. y Mearns, L.O. (2004). Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical

downscaling methods. Supporting Material of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

DEDICATORIA

A Dios; por ser mi guía y fortaleza en todo momento.

A mis padres Santos y Medalit; por su cariño, apoyo incondicional, enseñanzas y valores inculcados.

A mis hermanos Joseph, Aaron y Marcos; por brindarme palabras de aliento y porque son mi alegría e inspiración para ser mejor cada día.

Sanderson Campos Ruiz

A Dios por iluminar mi camino y permitirme lograr mis metas.

A mis padres Nelly y Elmer por la buena educación y los valores inculcados, por ser el apoyo incondicional en mi proceso de formación universitaria.

A mis abuelos Melania y Aurelio por la formación que me brindaron en mis primeros años de vida.

A mi hermano Elmer Armando por hacerme sentir la responsabilidad de hermano mayor y ser su ejemplo.

Franciss Miguel Tapia Jiménez

AGRADECIMIENTO

A nuestros asesores; Dr. Lenin Quiñones Huatangari y Mg. Candy Lisbeth Ocaña Zúñiga por sus orientaciones en el desarrollo de la investigación, por compartir sus conocimientos y brindarnos su apoyo, muchas gracias.

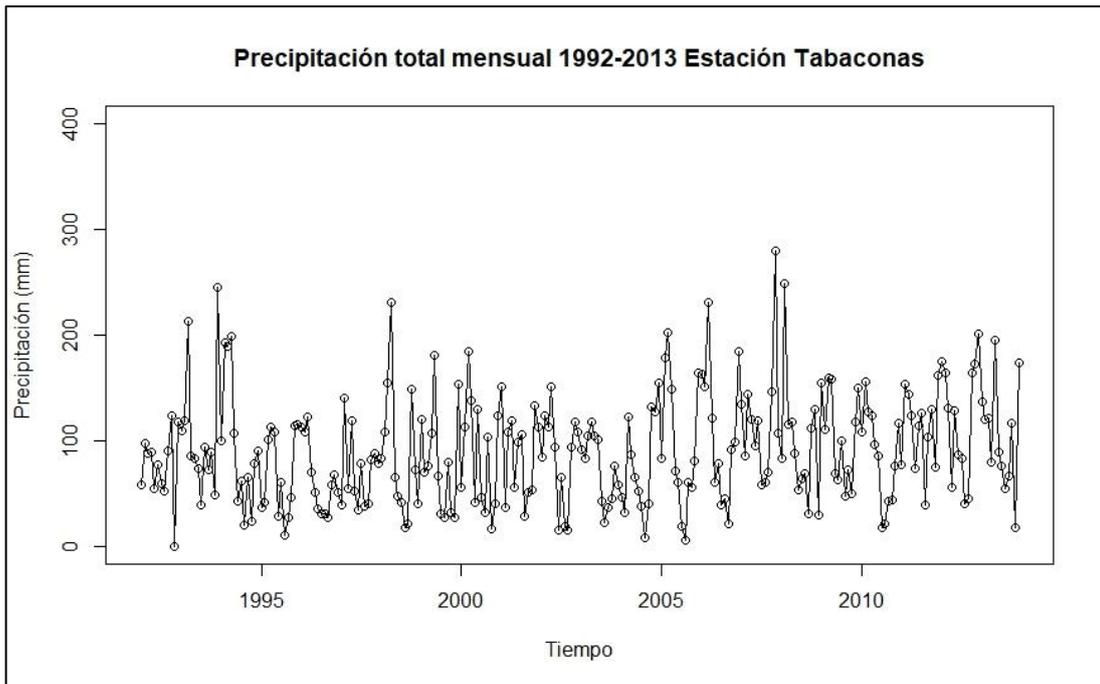
Sanderson Campos Ruiz

A nuestros asesores Dr. Lenin Quiñones Huatangari y Mg. Candy Lisbeth Ocaña Zúñiga por la orientación y apoyo en el proceso de desarrollo de esta investigación, a mi compañero Sanderson Campos por que logramos sacar adelante este trabajo. ¡Muchas gracias!

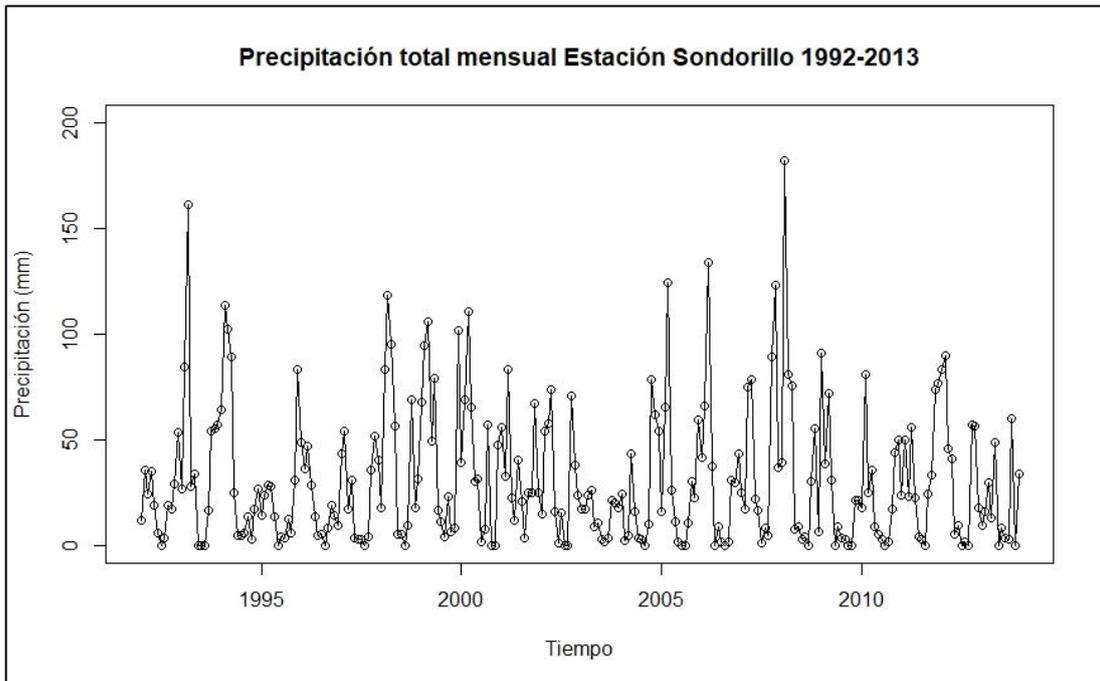
Franciss Miguel Tapia Jiménez

ANEXOS

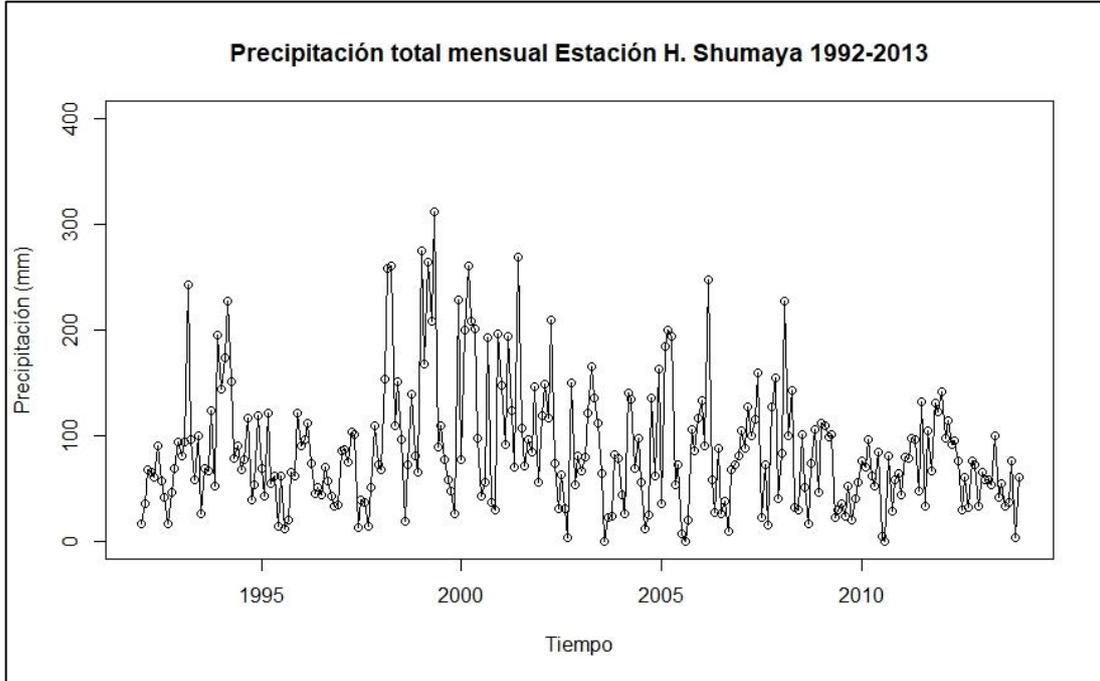
Anexo 1. Serie de tiempo de datos registrados estación meteorológica Tabaconas



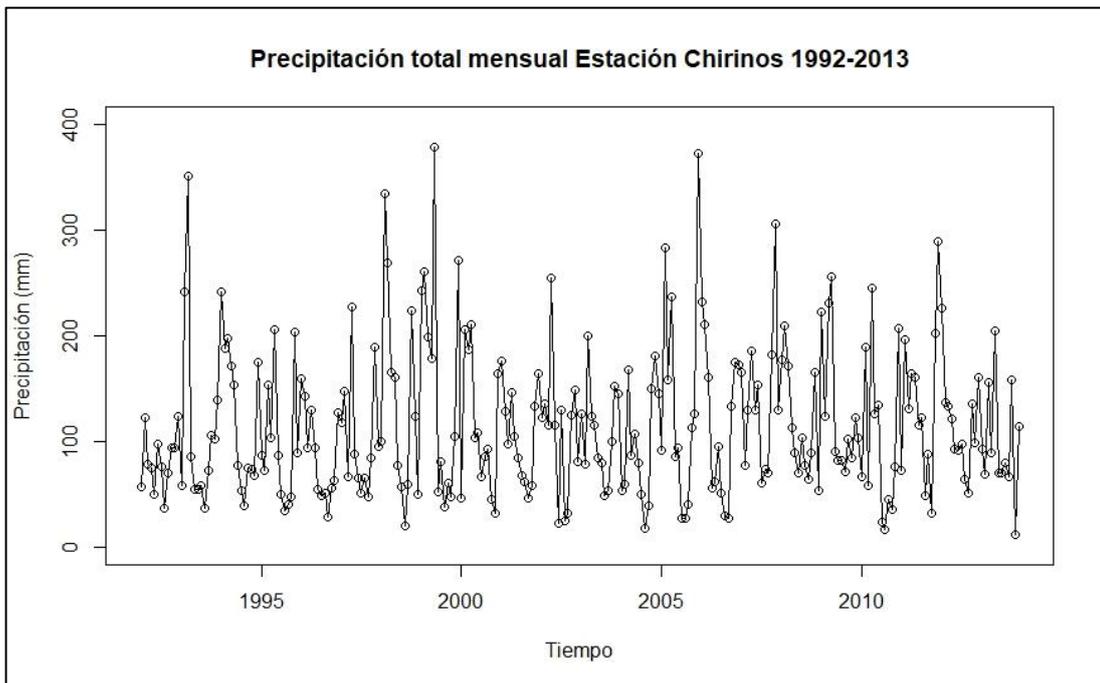
Anexo 2. Serie de tiempo de datos registrados estación meteorológica Sondorillo



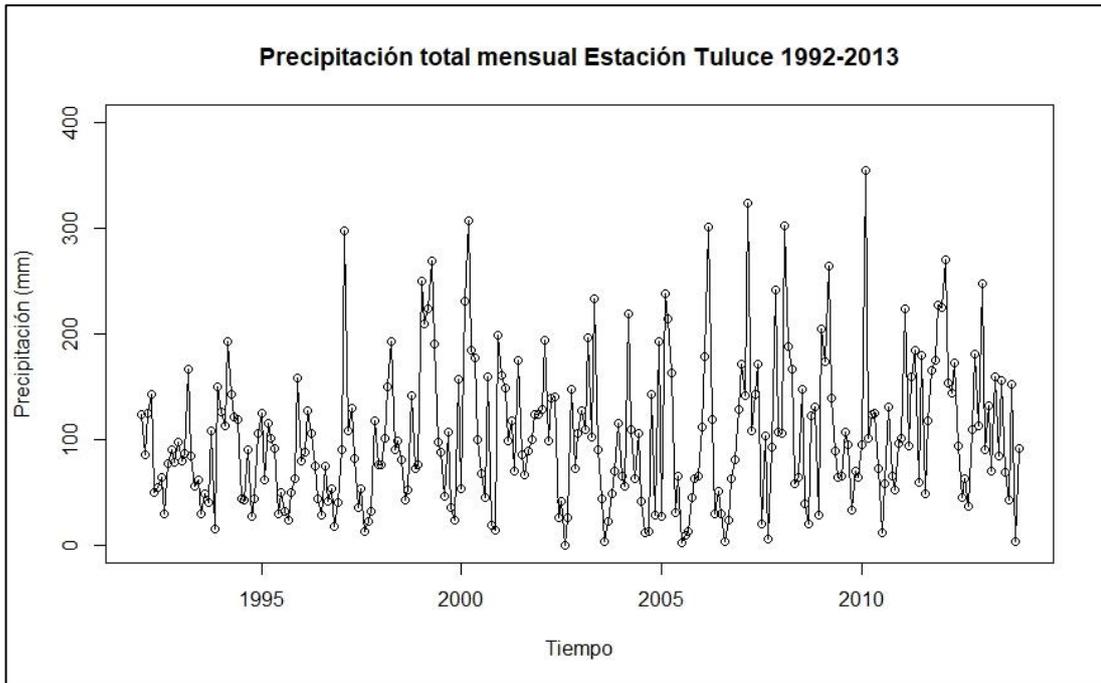
Anexo 3. Serie de tiempo de datos registrados estación meteorológica Hacienda Shumaya



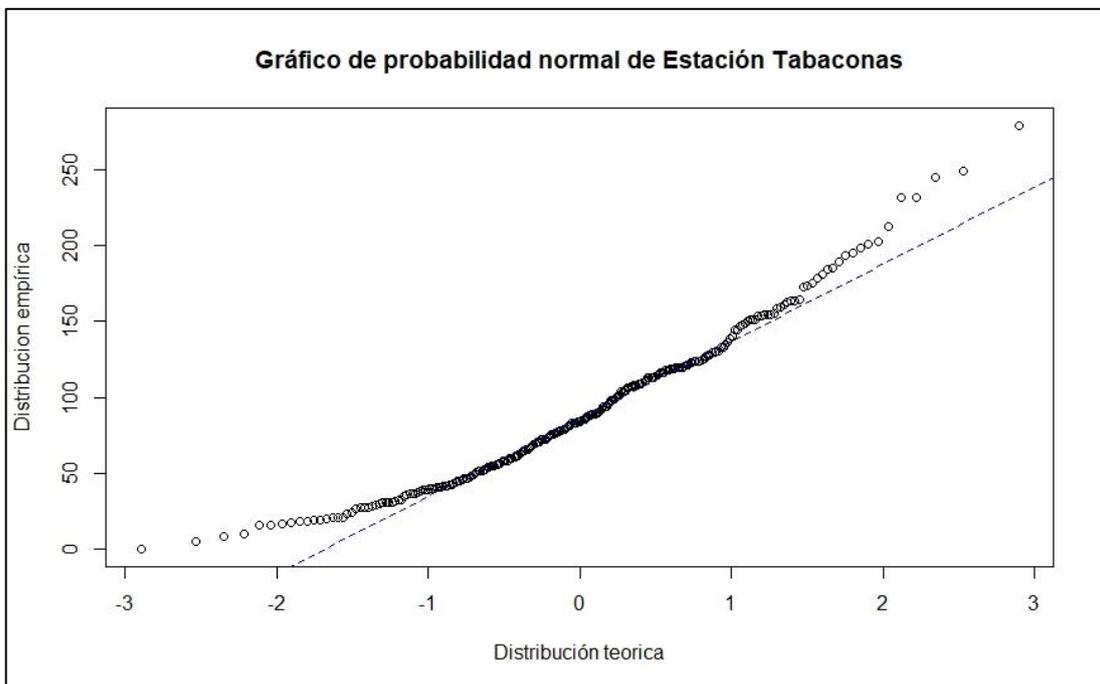
Anexo 4. Serie de tiempo de datos registrados estación meteorológica Chirinos



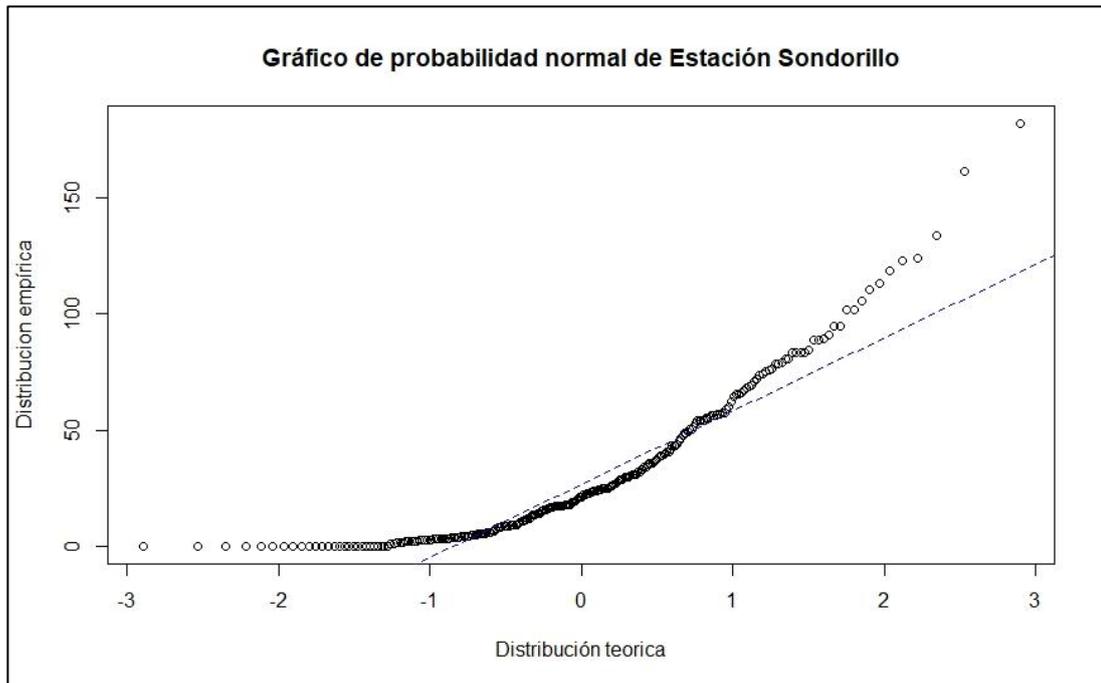
Anexo 5. Serie de tiempo de datos registrados estación meteorológica Tuluca



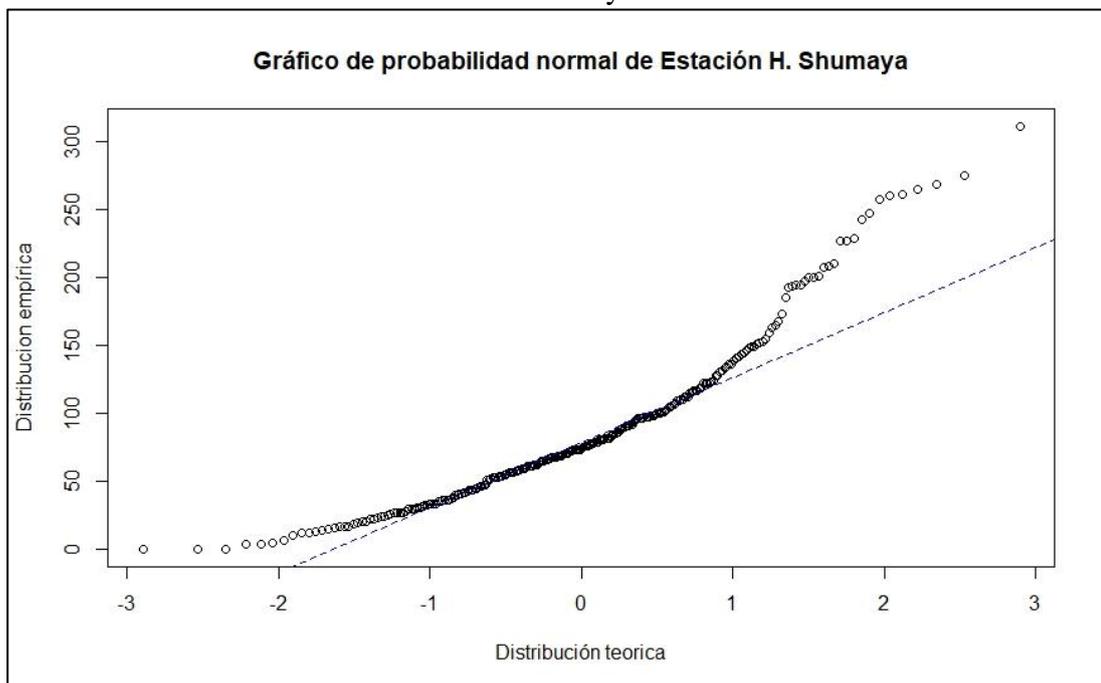
Anexo 6. Distribución empírica de la precipitación registrada estación Tabaconas



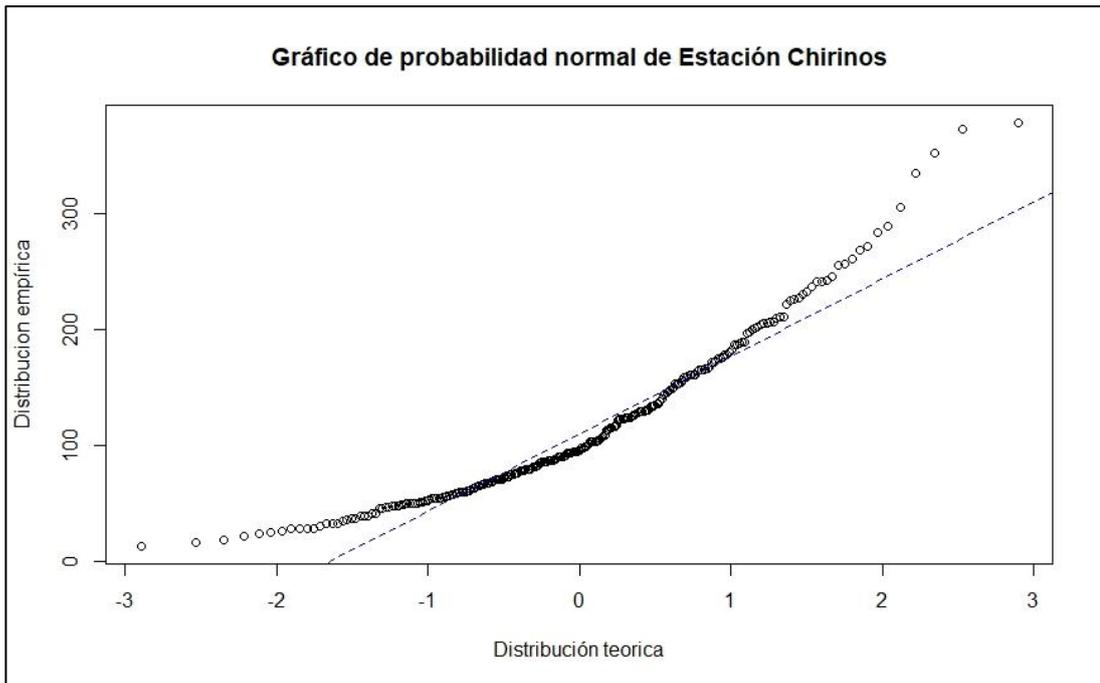
Anexo 7. Distribución empírica de la precipitación registrada estación Sondorillo



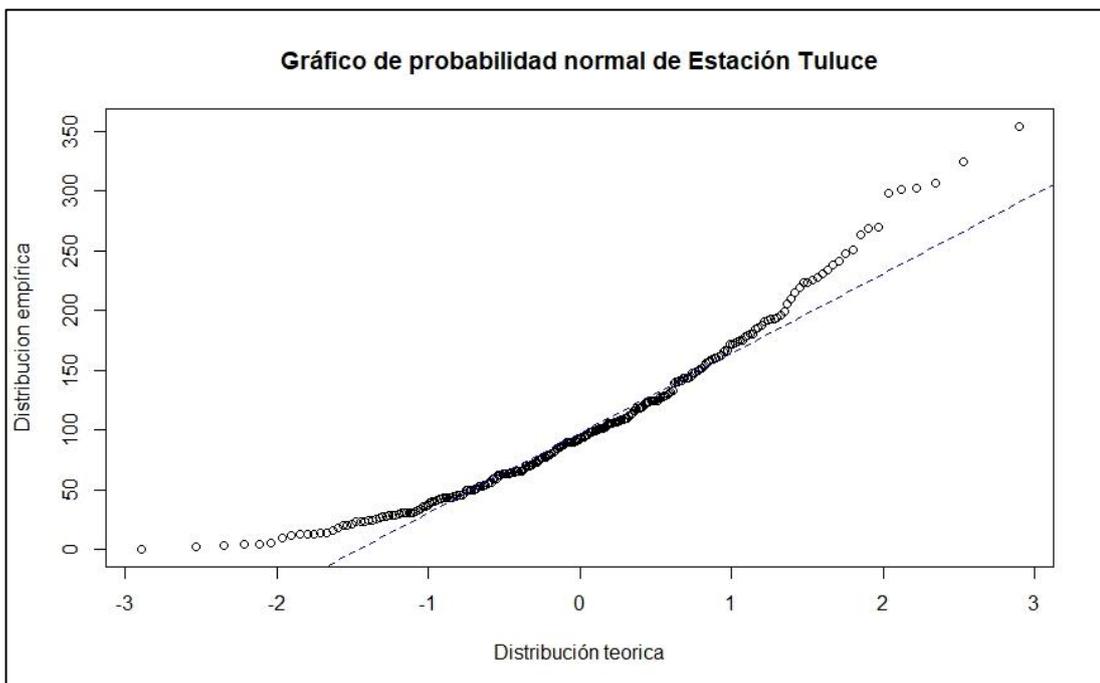
Anexo 8. Distribución empírica de la precipitación registrada estación Hacienda Shumaya



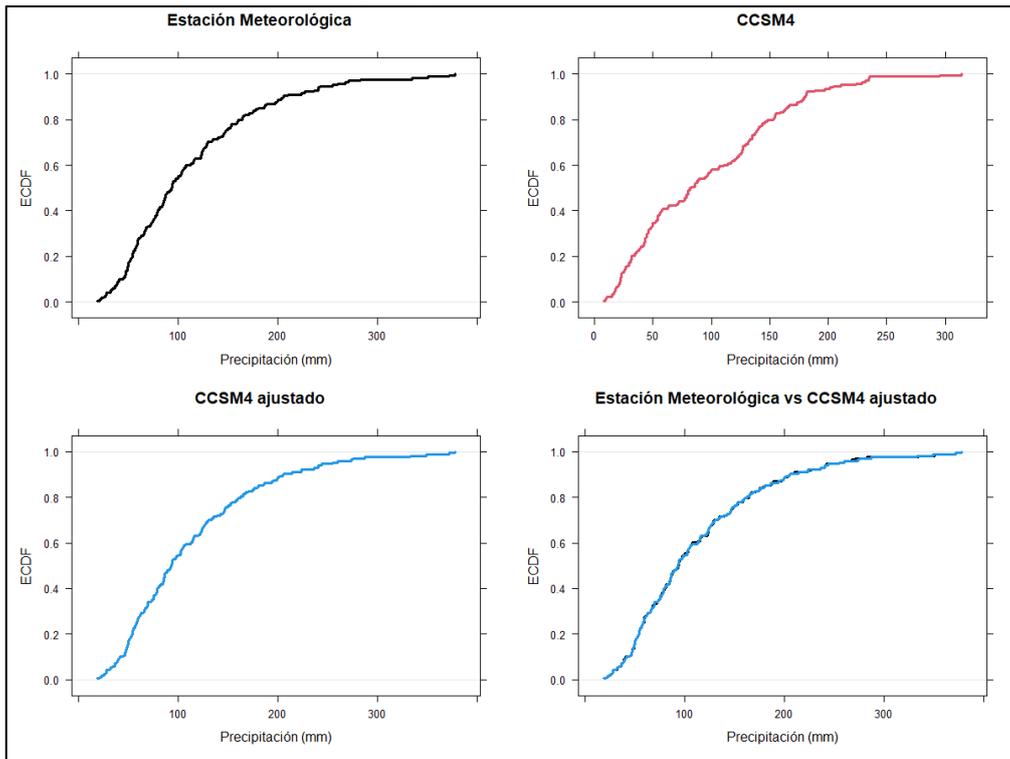
Anexo 9. Distribución empírica de la precipitación registrada estación Chirinos



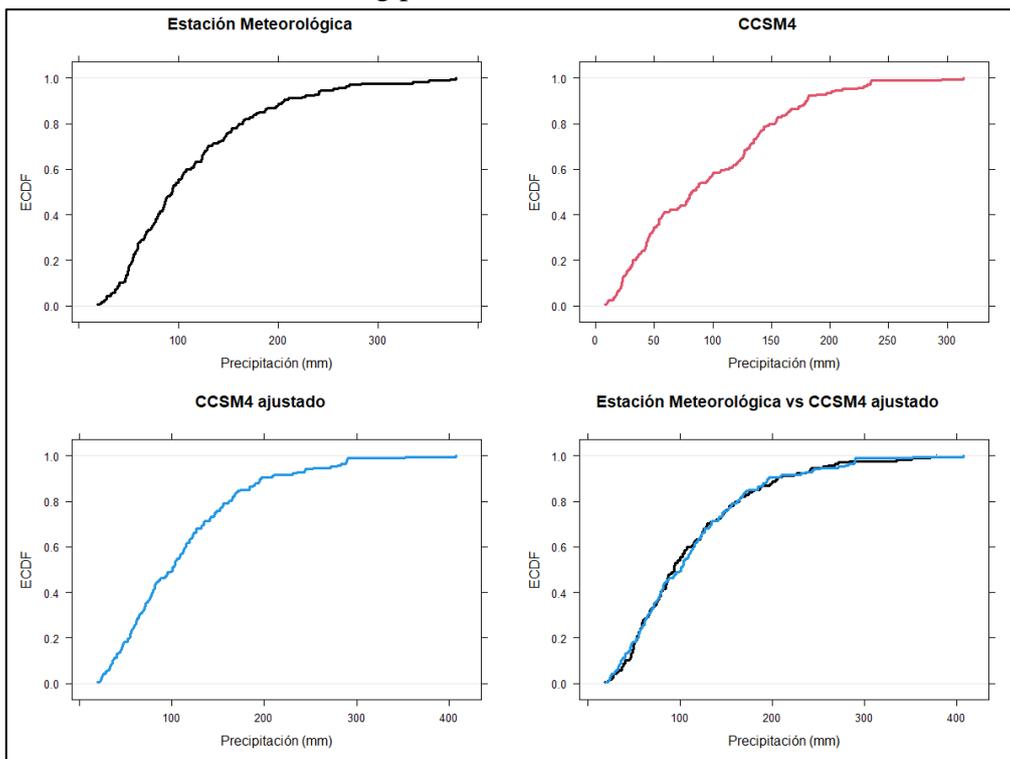
Anexo 10. Distribución empírica de la precipitación registrada estación Tuluce



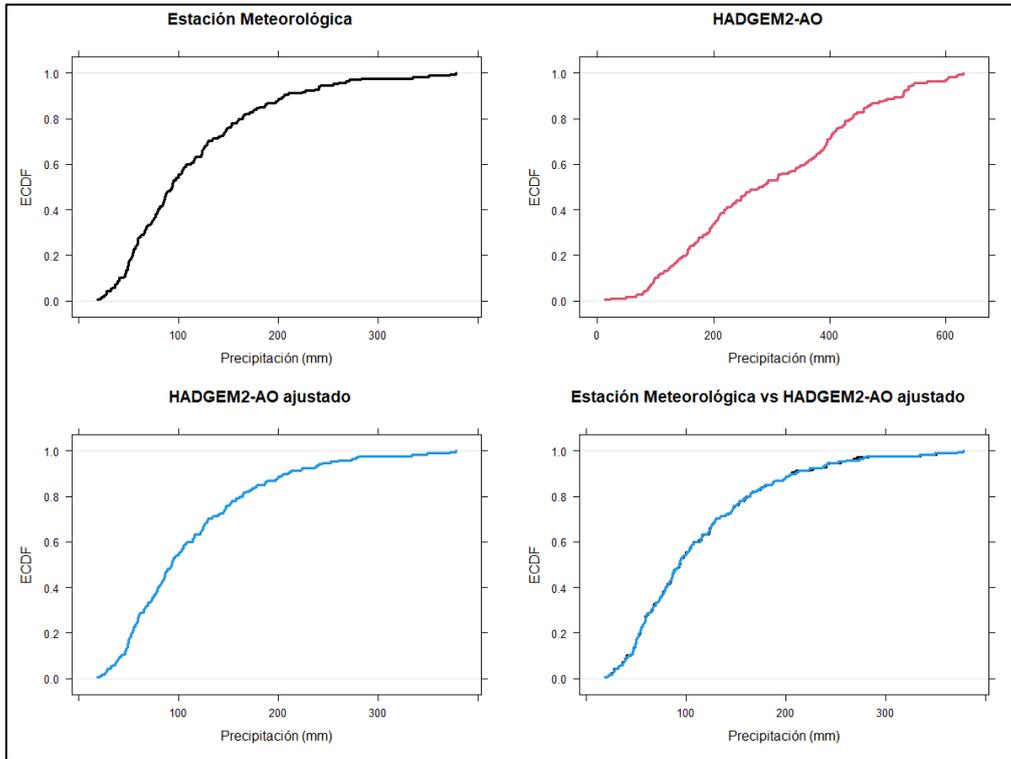
Anexo 11. Downscaling no paramétrico de CCSM4 en torno estación Chirinos



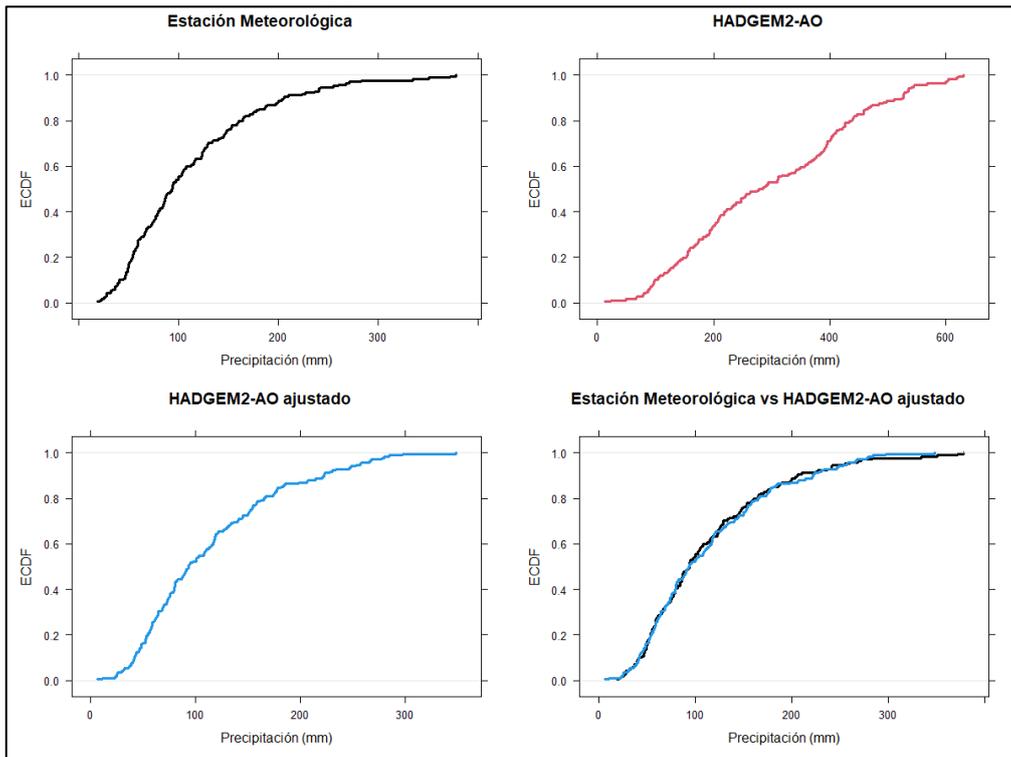
Anexo 12. Downscaling paramétrico de CCSM4 en torno estación Chirinos



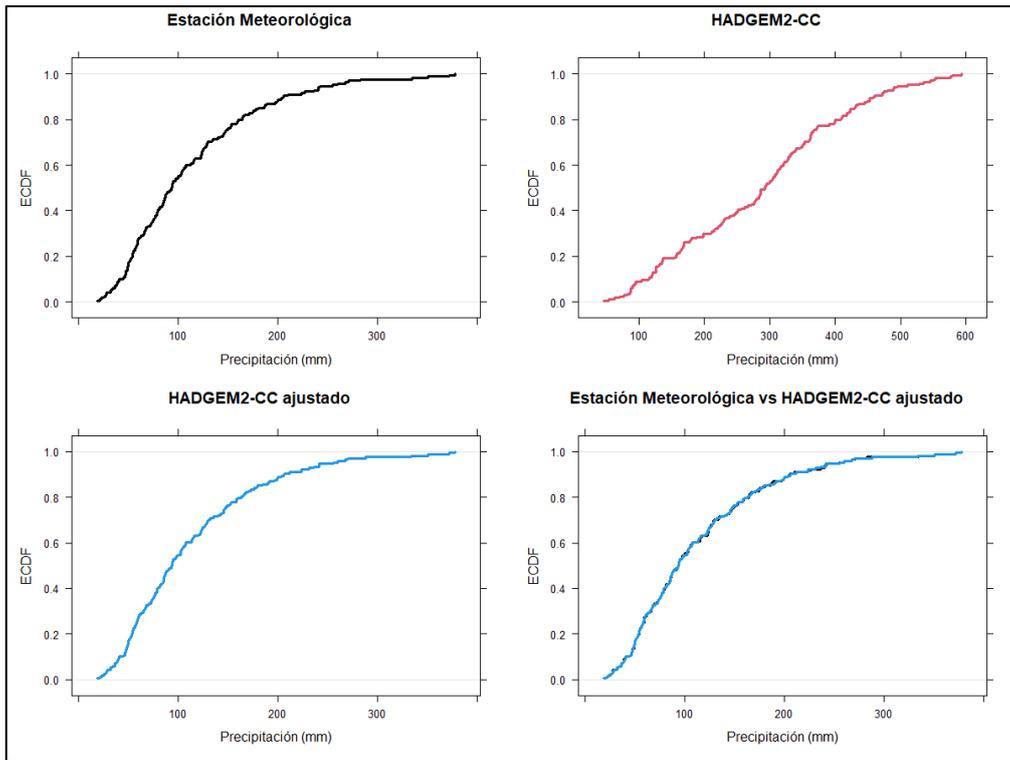
Anexo 13. Downscaling no paramétrico de HADGEM2 AO en torno estación Chirinos



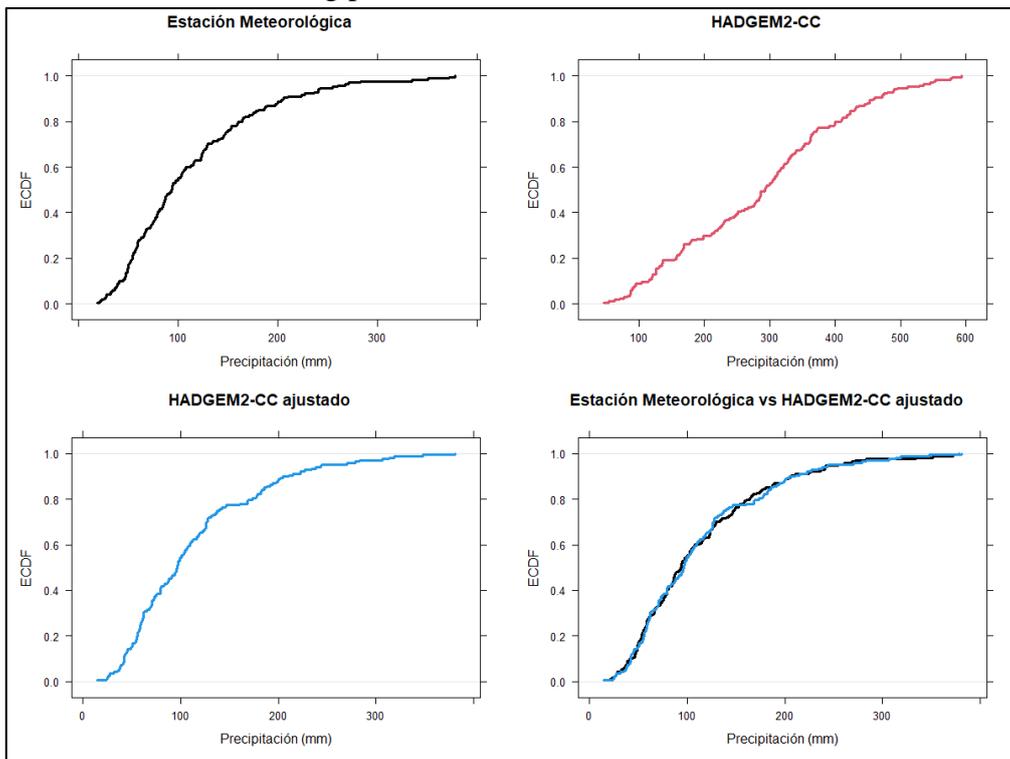
Anexo 14. Downscaling paramétrico de HADGEM2 AO en torno estación Chirinos



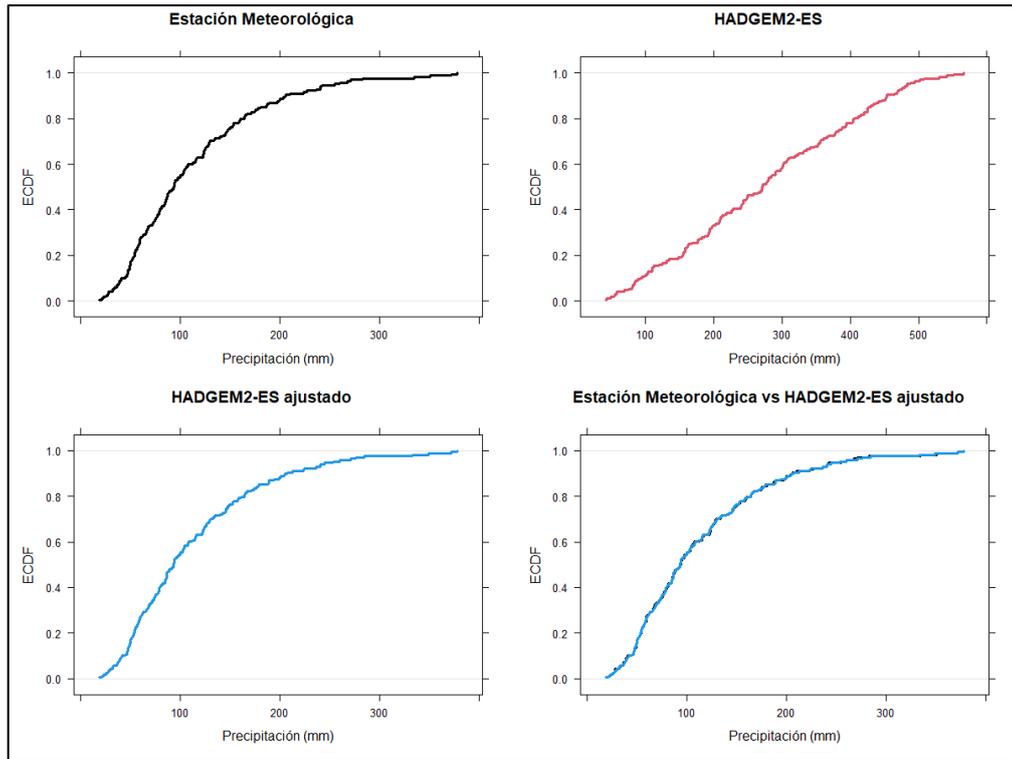
Anexo 15. Downscaling no paramétrico de HADGEM2 CC en torno estación Chirinos



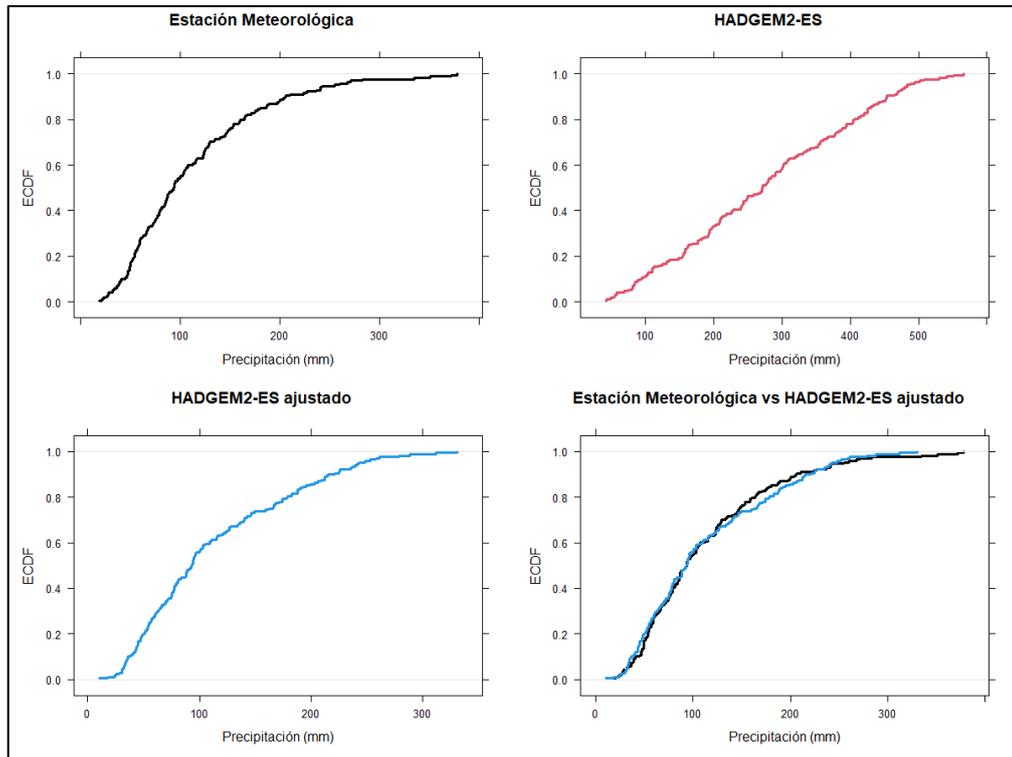
Anexo 16. Downscaling paramétrico de HADGEM2 CC en torno estación Chirinos



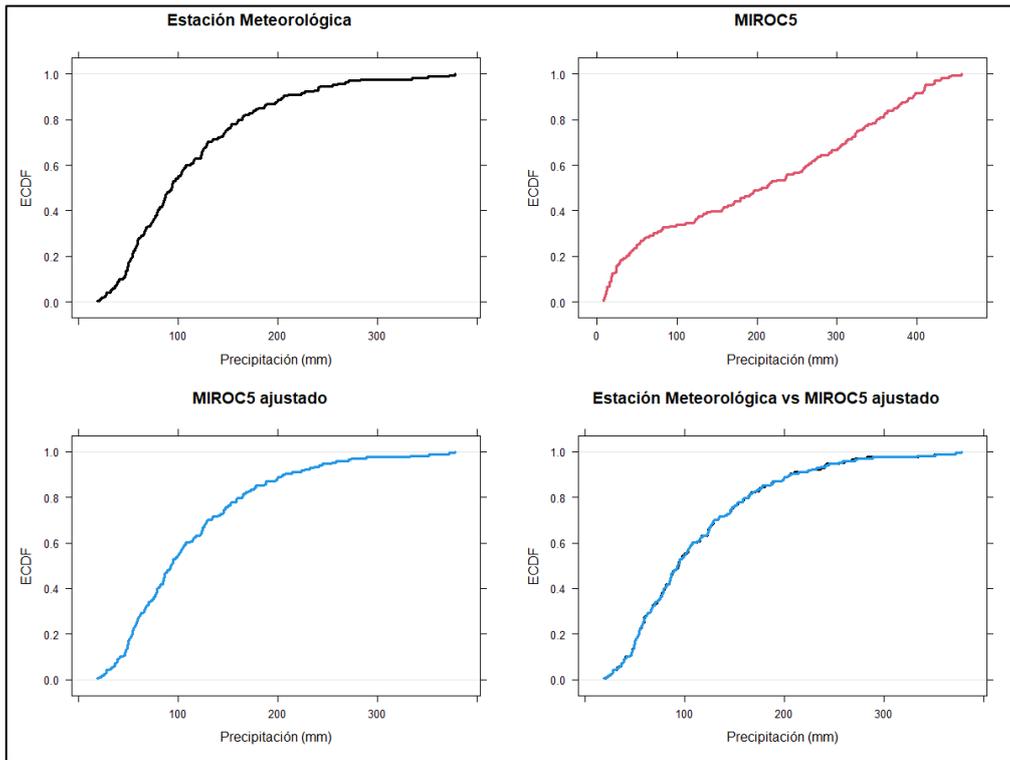
Anexo 17. Downscaling no paramétrico de HADGEM2 ES en torno estación Chirinos



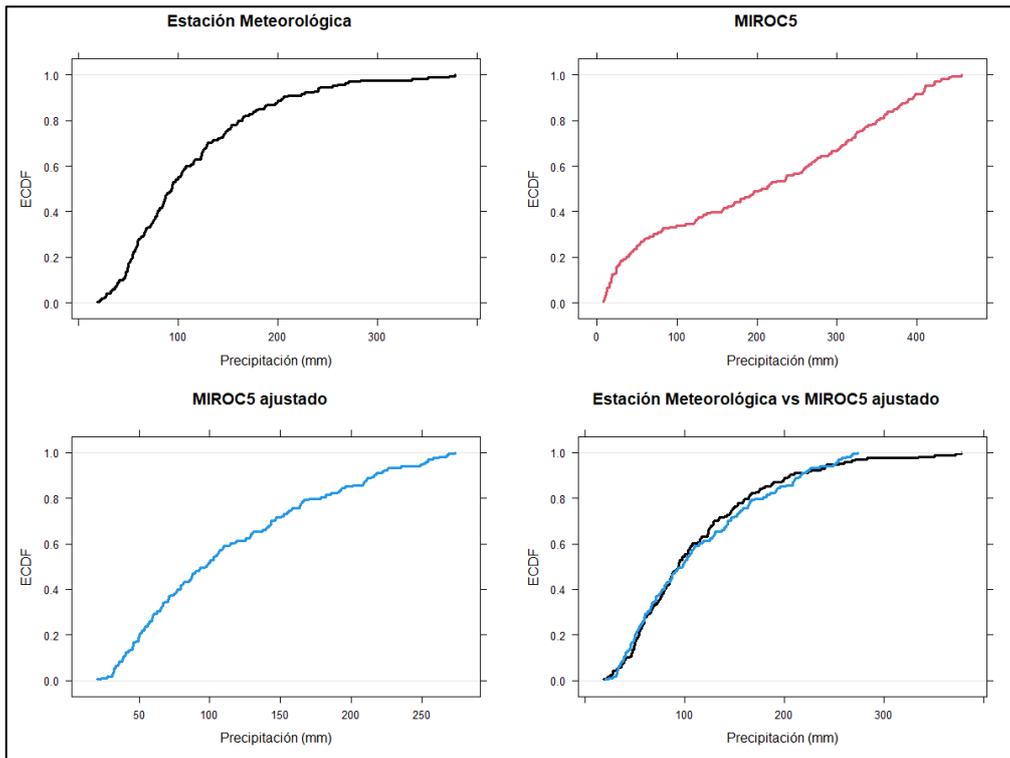
Anexo 18. Downscaling paramétrico de HADGEM2 ES en torno estación Chirinos



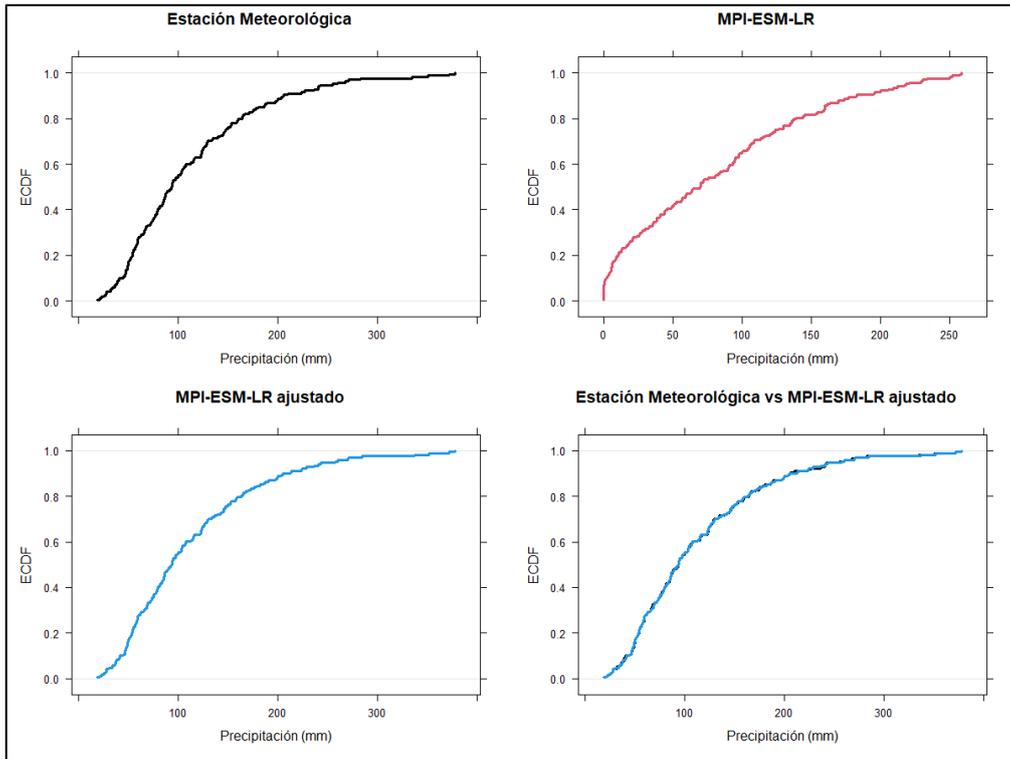
Anexo 19. Downscaling no paramétrico de MIROC5 en torno estación Chirinos



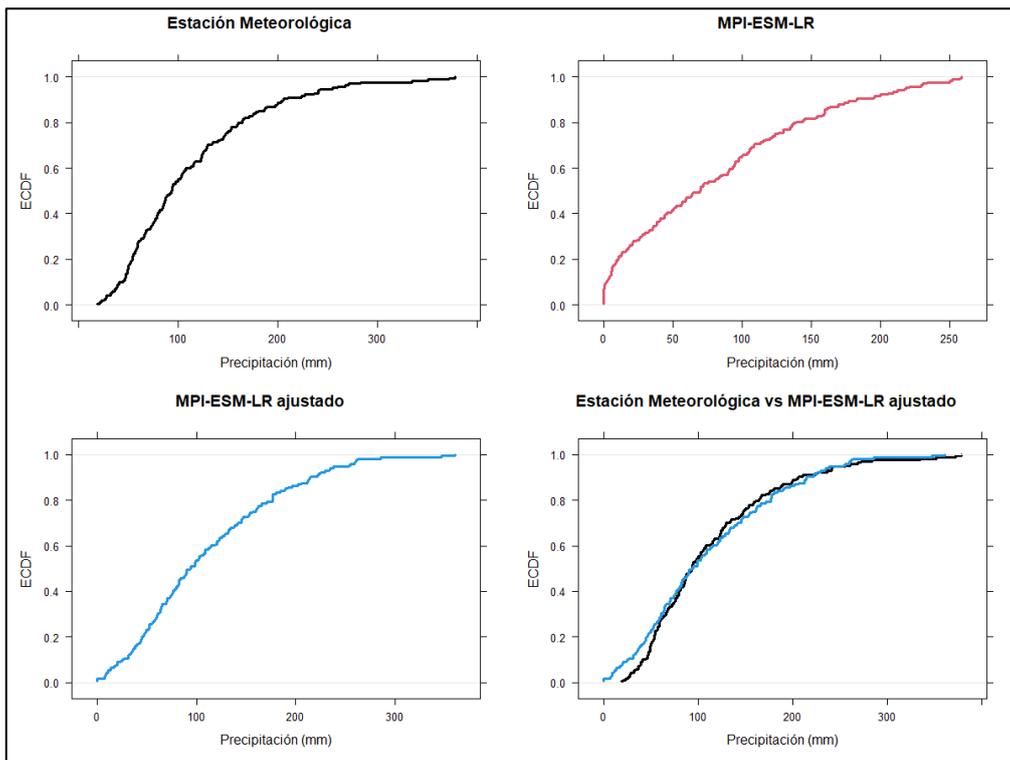
Anexo 20. Downscaling paramétrico de MIROC5 en torno estación Chirinos



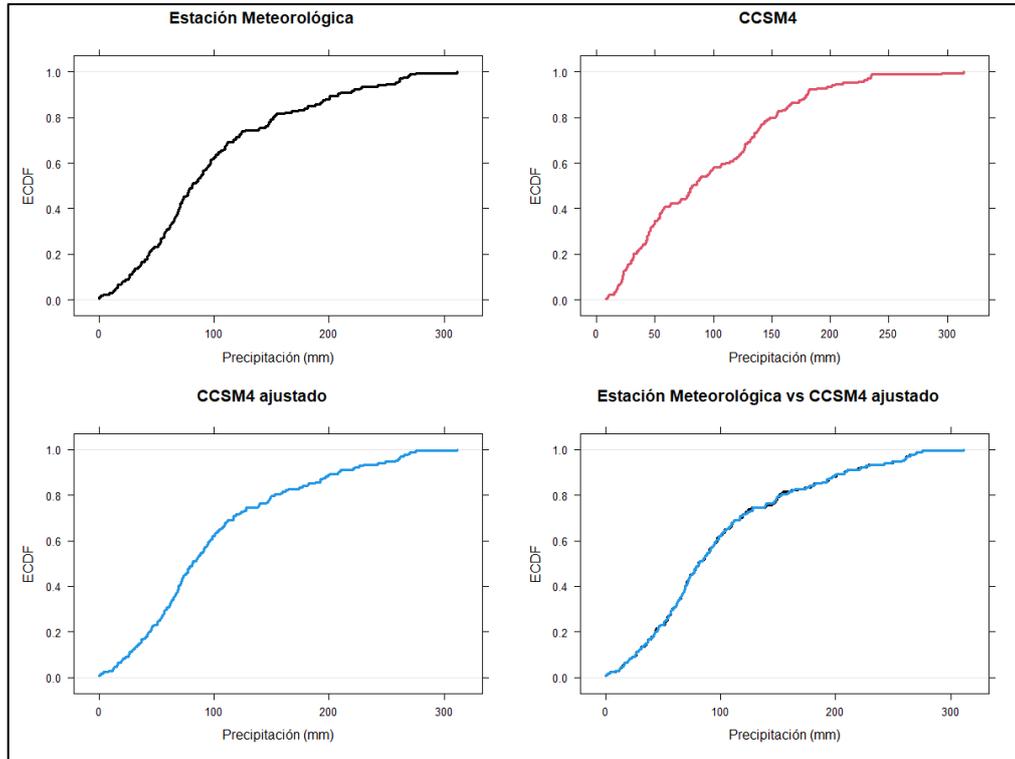
Anexo 21. Downscaling no paramétrico de MPI ESM LR en torno estación Chirinos



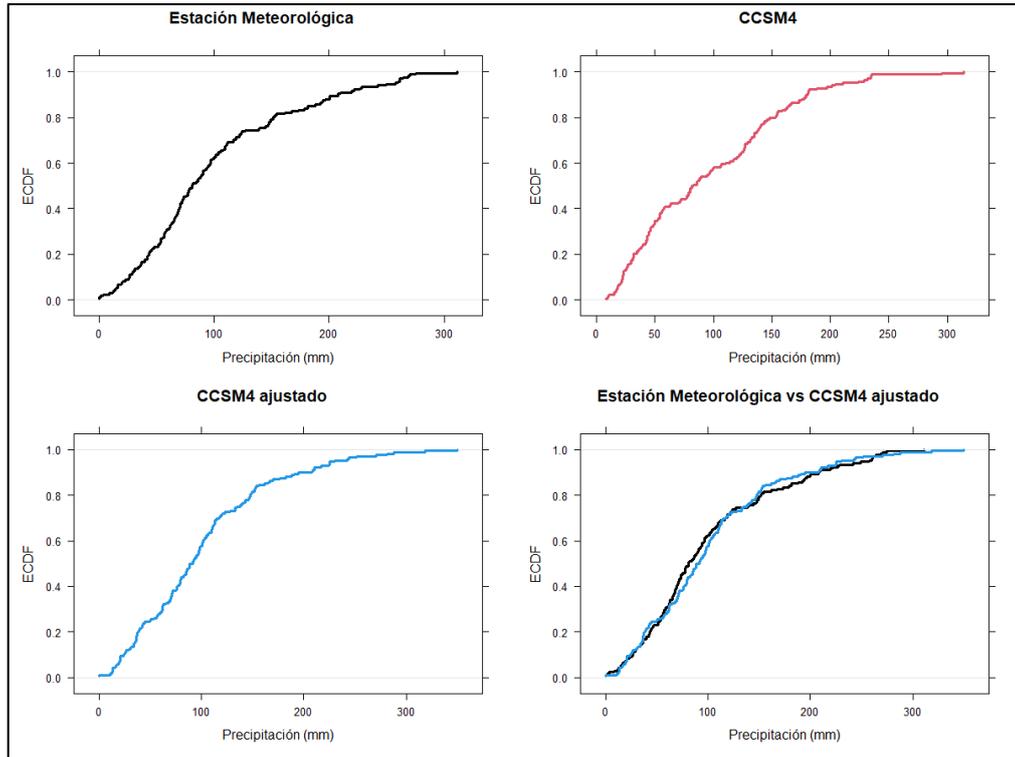
Anexo 22. Downscaling paramétrico de MPI ESM LR en torno estación Chirinos



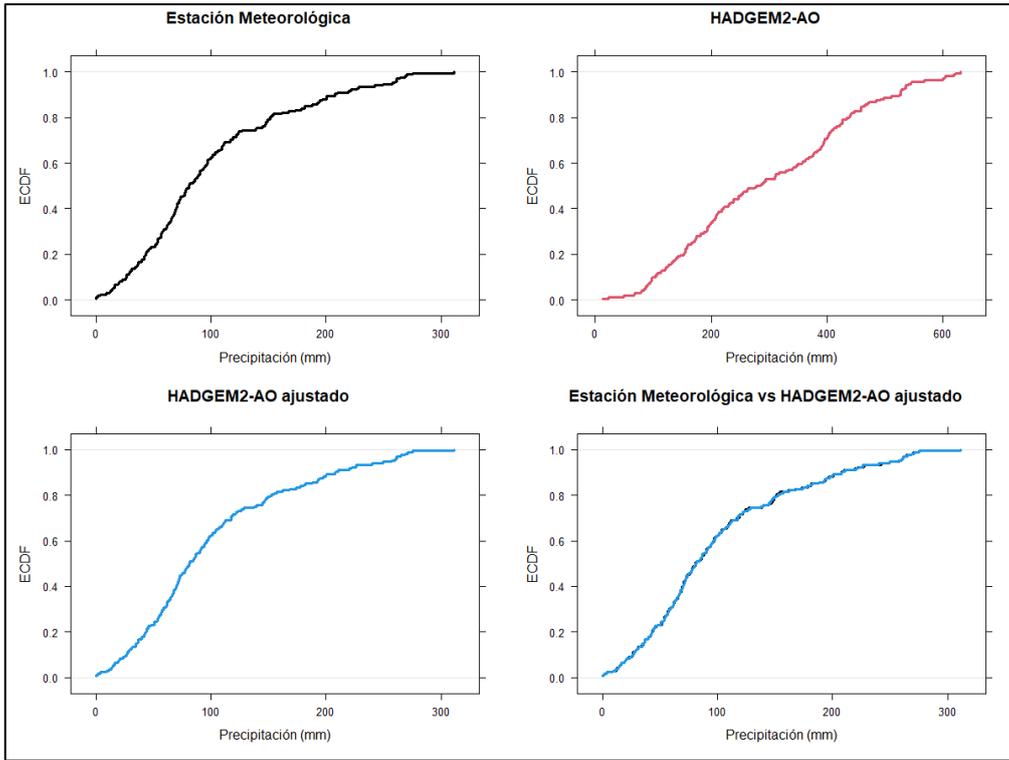
Anexo 23. Downscaling no paramétrico de CCSM4 en torno estación Hacienda Shumaya



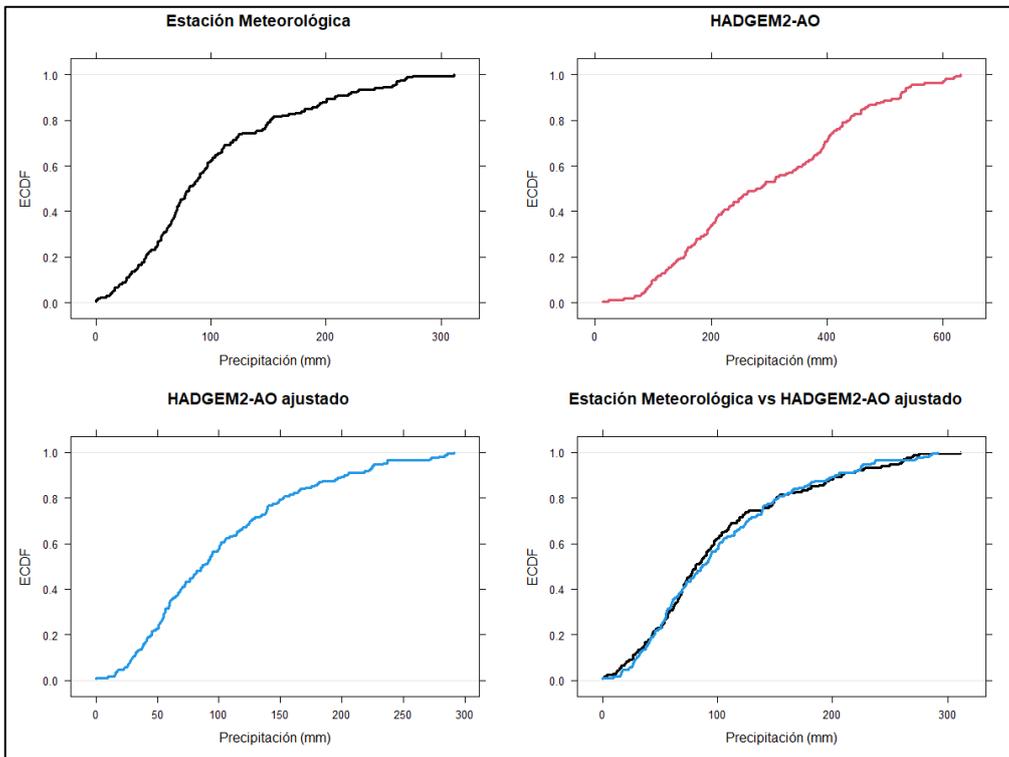
Anexo 24. Downscaling paramétrico de CCSM4 en torno estación Hacienda Shumaya



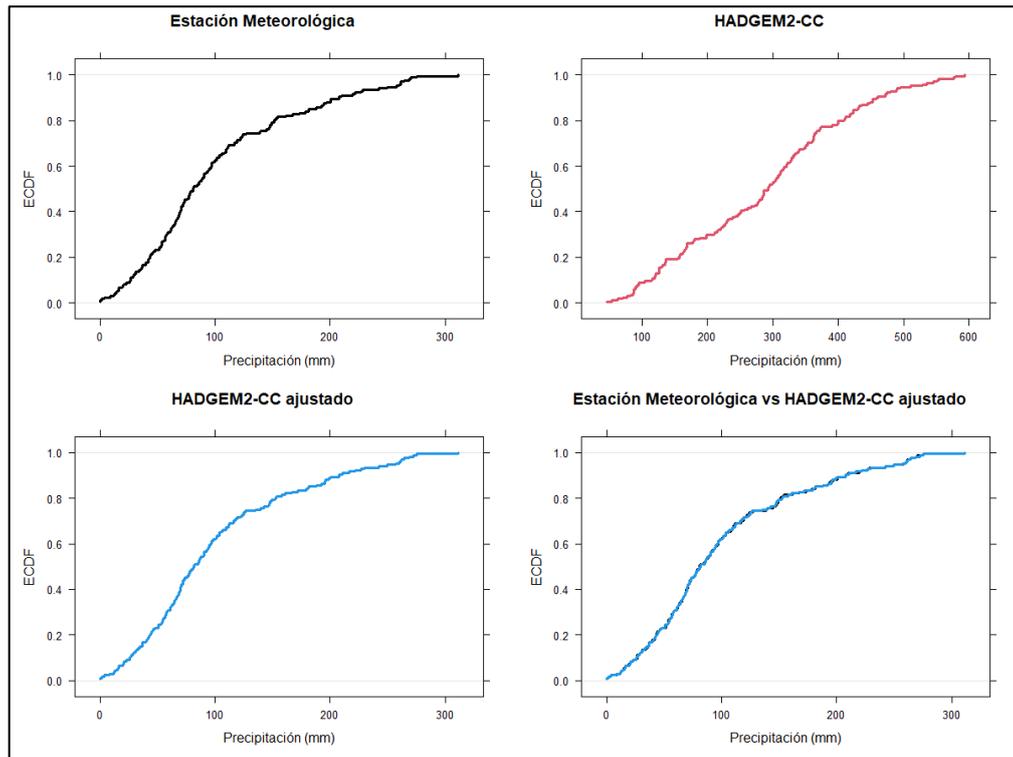
Anexo 25. Downscaling no paramétrico de HADGEM2 AO en torno estación Hacienda Shumaya



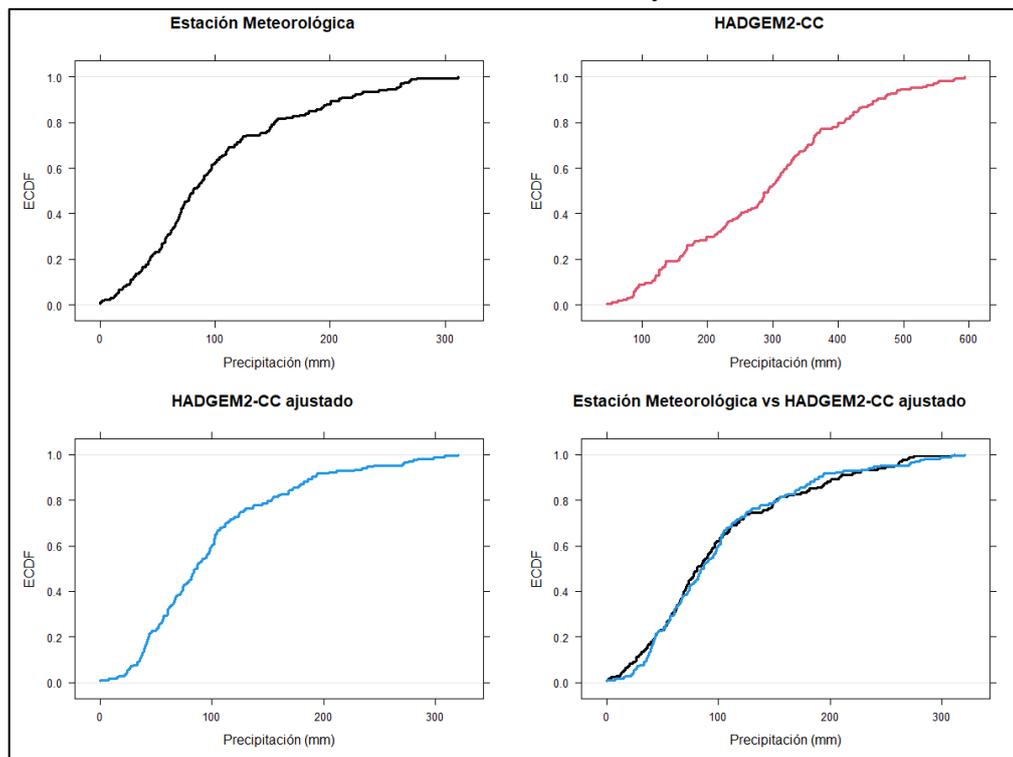
Anexo 26. Downscaling paramétrico de HADGEM2 AO en torno estación Hacienda Shumaya



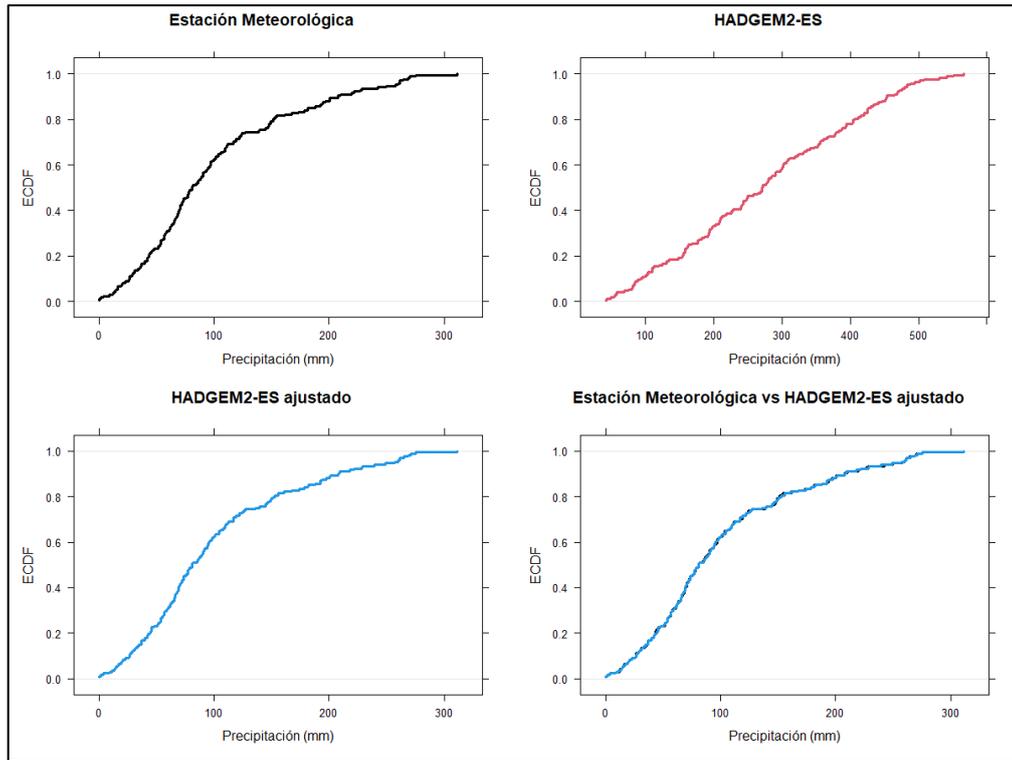
Anexo 27. Downscaling no paramétrico de HADGEM2 CC en torno estación Hacienda Shumaya



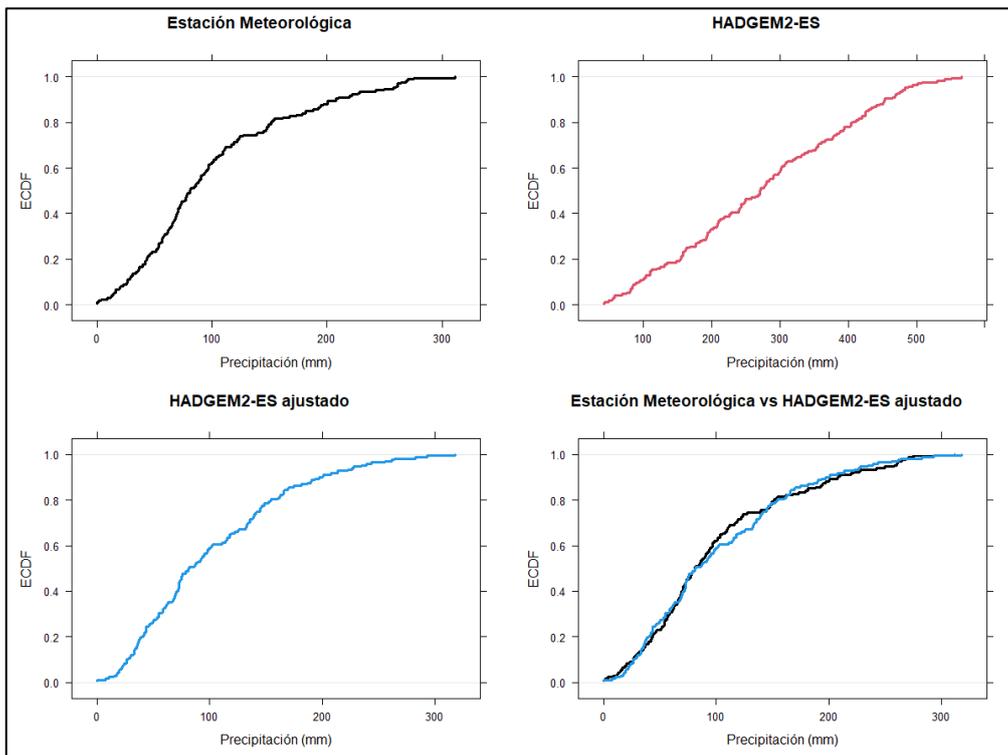
Anexo 28. Downscaling paramétrico de HADGEM2 CC en torno estación Hacienda Shumaya



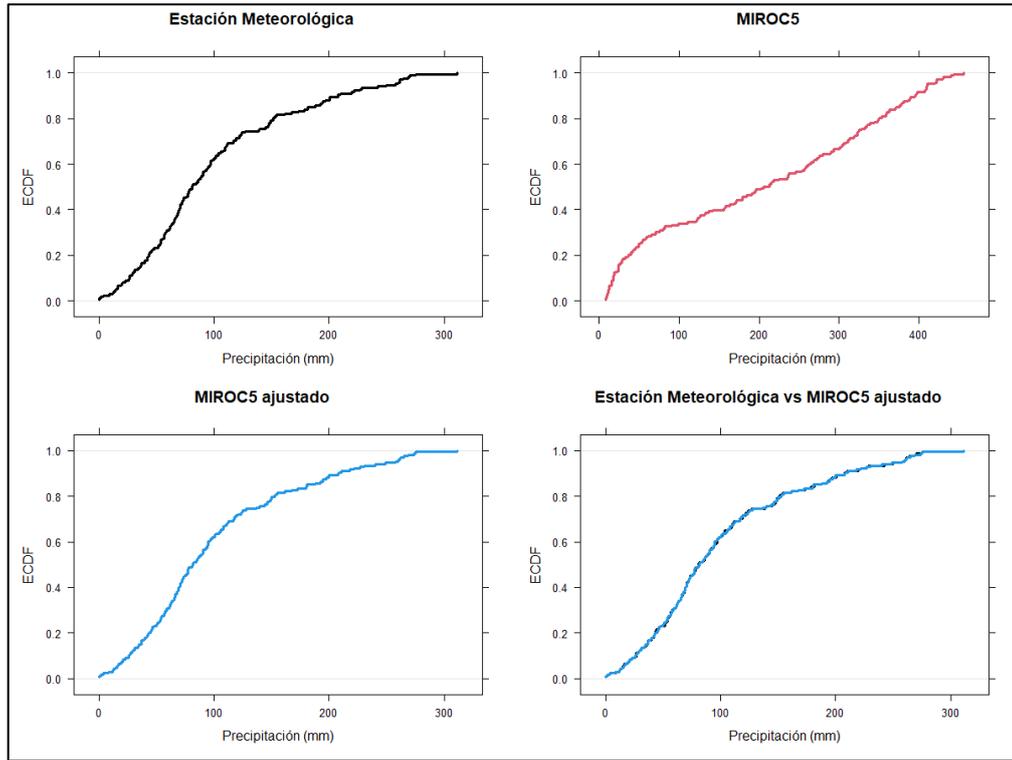
Anexo 29. Downscaling no paramétrico de HADGEM2 ES en torno estación Hacienda Shumaya



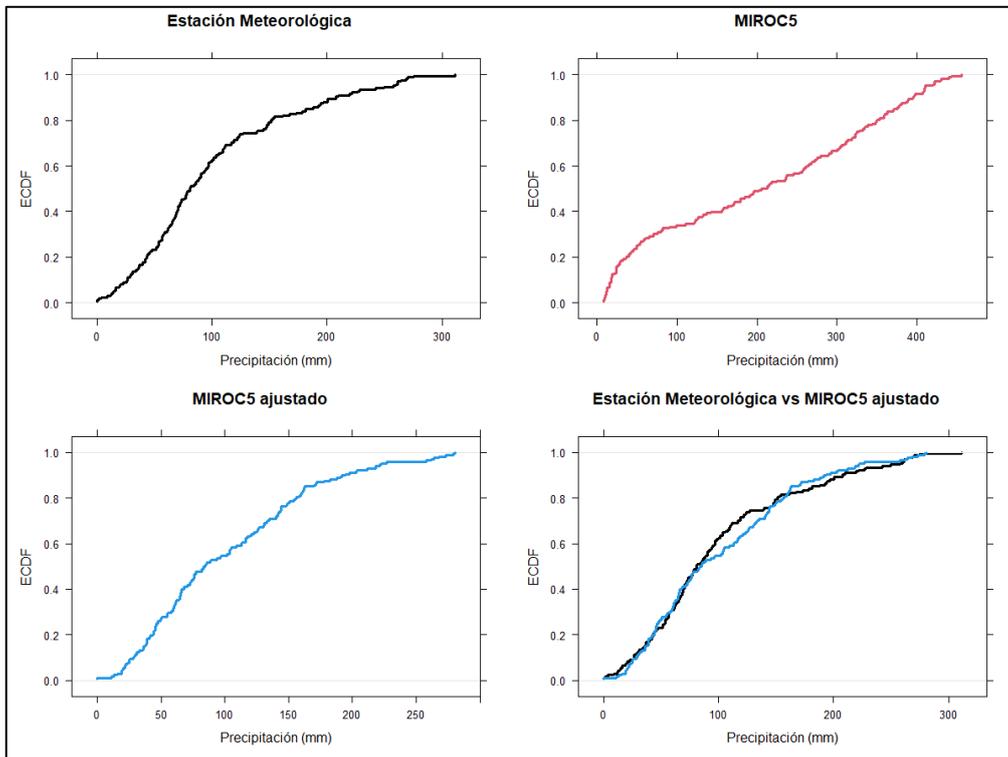
Anexo 30. Downscaling paramétrico de HADGEM2 ES en torno estación Hacienda Shumaya



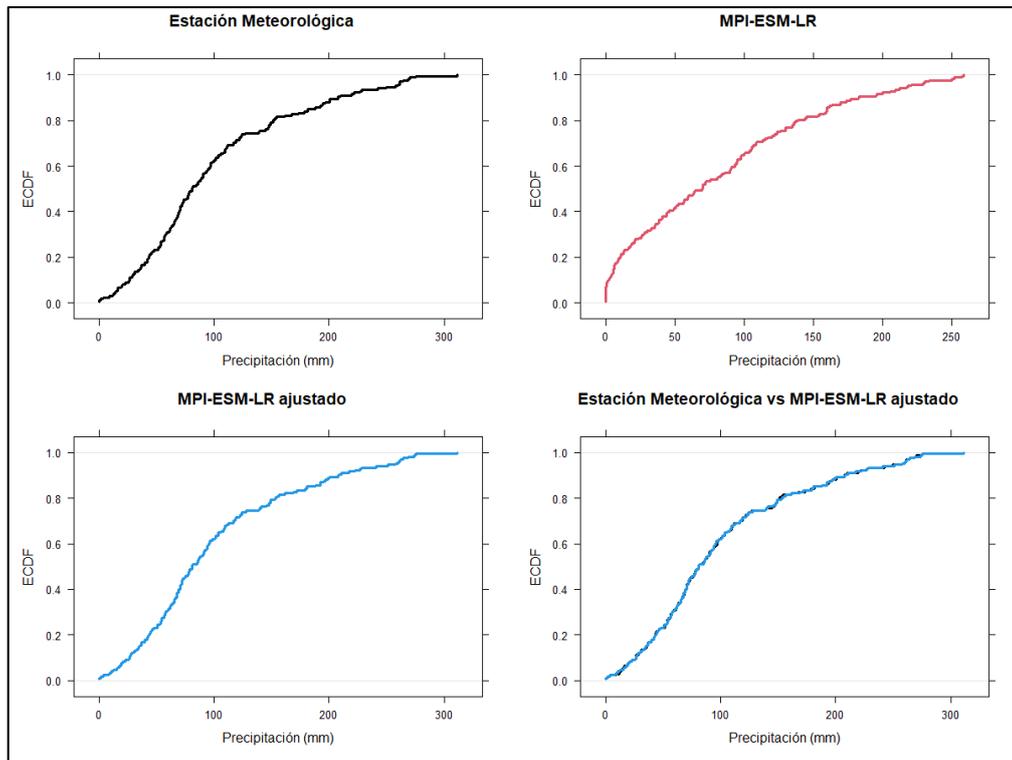
Anexo 31. Downscaling no paramétrico de MIROC5 en torno estación Hacienda Shumaya



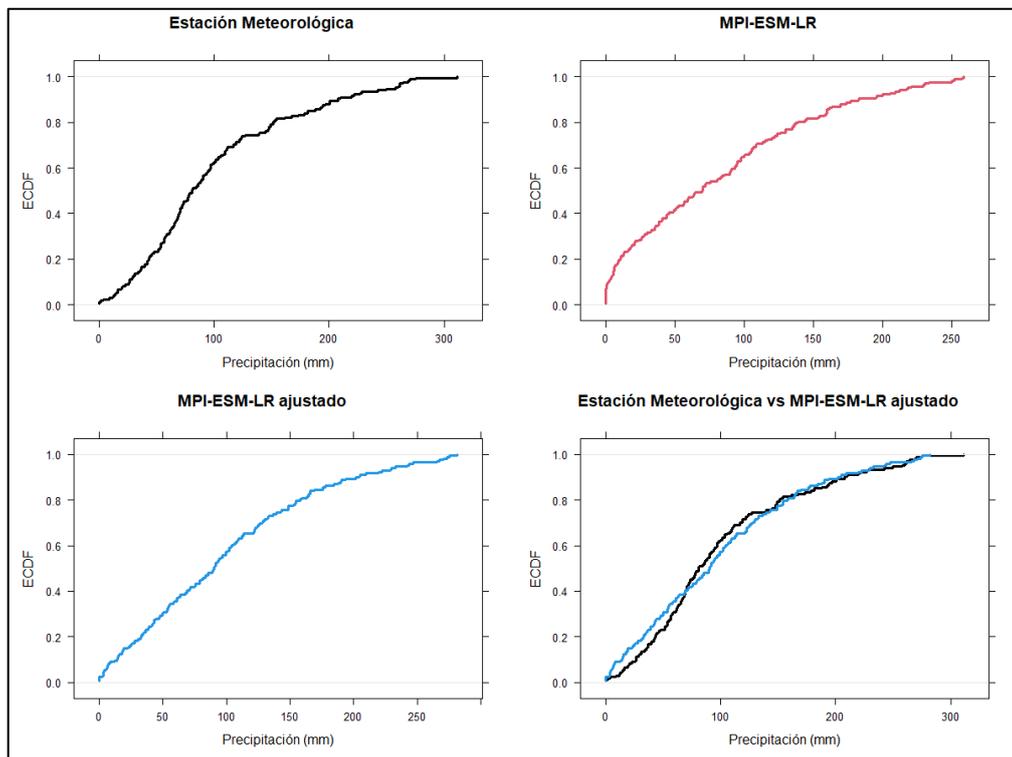
Anexo 32. Downscaling paramétrico de MIROC5 en torno estación Hacienda Shumaya



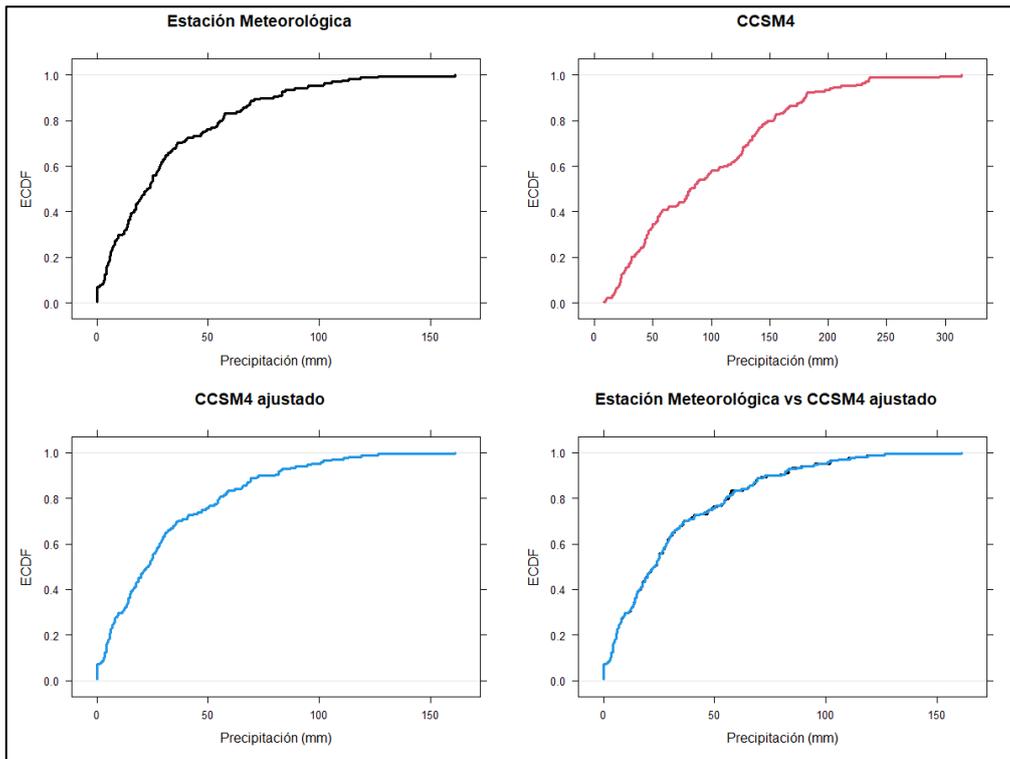
Anexo 33. Downscaling no paramétrico de MPI ESM LR en torno estación Hacienda Shumaya



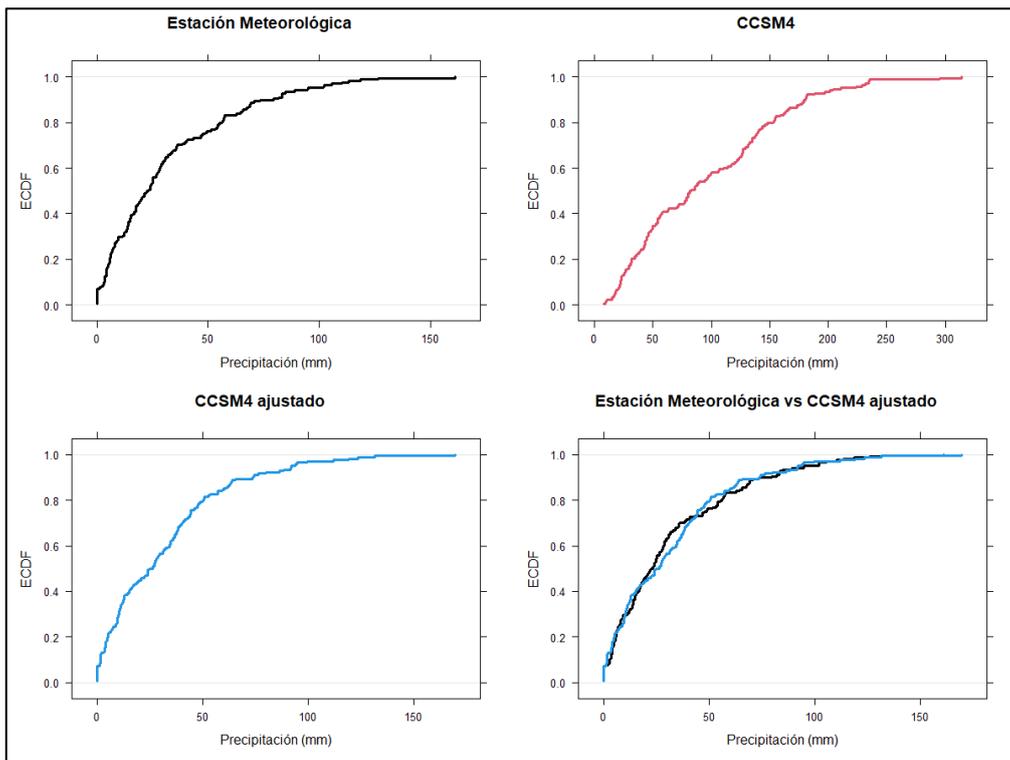
Anexo 34. Downscaling paramétrico de MPI ESM LR en torno estación Hacienda Shumaya



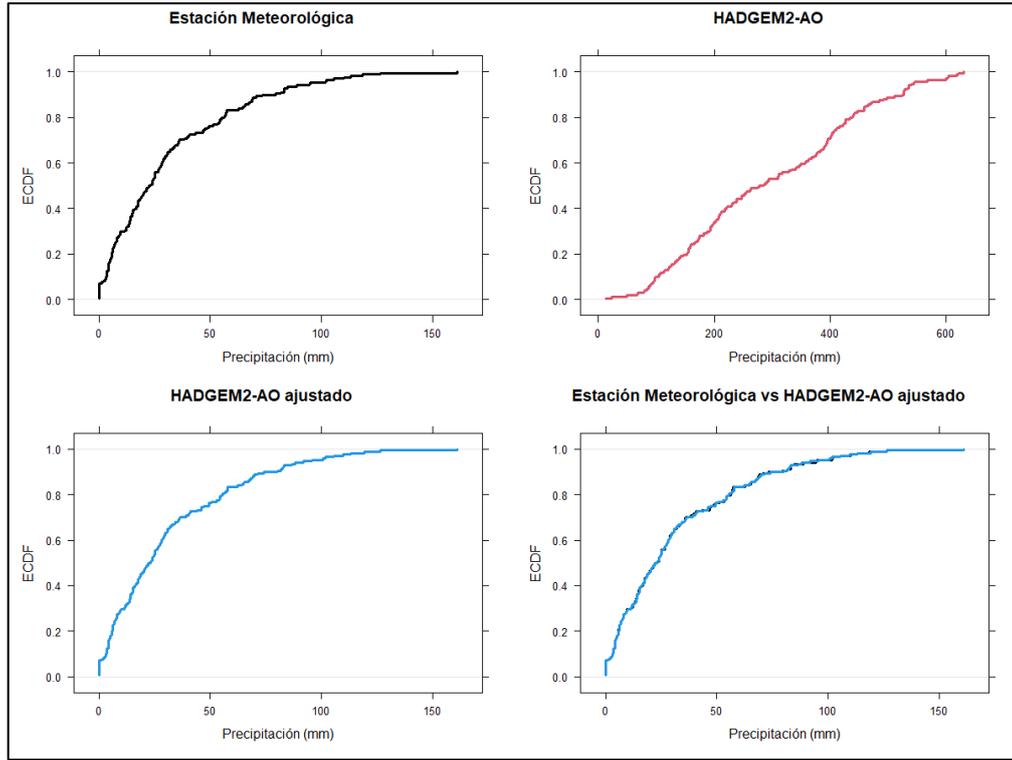
Anexo 35. Downscaling no paramétrico de CCSM4 en torno estación Sondorillo



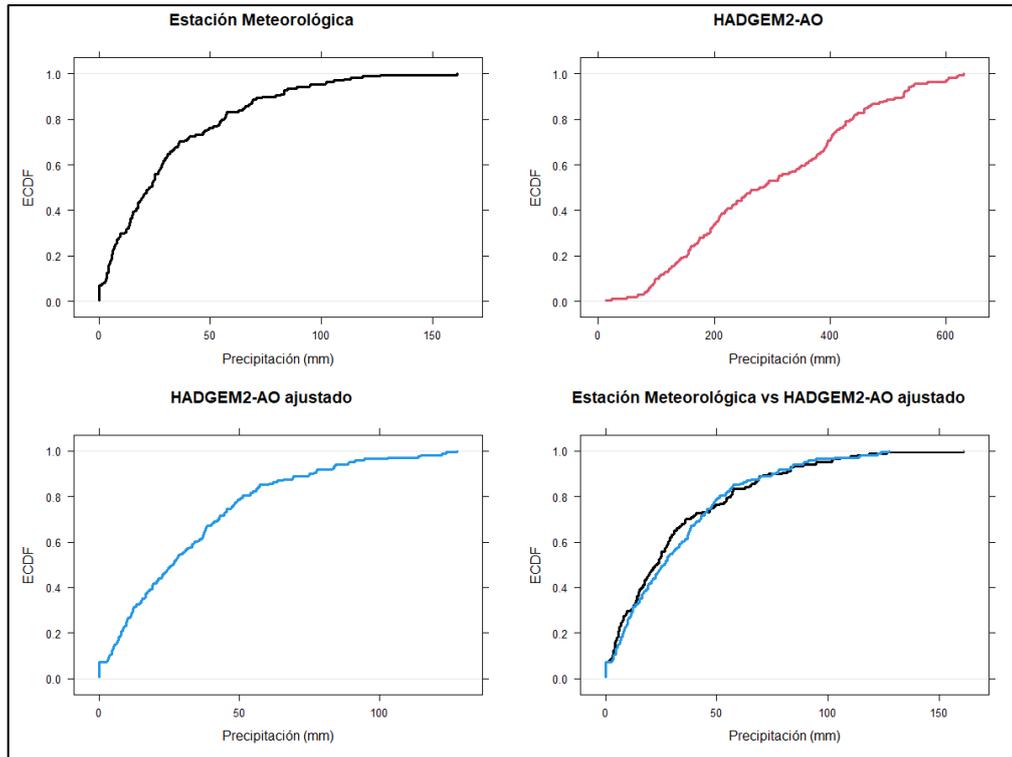
Anexo 36. Downscaling paramétrico de CCSM4 en torno estación Sondorillo



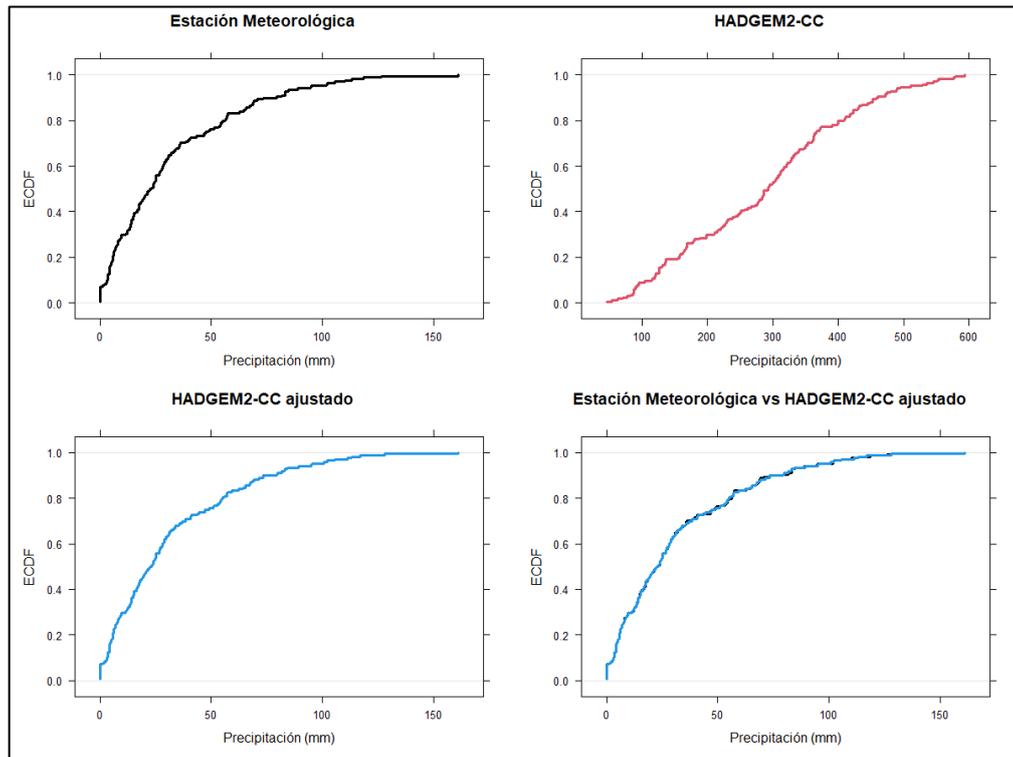
Anexo 37. Downscaling no paramétrico de HADGEM2 AO en torno estación Sondorillo



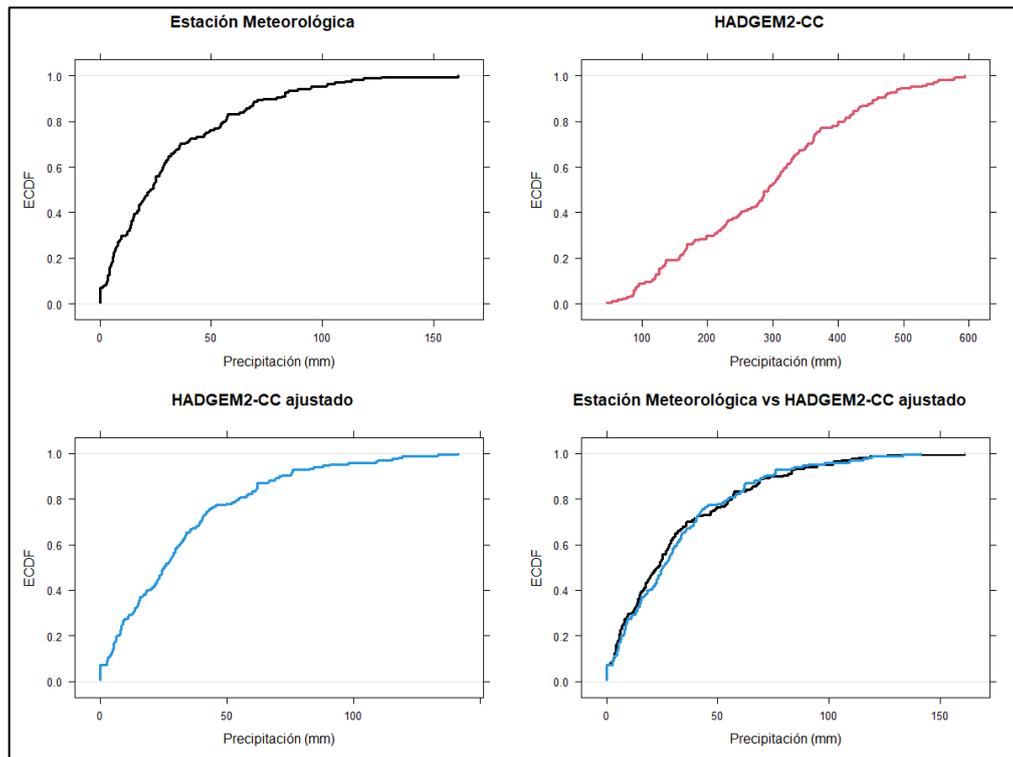
Anexo 38. Downscaling paramétrico de HADGEM2 AO en torno estación Sondorillo



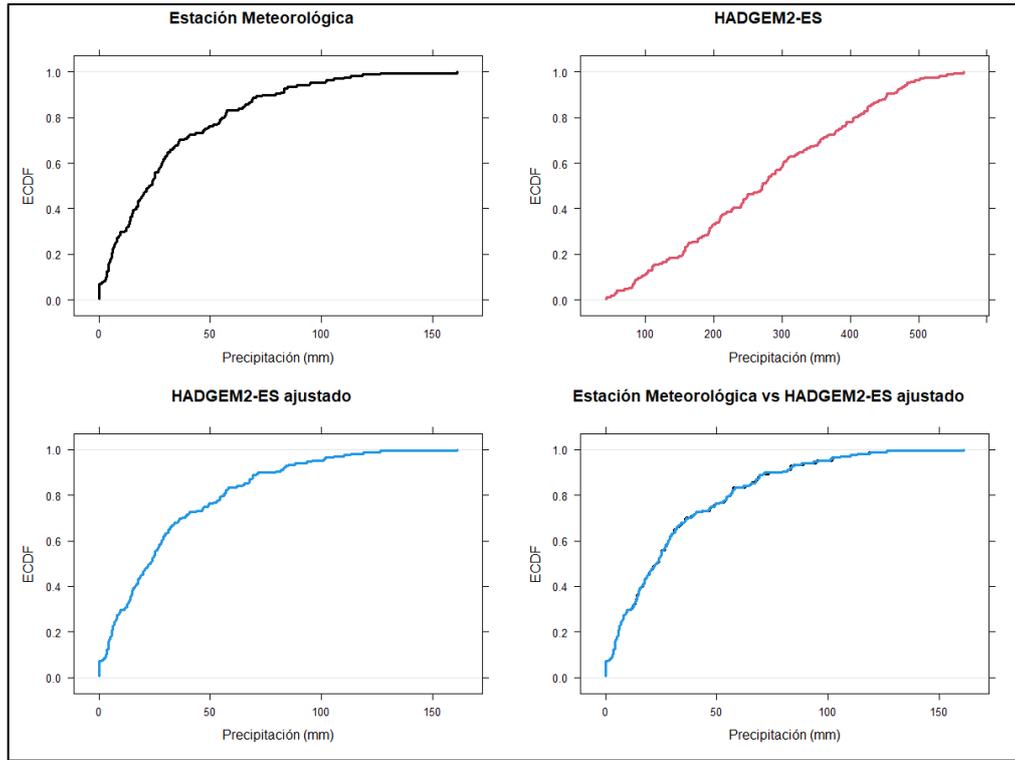
Anexo 39. Downscaling no paramétrico de HADGEM2 CC en torno estación Sondorillo



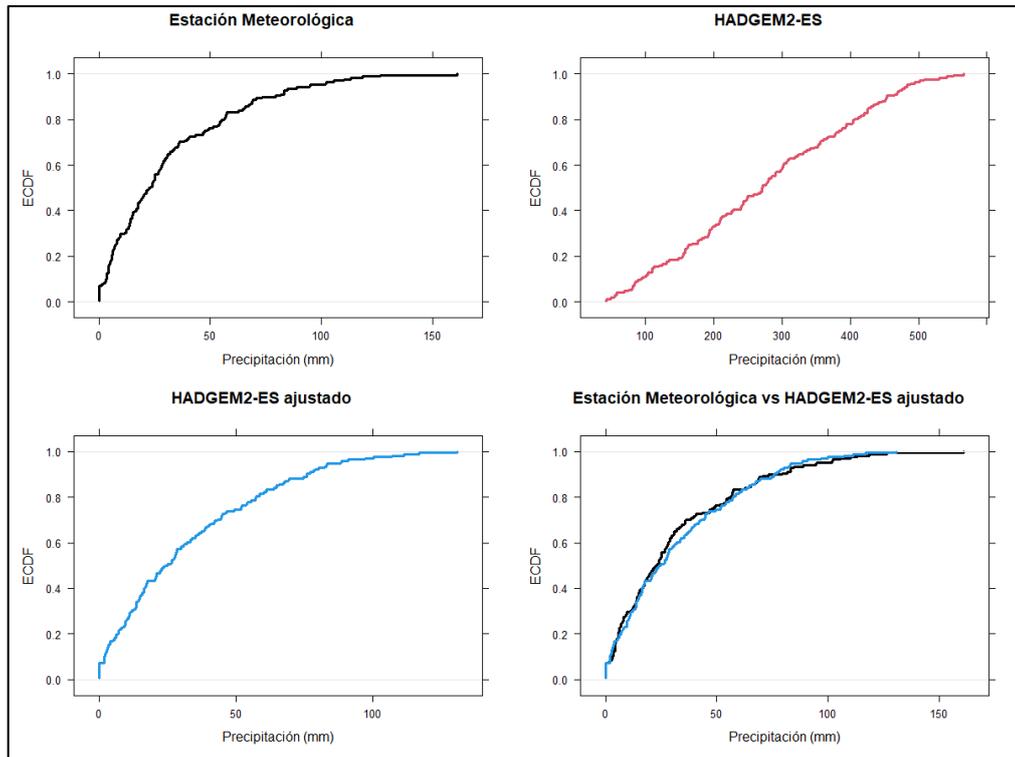
Anexo 40. Downscaling paramétrico de HADGEM2 CC en torno estación Sondorillo



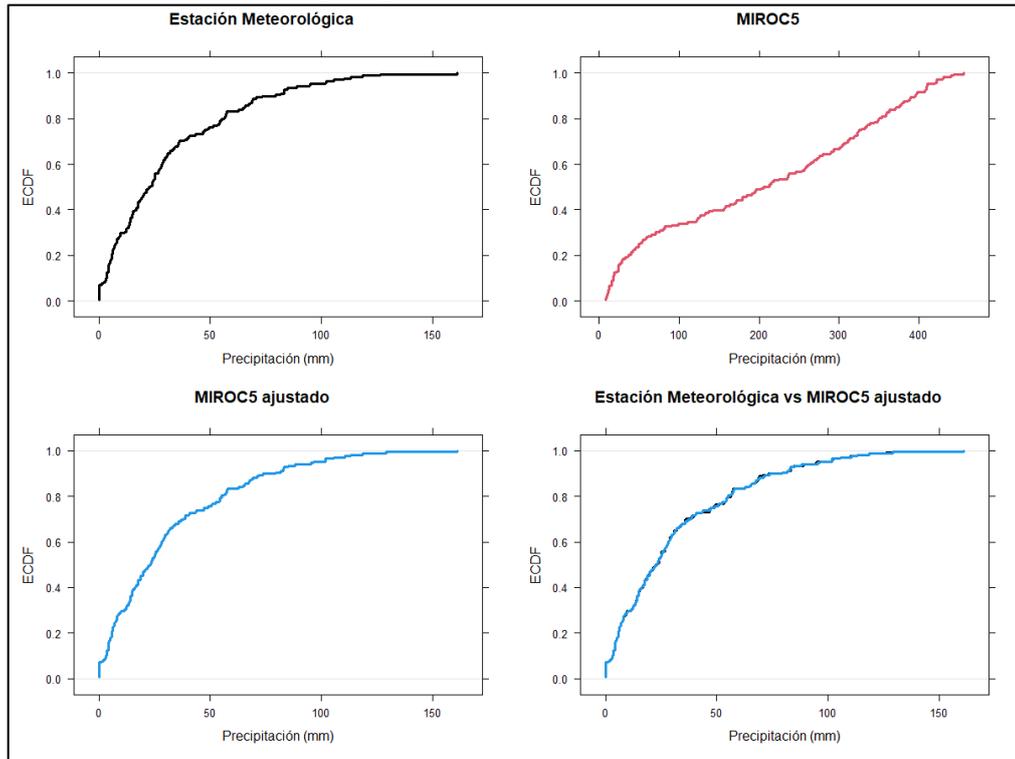
Anexo 41. Downscaling no paramétrico de HADGEM2 ES en torno estación Sondorillo



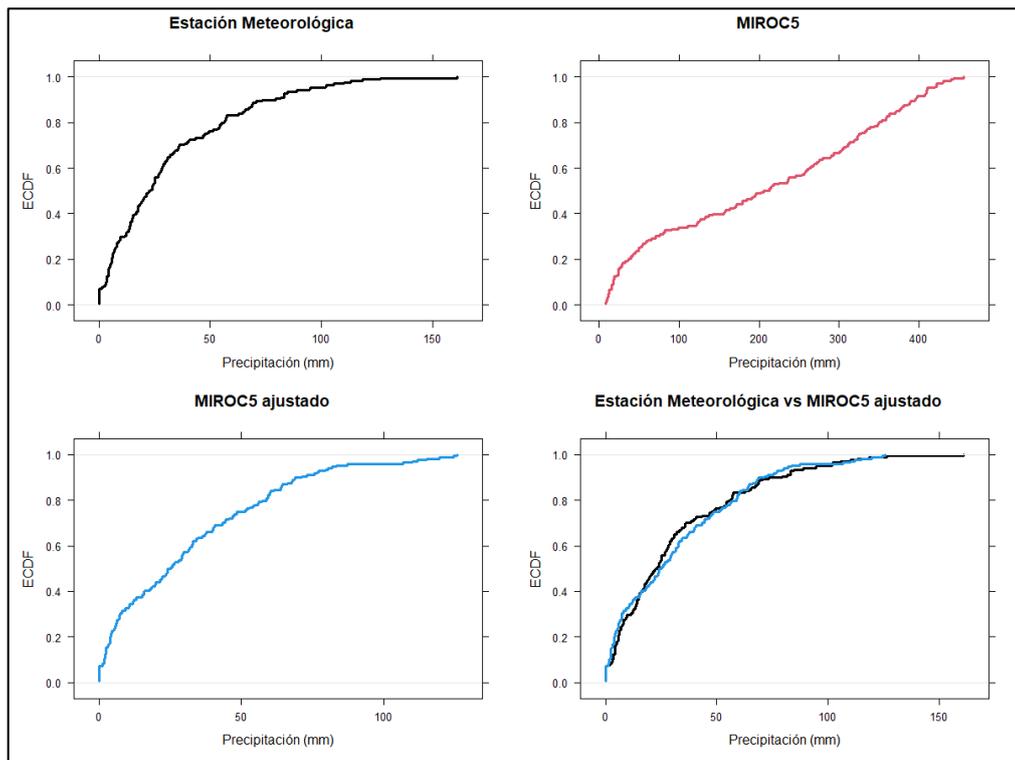
Anexo 42. Downscaling paramétrico de HADGEM2 ES en torno estación Sondorillo



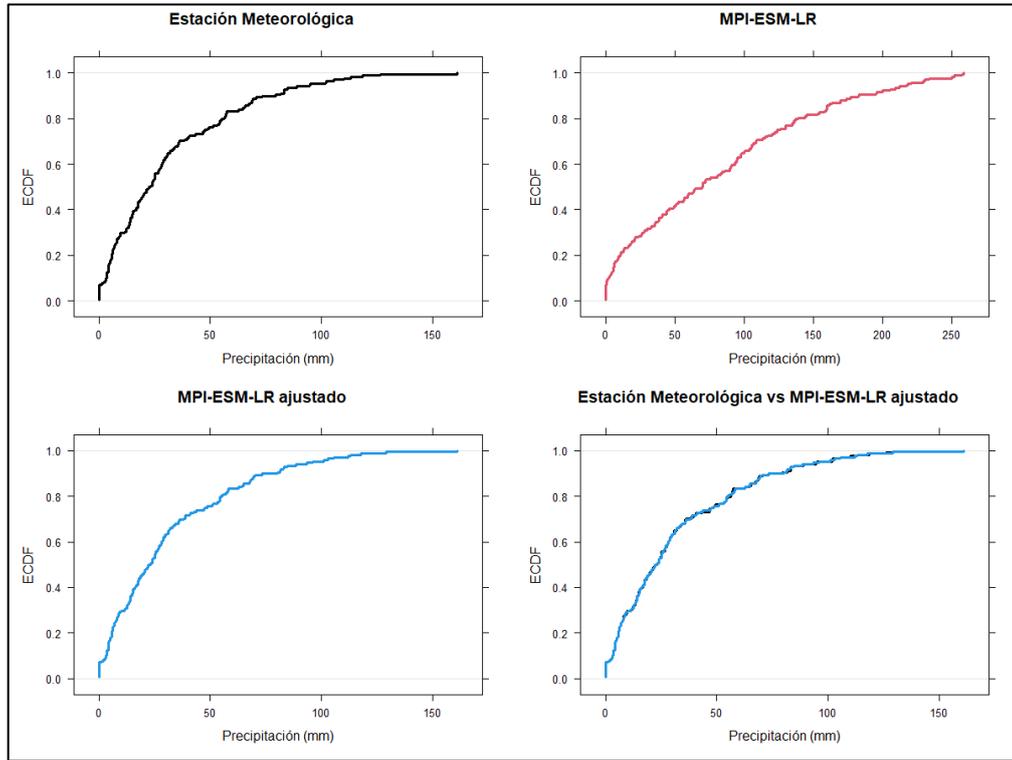
Anexo 43. Downscaling no paramétrico de MIROC5 en torno estación Sondorillo



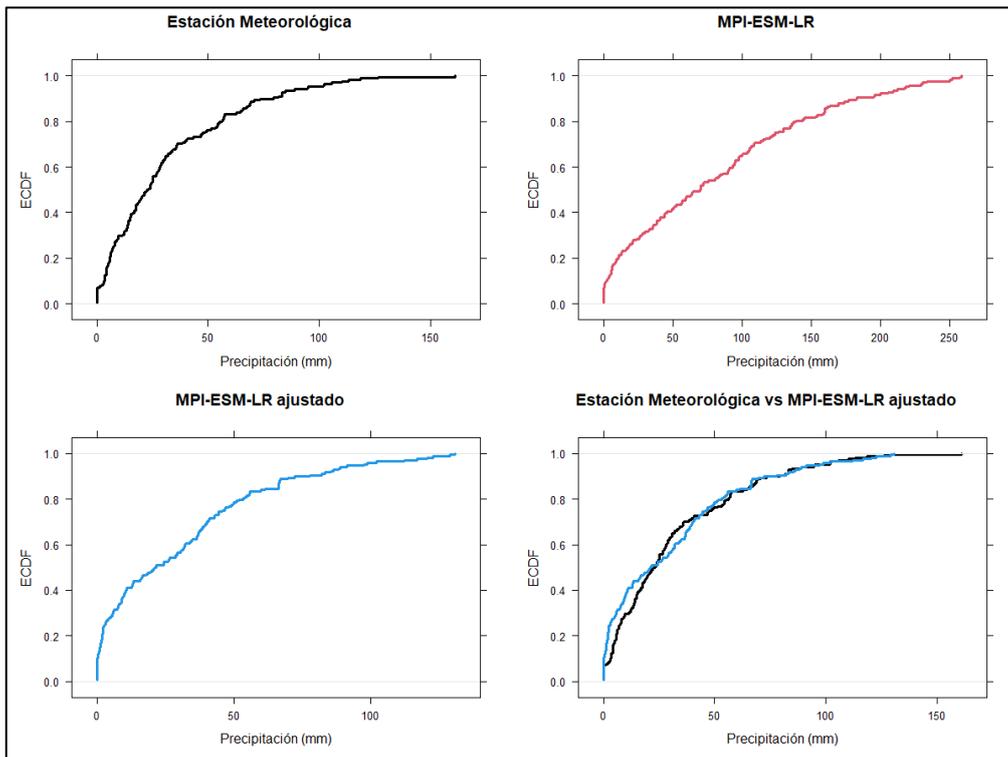
Anexo 44. Downscaling paramétrico de MIROC5 en torno estación Sondorillo



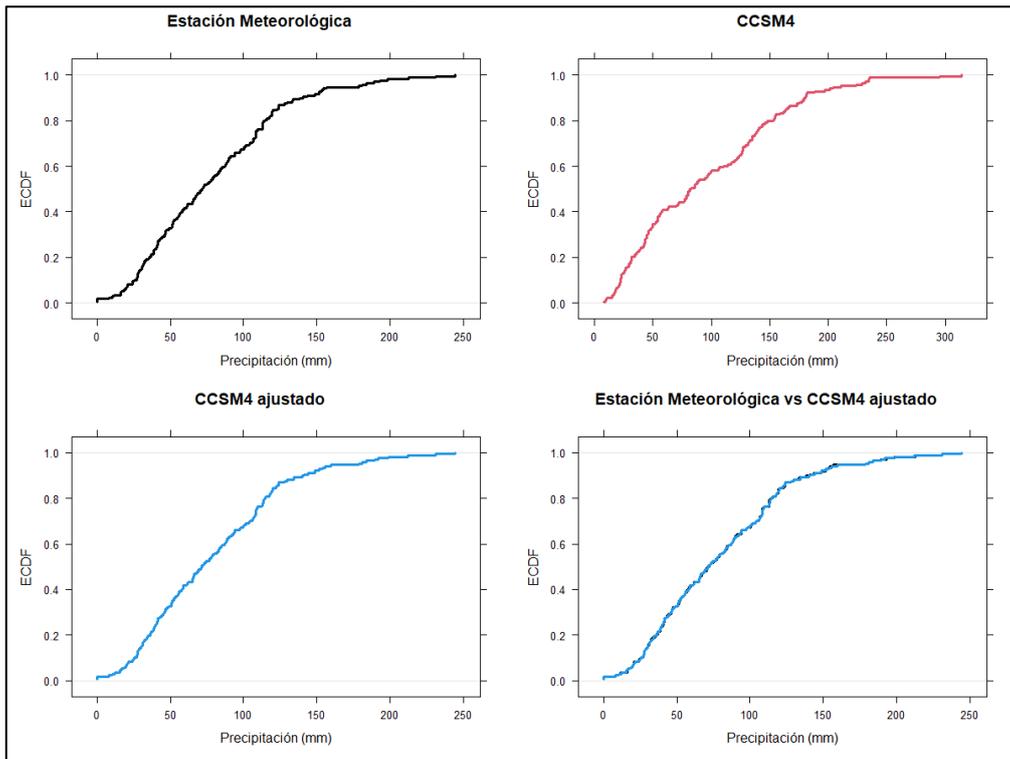
Anexo 45. Downscaling no paramétrico MPI ESM LR en torno estación Sondorillo



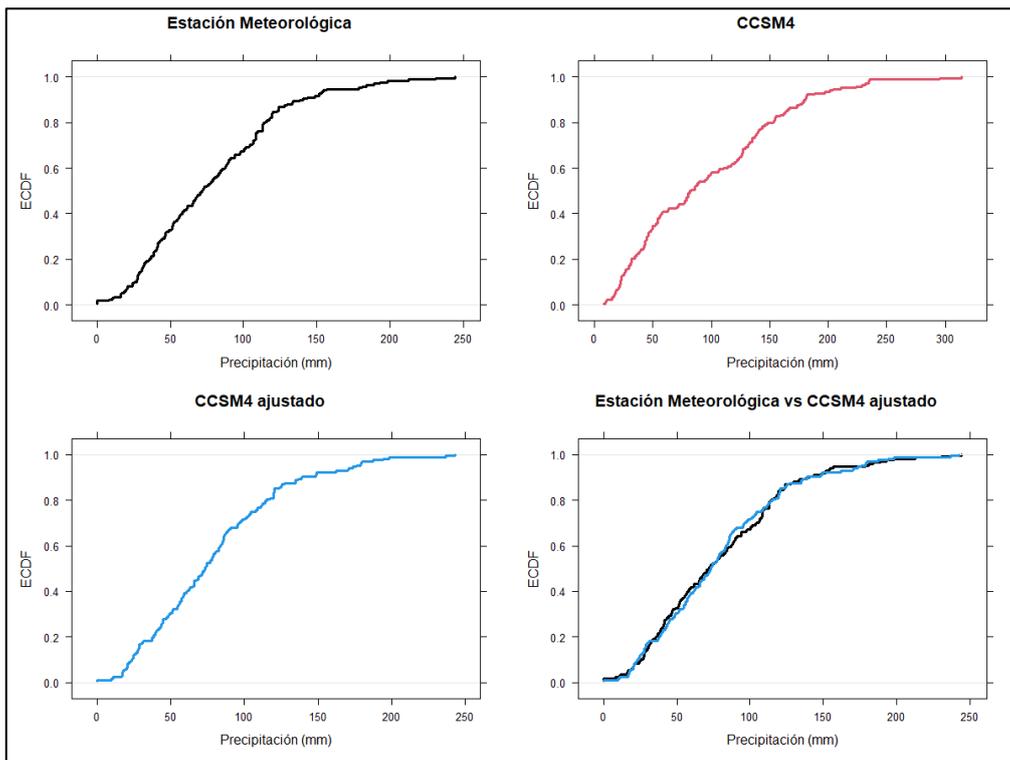
Anexo 46. Downscaling paramétrico de MPI ESM LR en torno estación Sondorillo



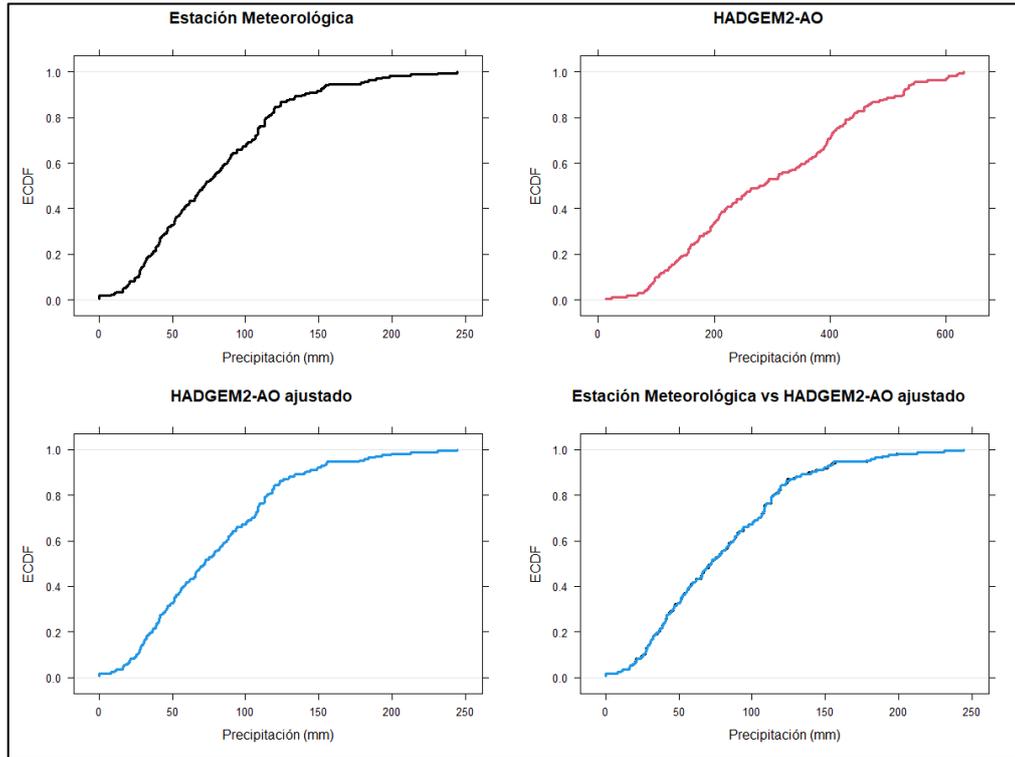
Anexo 47. Downscaling no paramétrico de CCSM4 en torno estación Tabaconas



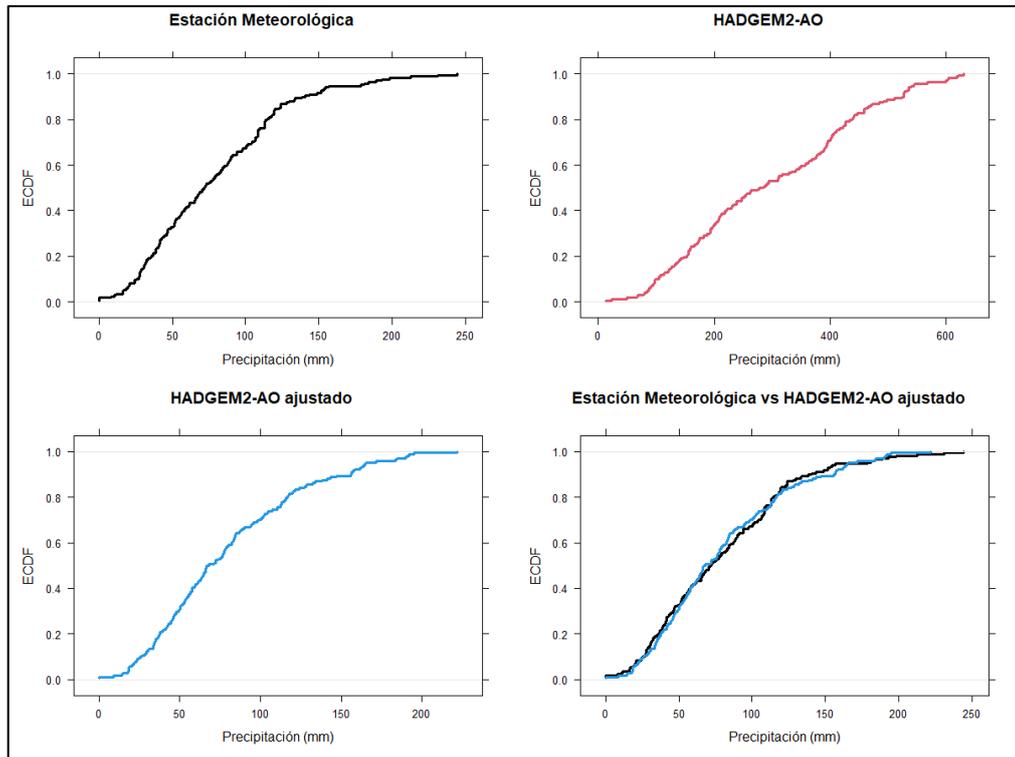
Anexo 48. Downscaling paramétrico de CCSM4 en torno estación Tabaconas



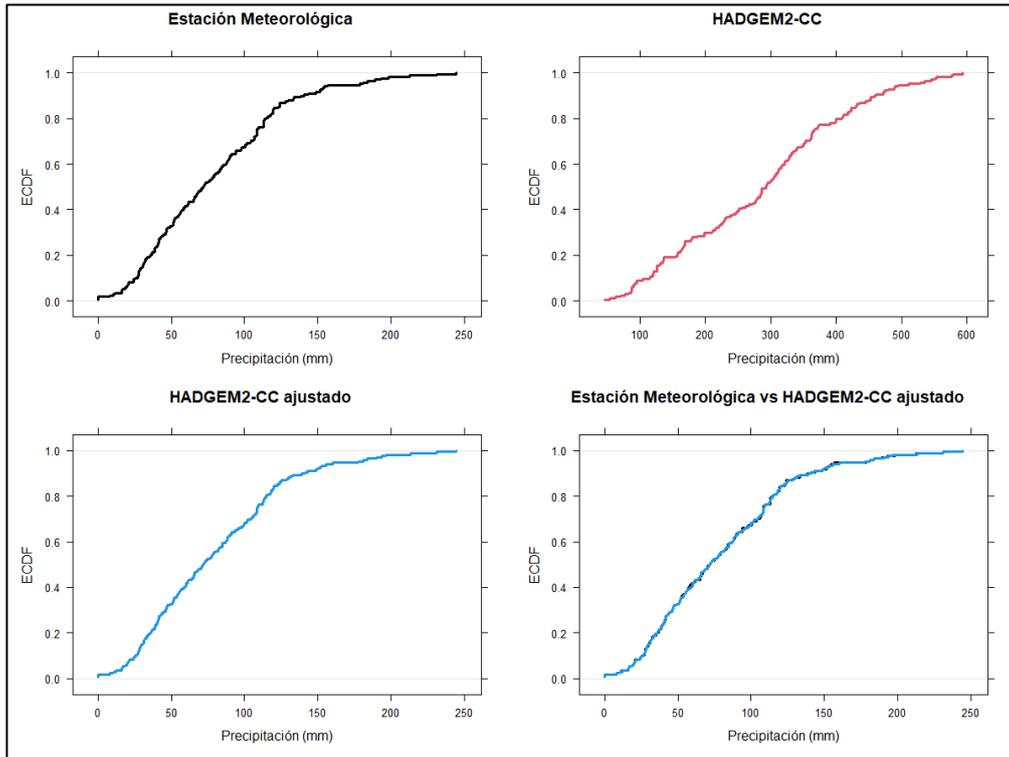
Anexo 49. Downscaling no paramétrico de HADGEM2 AO en torno estación Tabaconas



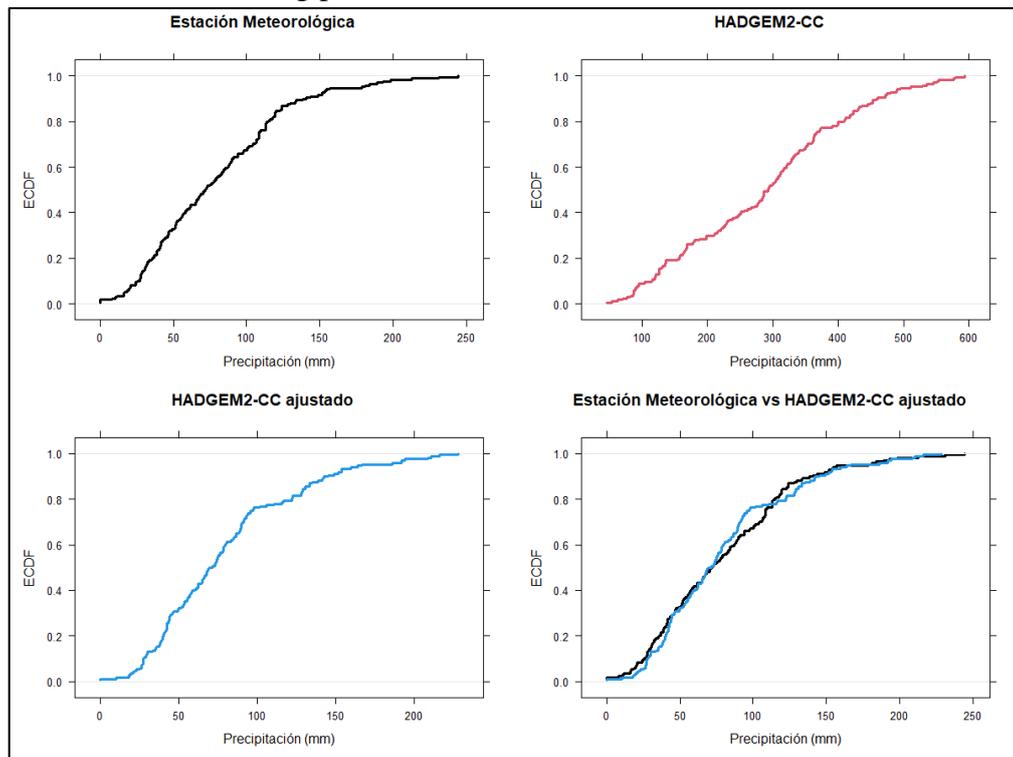
Anexo 50. Downscaling paramétrico de HADGEM2 AO en torno estación Tabaconas



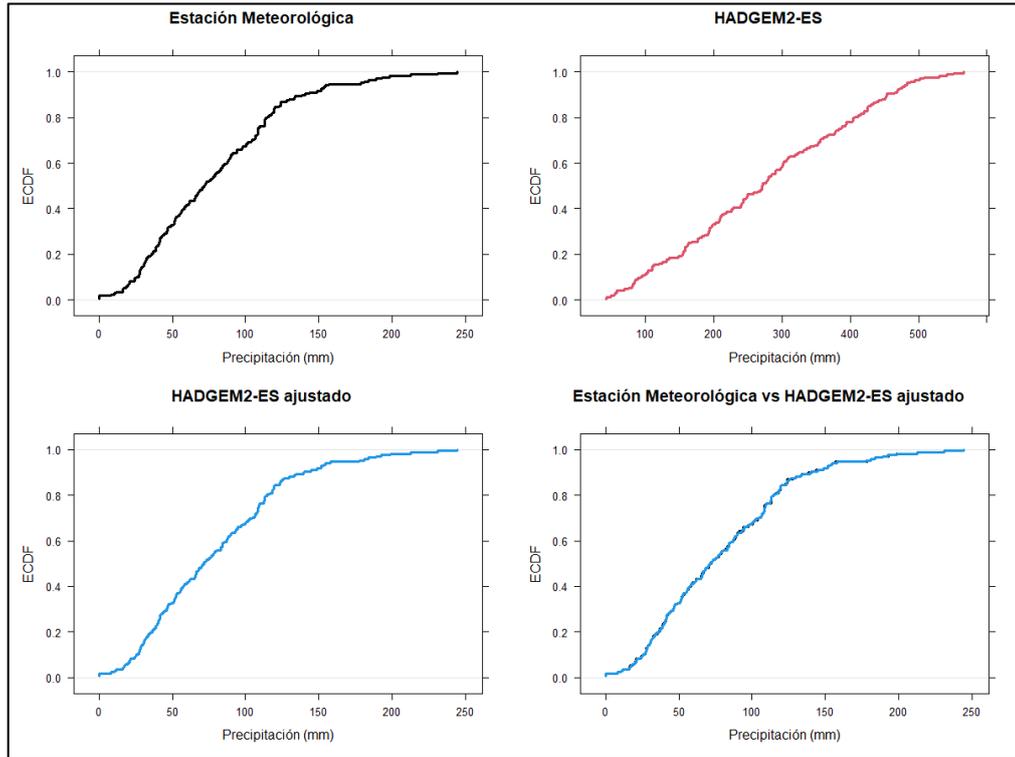
Anexo 51. Downscaling no paramétrico de HADGEM2 CC en torno estación Tabaconas



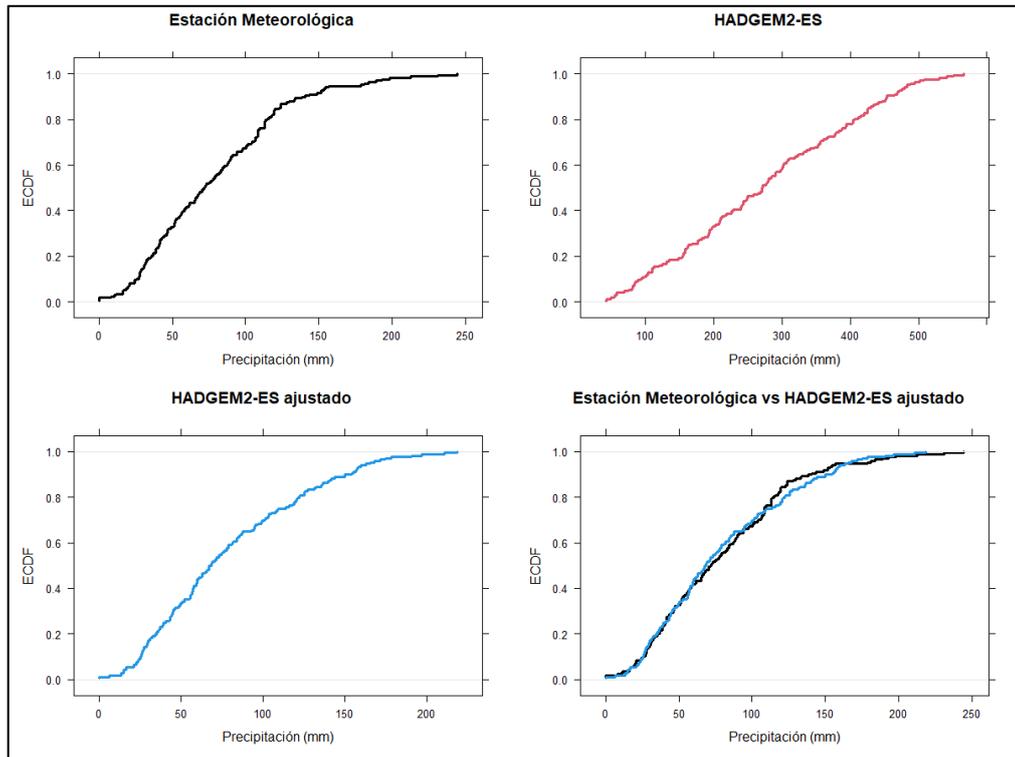
Anexo 52. Downscaling paramétrico de HADGEM2 CC en torno estación Tabaconas



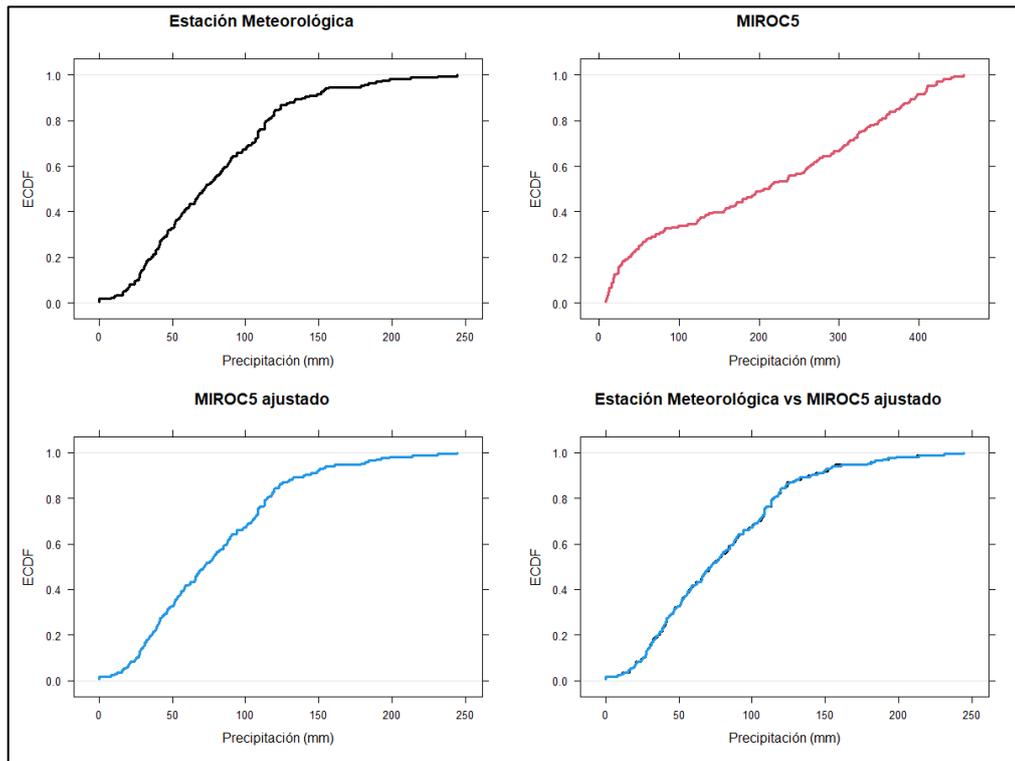
Anexo 53. Downscaling no paramétrico de HADGEM2 ES en torno estación Tabaconas



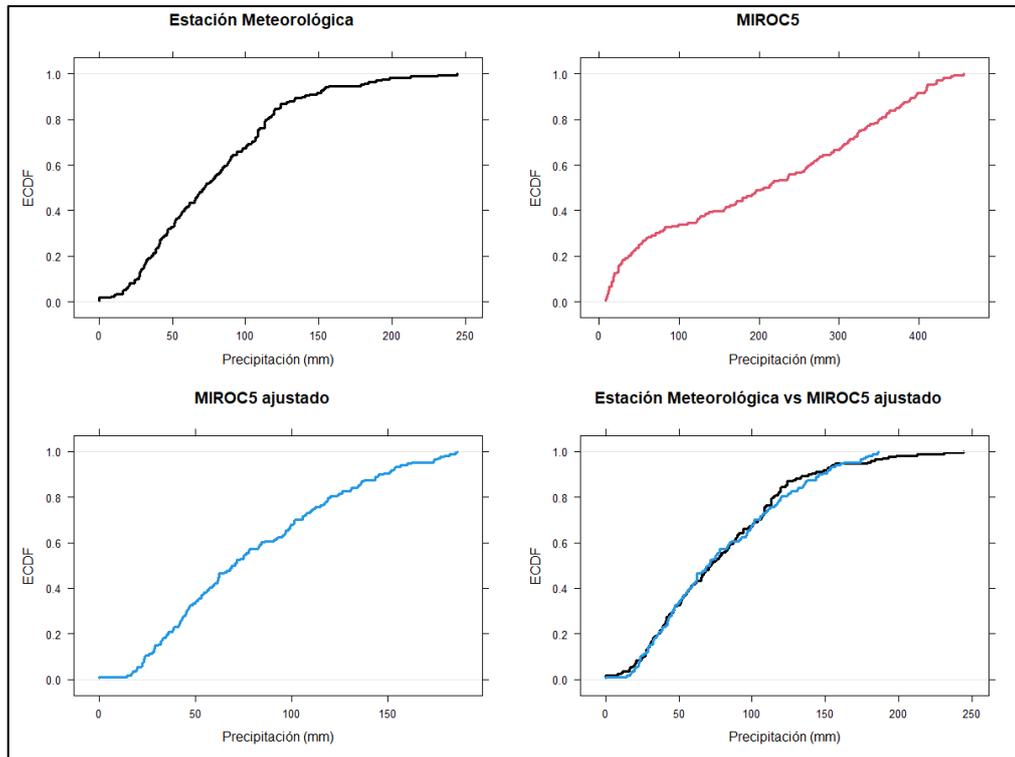
Anexo 54. Downscaling paramétrico de HADGEM2 ES en torno estación Tabaconas



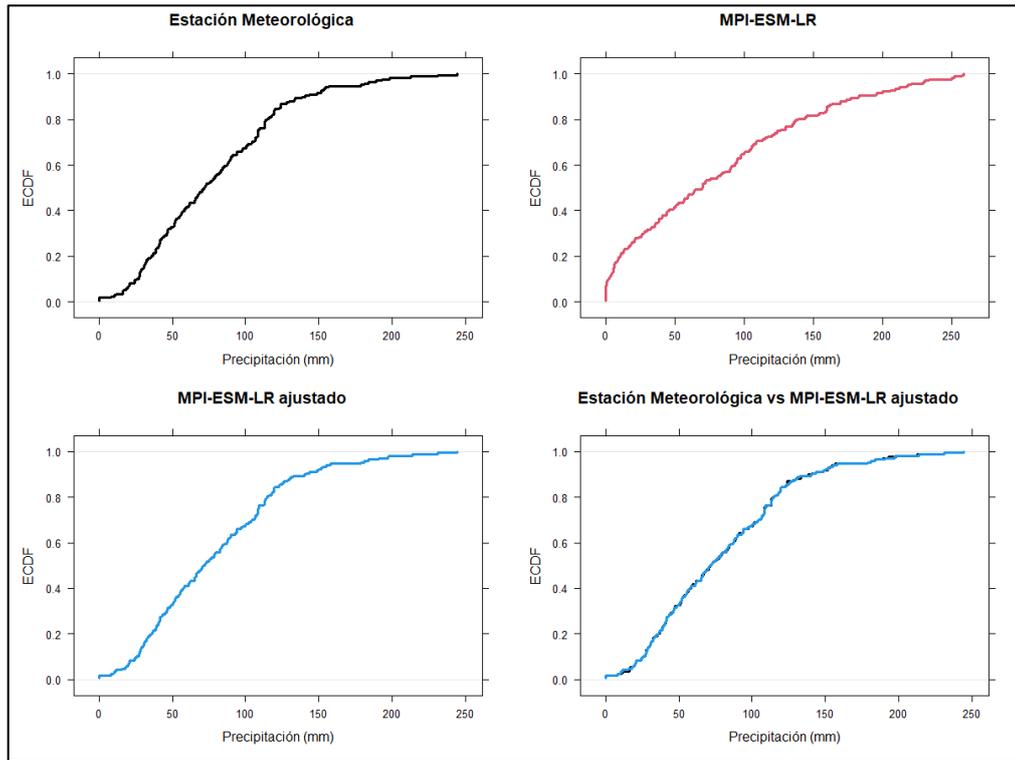
Anexo 55. Downscaling no paramétrico de MIROC5 en torno estación Tabaconas



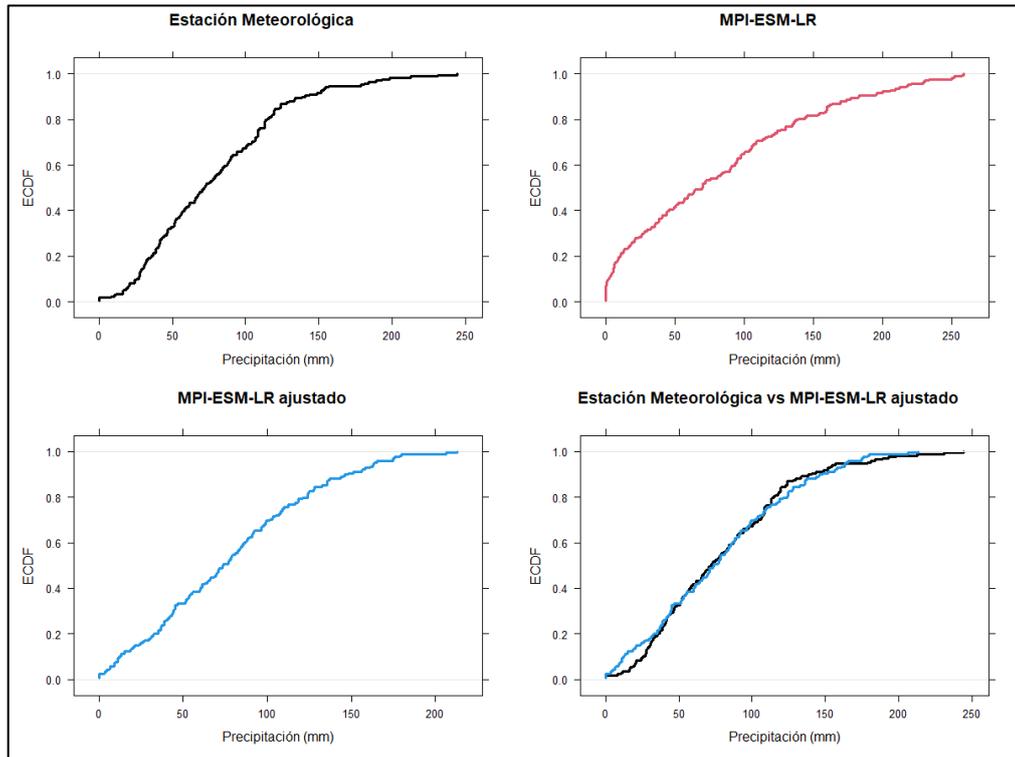
Anexo 56. Downscaling paramétrico de MIROC5 en torno estación Tabaconas



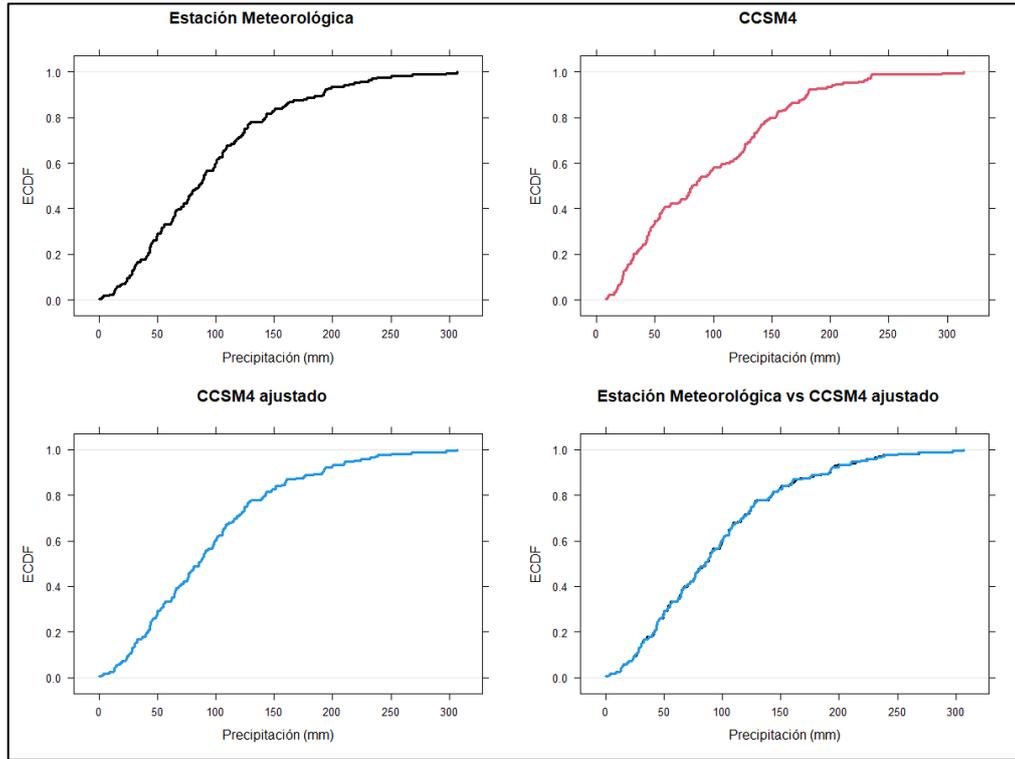
Anexo 57. Downscaling no paramétrico de MPI ESM LR en torno estación Tabaconas



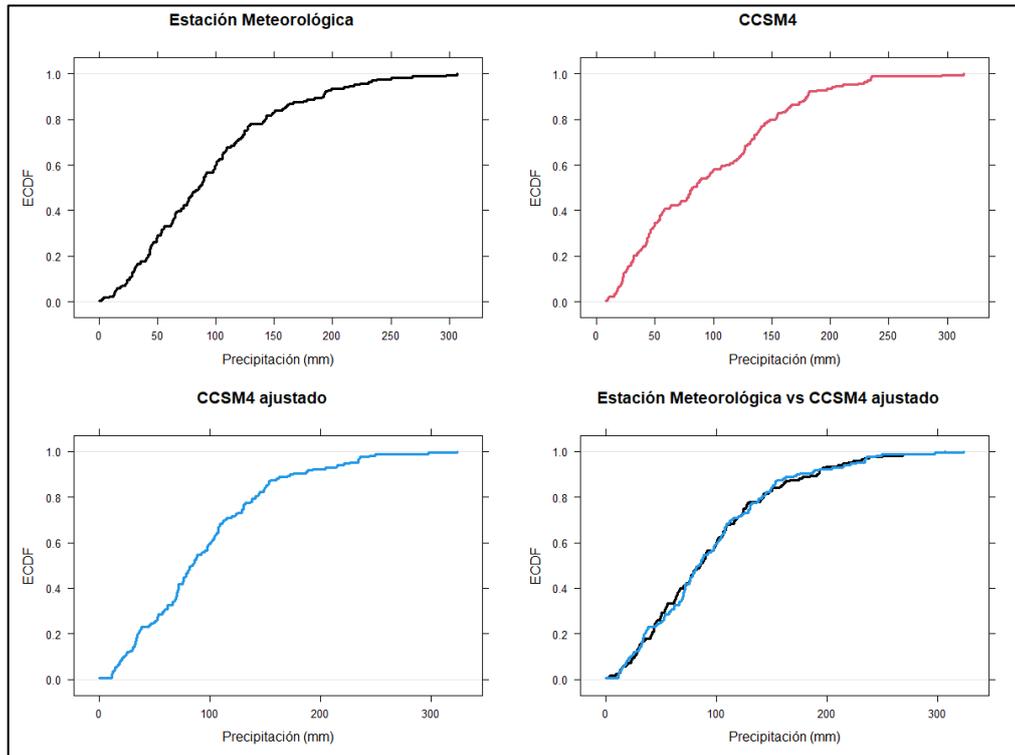
Anexo 58. Downscaling paramétrico de MPI ESM LR en torno estación Tabaconas



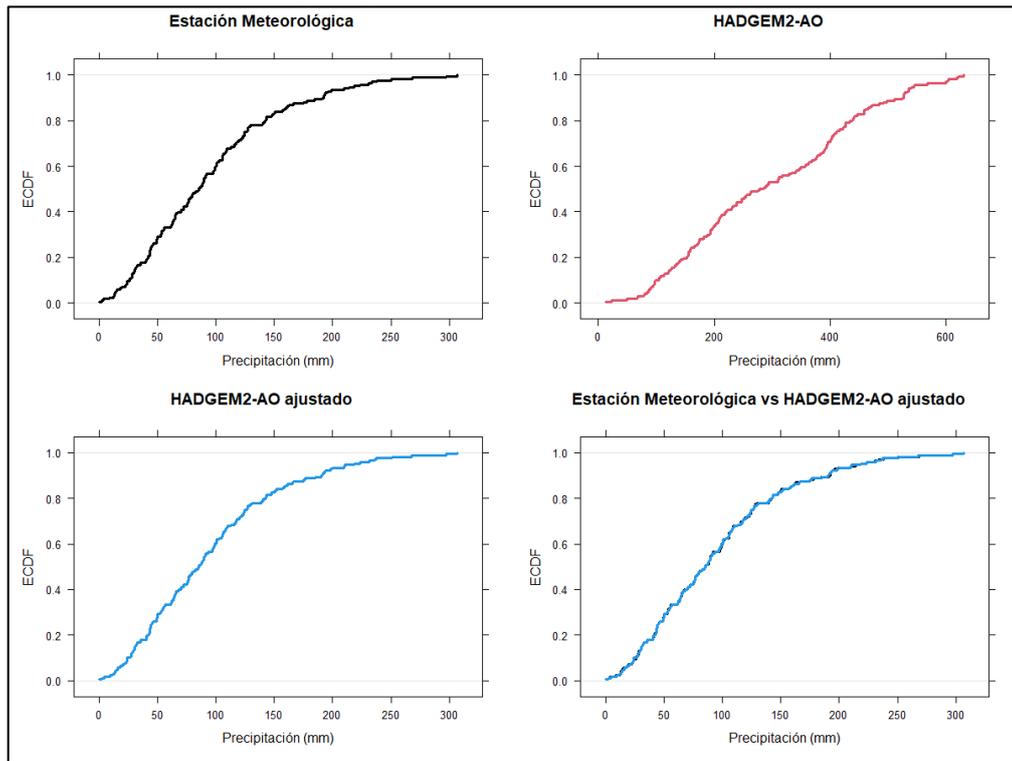
Anexo 59. Downscaling no paramétrico de CCSM4 en torno estación Tuluca



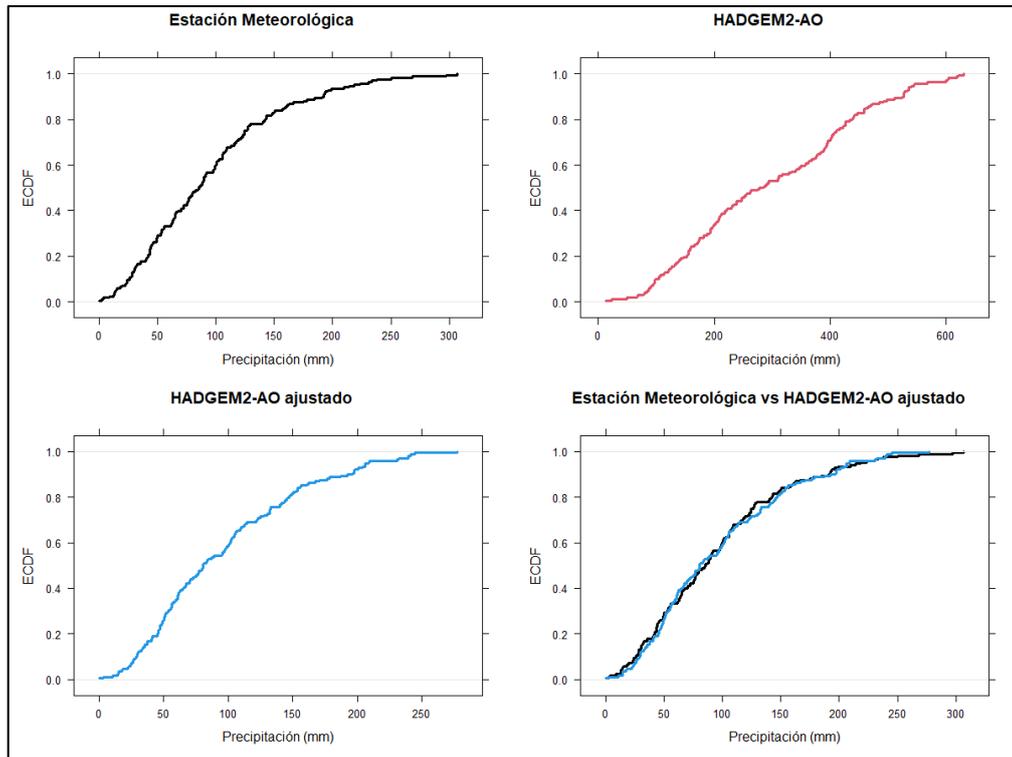
Anexo 60. Downscaling paramétrico de CCSM4 en torno estación Tuluca



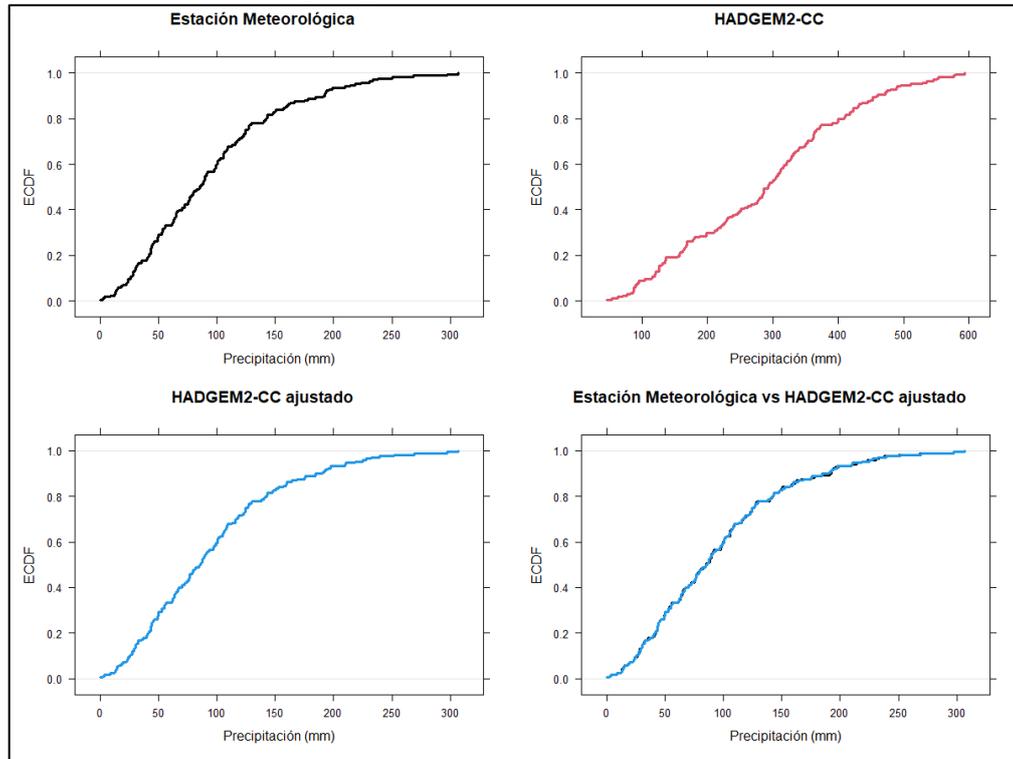
Anexo 61. Downscaling no paramétrico de HADGEM2 AO en torno estación Tuluca



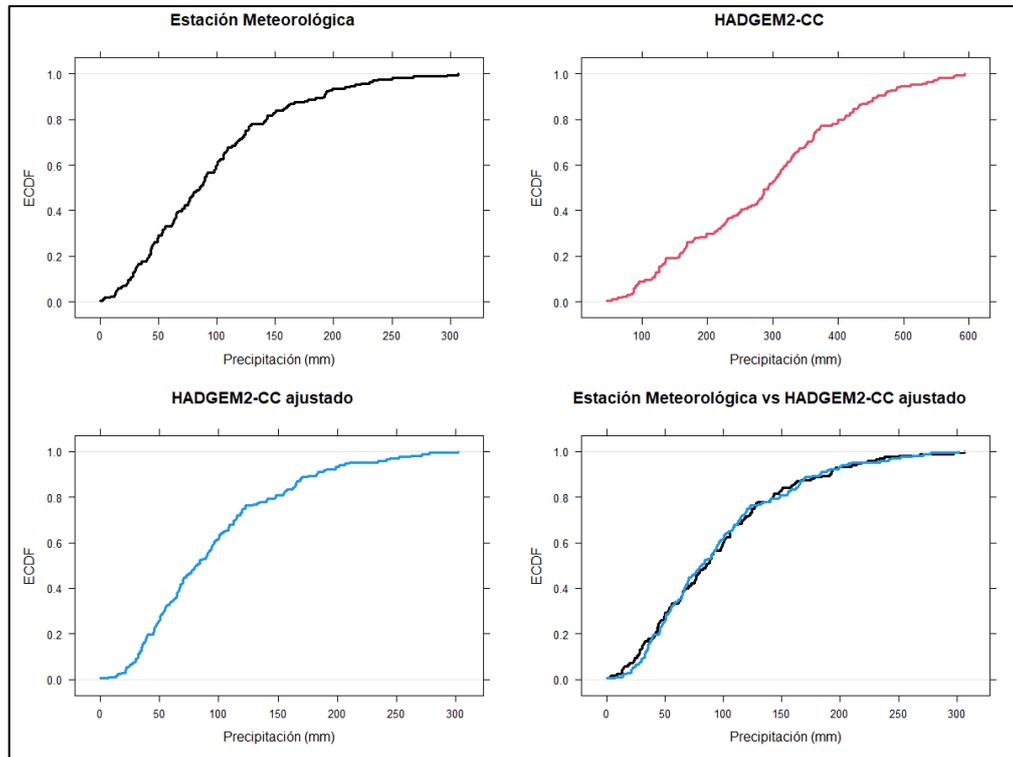
Anexo 62. Downscaling paramétrico de HADGEM2 AO en torno estación Tuluca



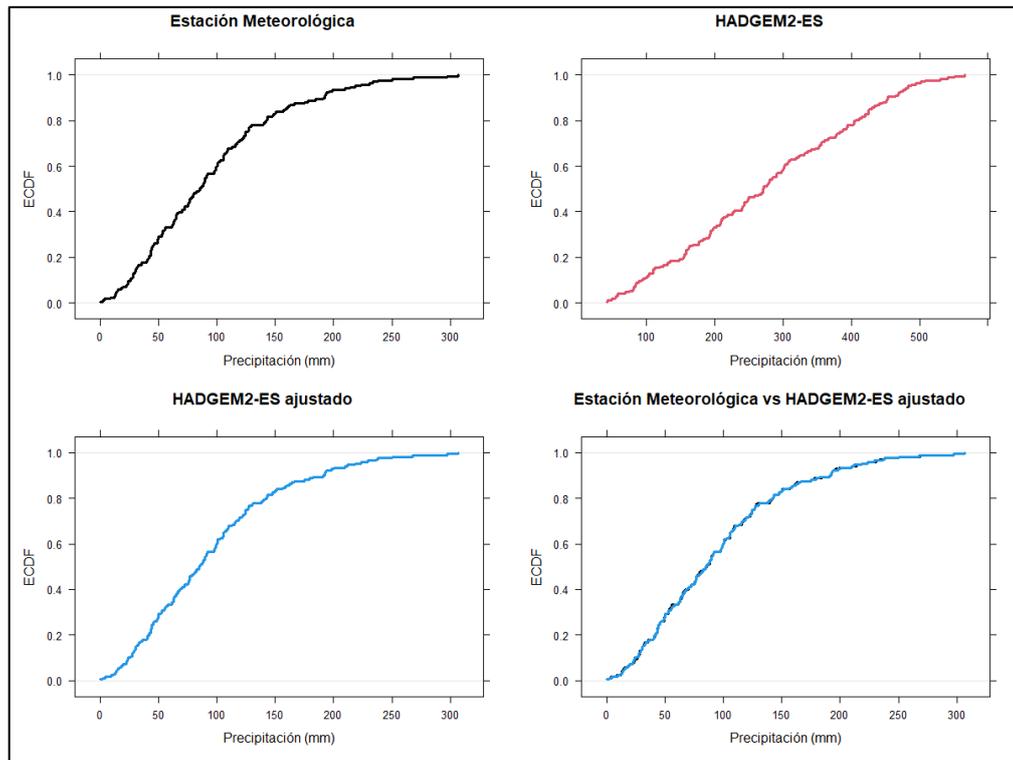
Anexo 63. Downscaling no paramétrico de HADGEM2 CC en torno estación Tuluca



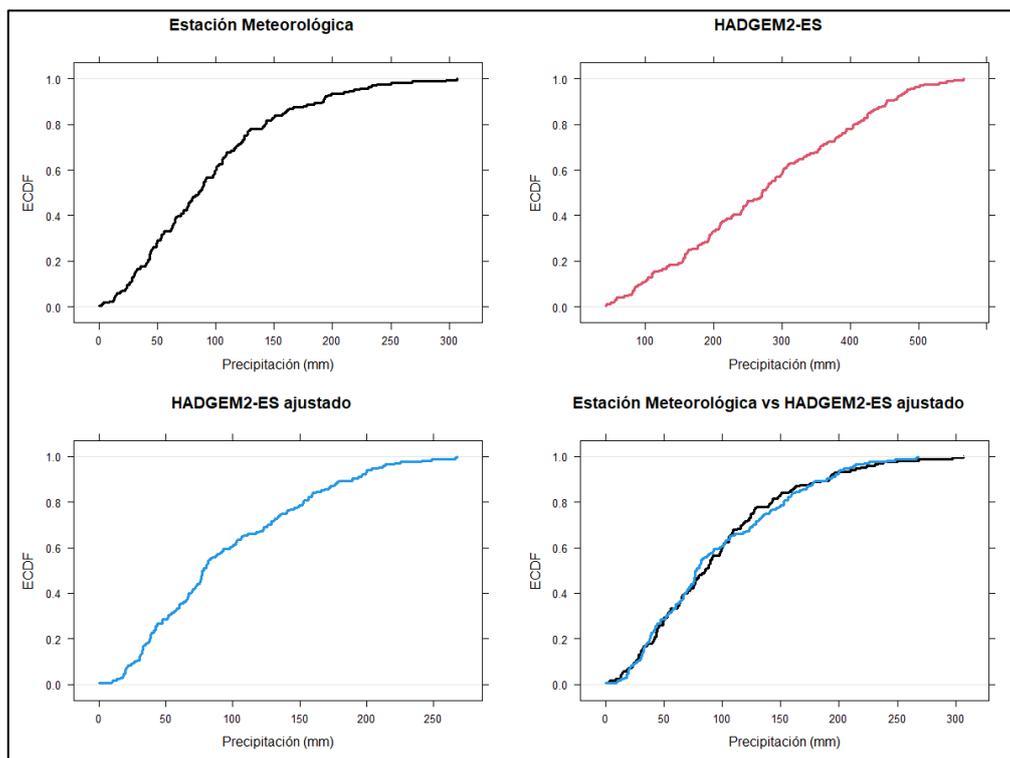
Anexo 64. Downscaling paramétrico de HADGEM2 CC en torno estación Tuluca



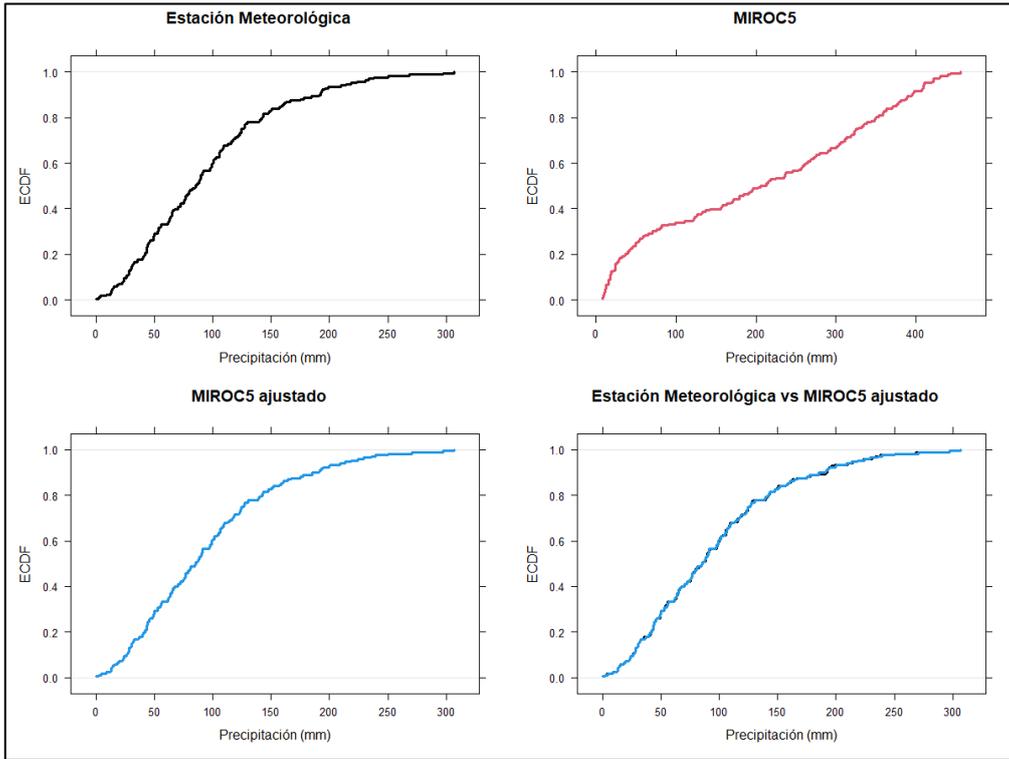
Anexo 65. Downscaling no paramétrico de HADGEM2 ES en torno estación Tuluca



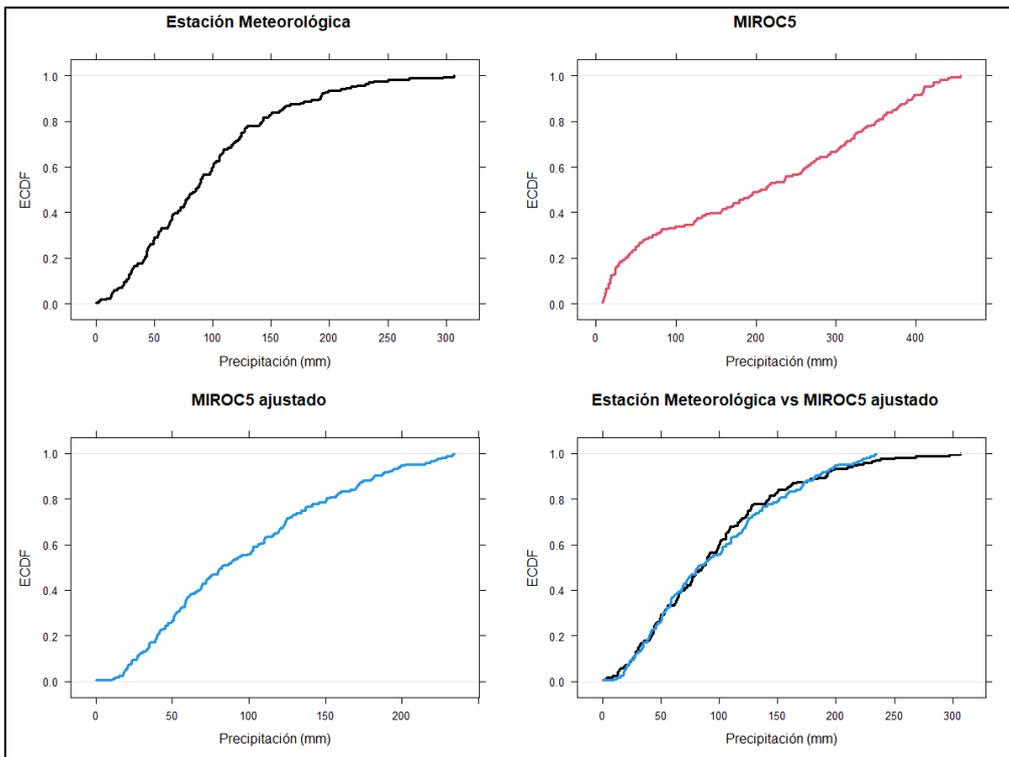
Anexo 66. Downscaling paramétrico de HADGEM2 ES en torno estación Tuluca



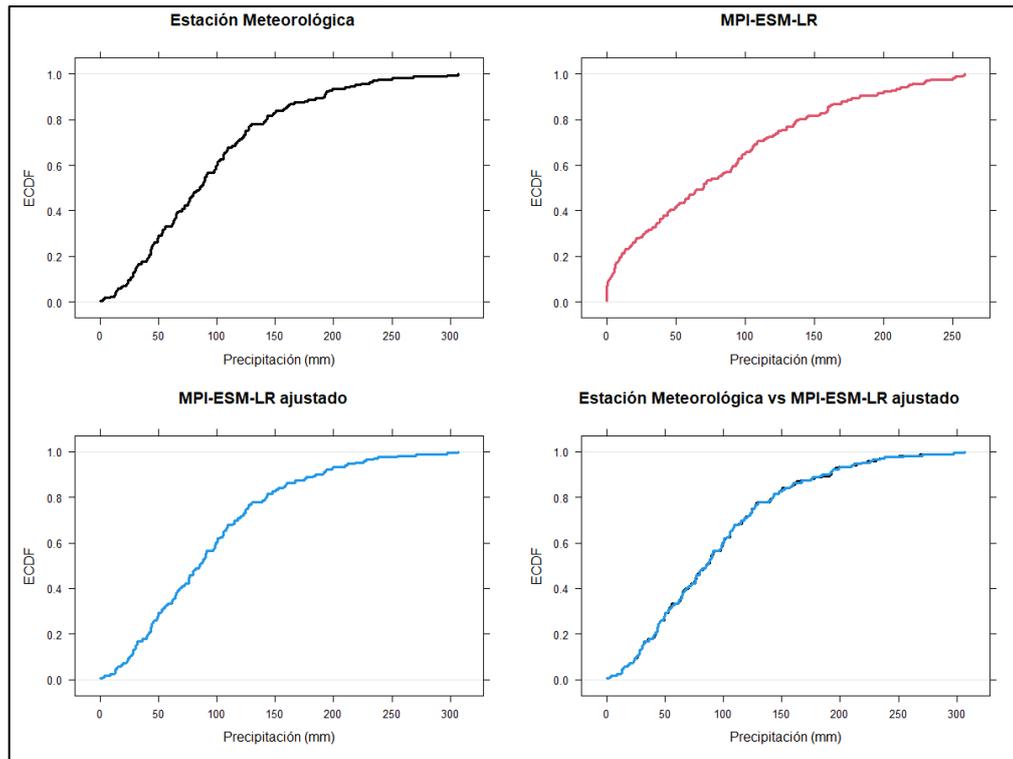
Anexo 67. Downscaling no paramétrico de MIROC5 en torno estación Tuluca



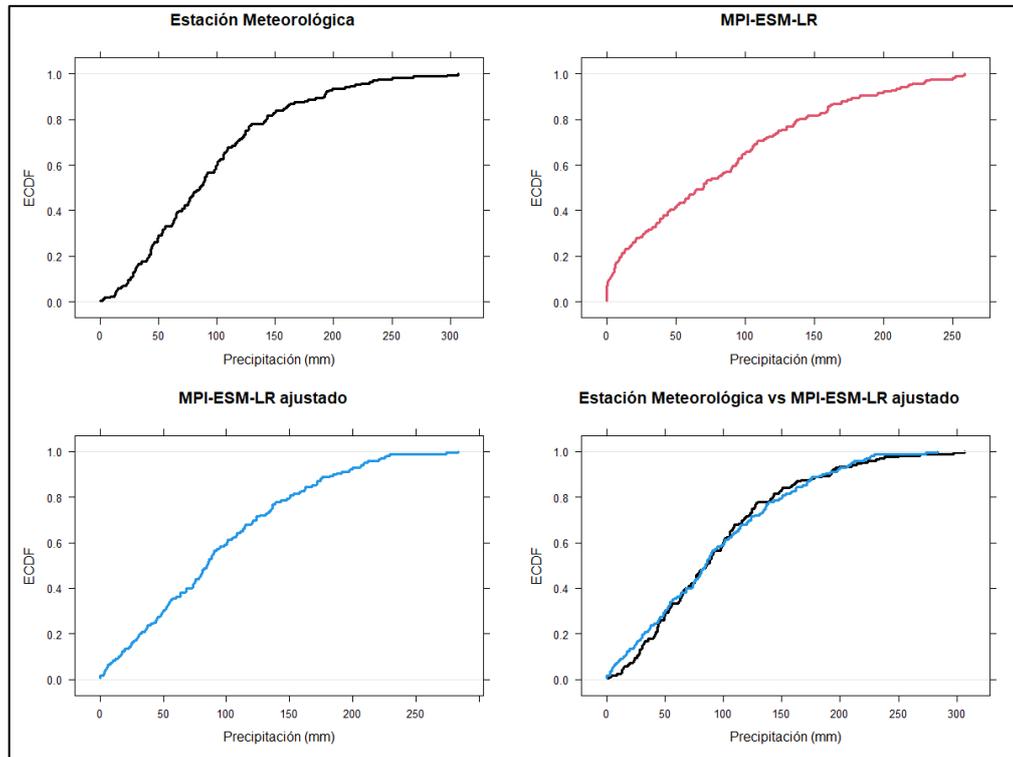
Anexo 68. Downscaling paramétrico de MIROC5 en torno estación Tuluca



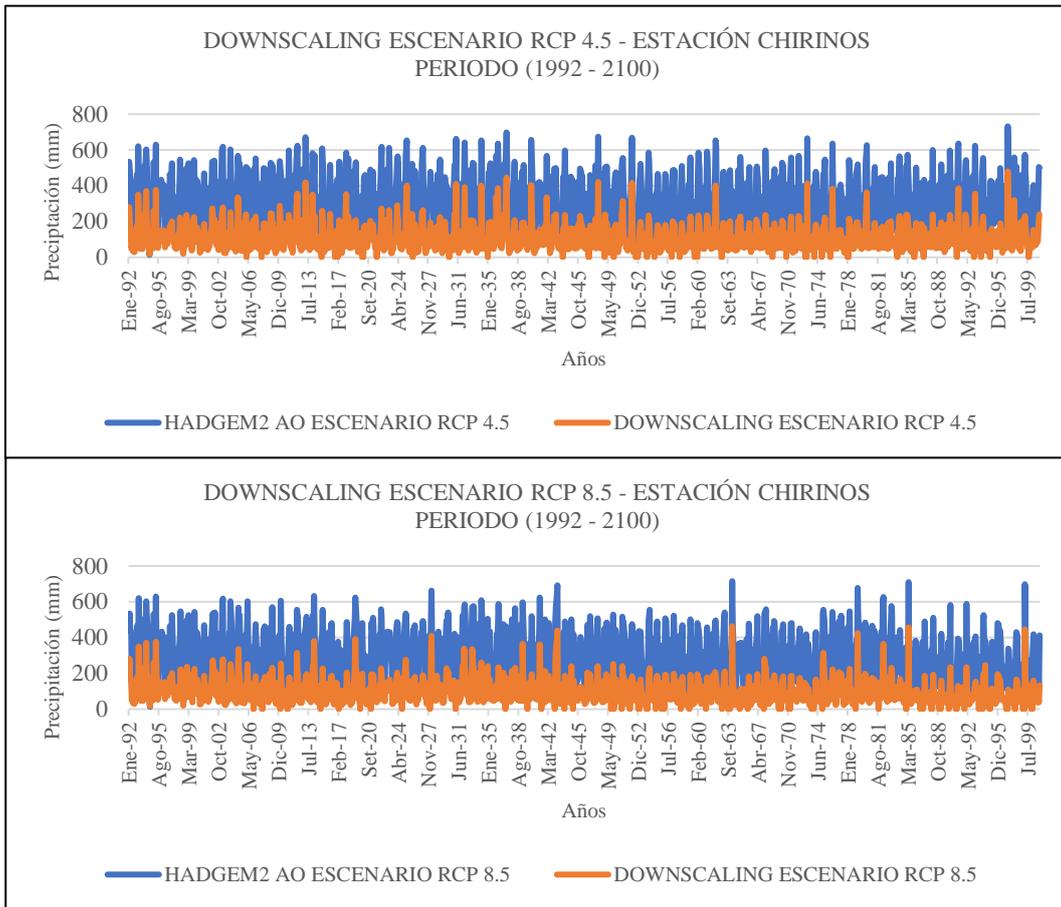
Anexo 69. Downscaling no paramétrico de MPI ESM LR en torno estación Tuluca



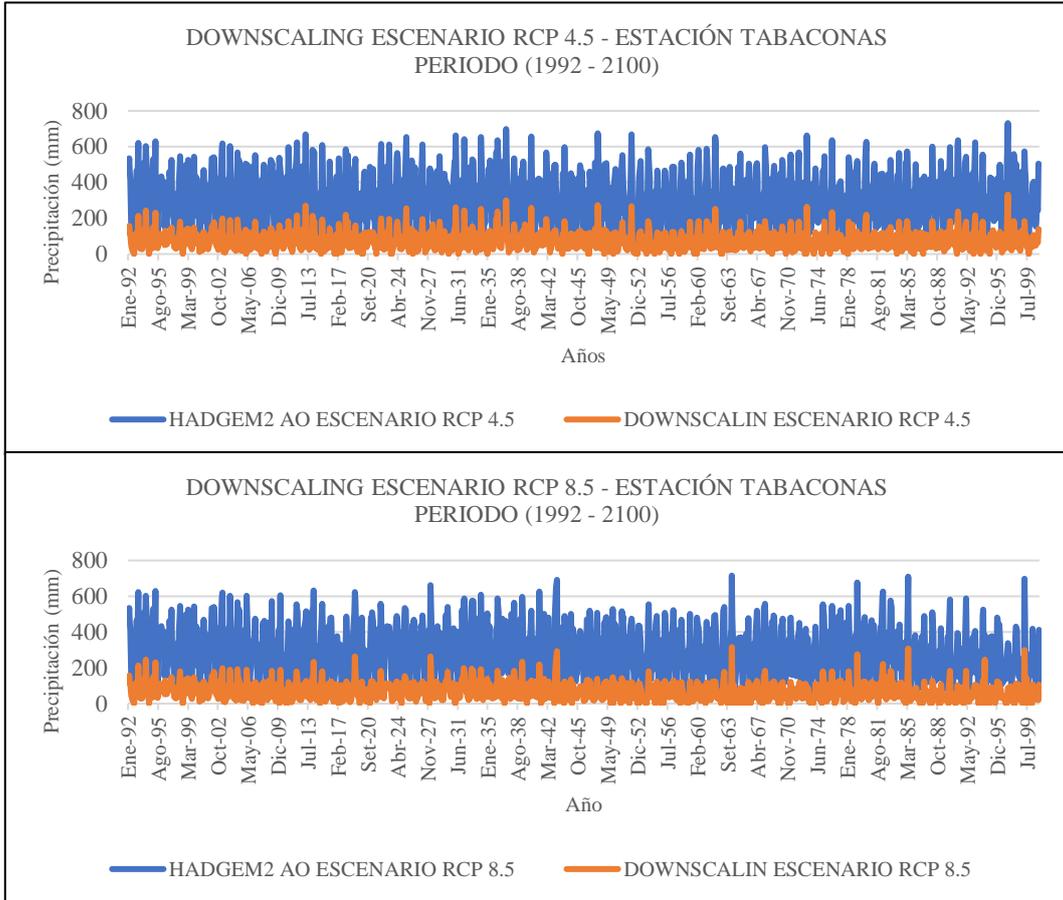
Anexo 70. Downscaling paramétrico de MPI ESM LR en torno estación Tuluca



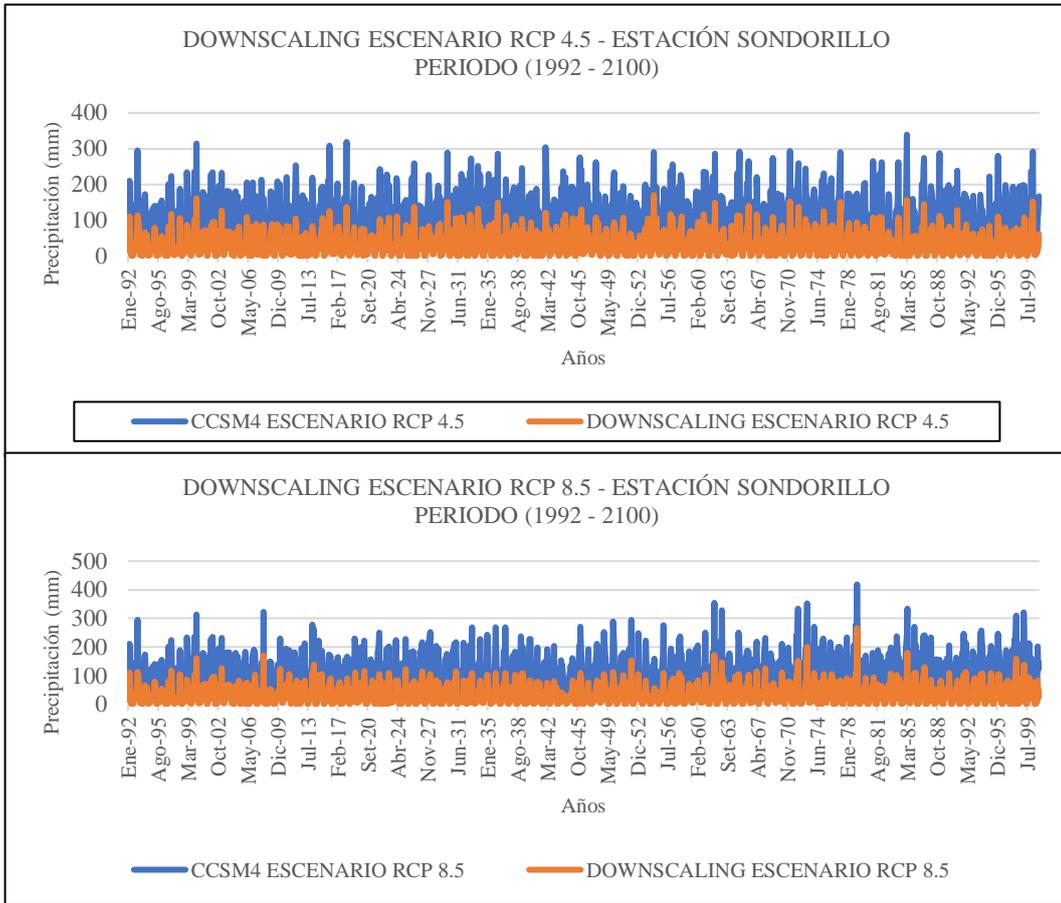
Anexo 71. Downscaling de escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5 en torno estación Chirinos



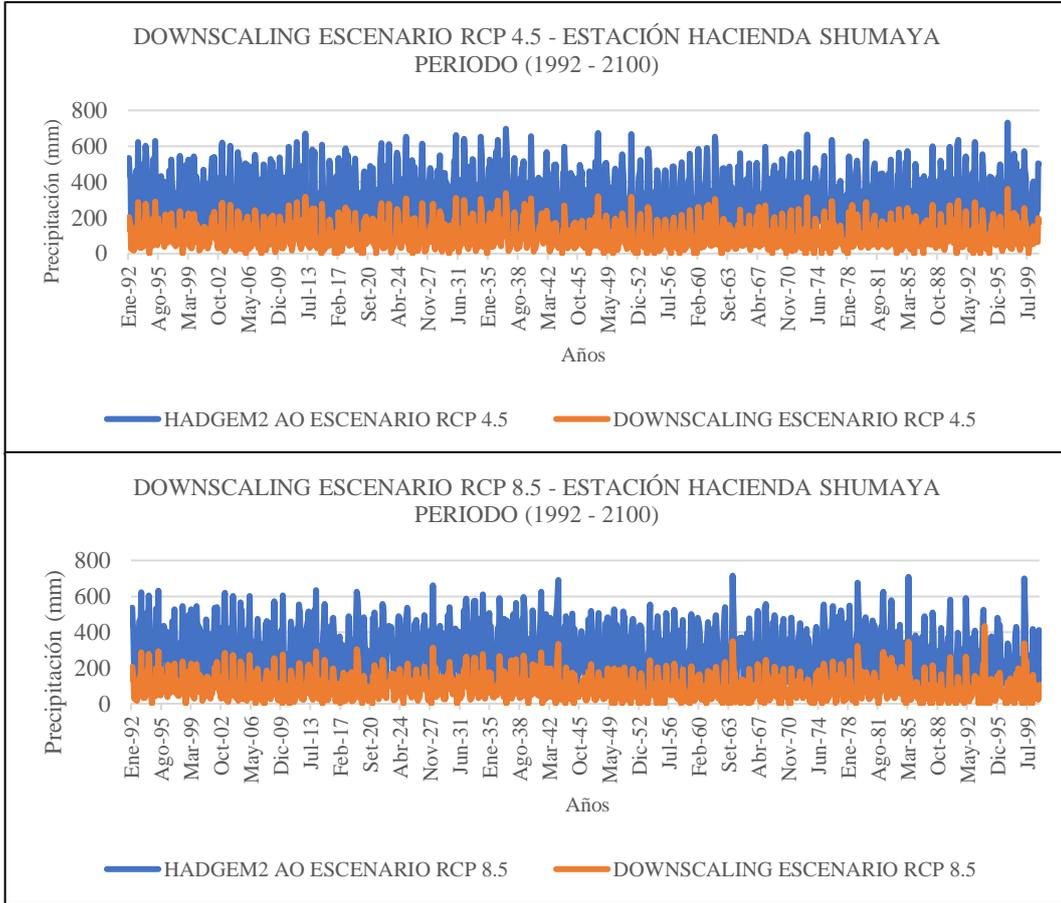
Anexo 72. Downscaling de escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5 en torno estación Tabaconas



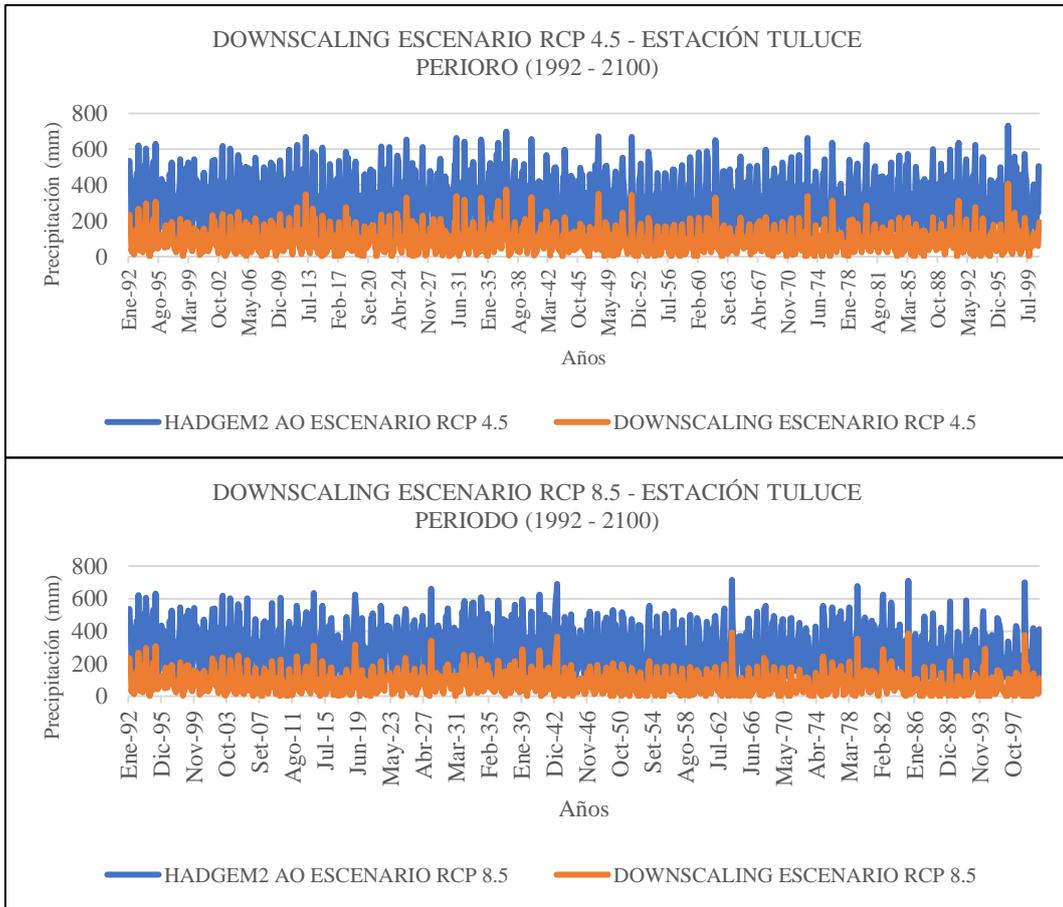
Anexo 73. Downscaling de escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5 en torno estación Sondorillo



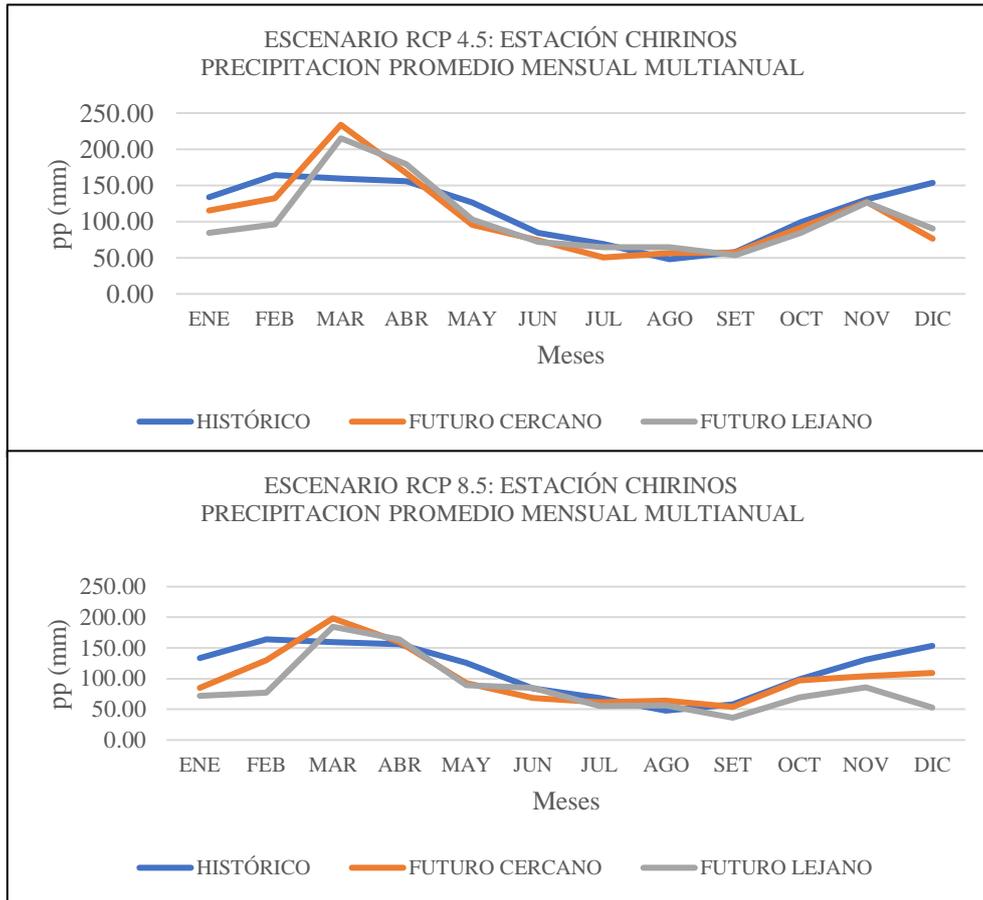
Anexo 74. Downscaling de escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5 en torno estación Hacienda Shumaya



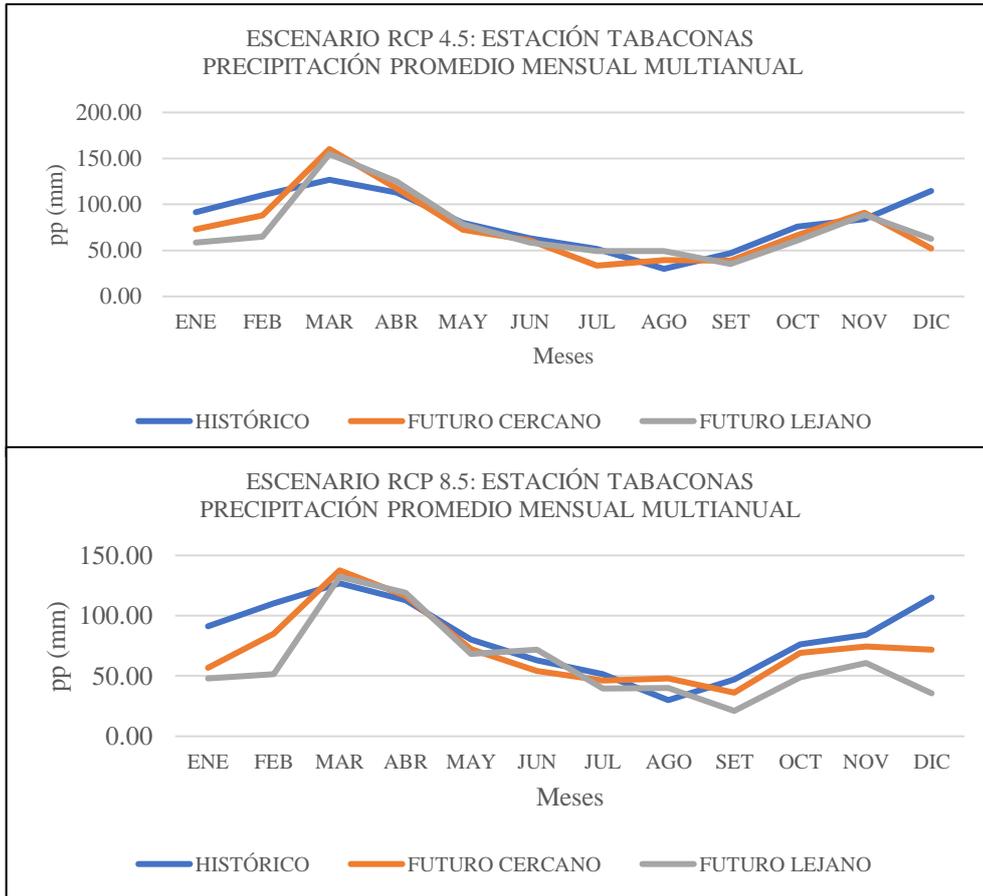
Anexo 75. Downscaling de escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5 en torno estación Tuluca



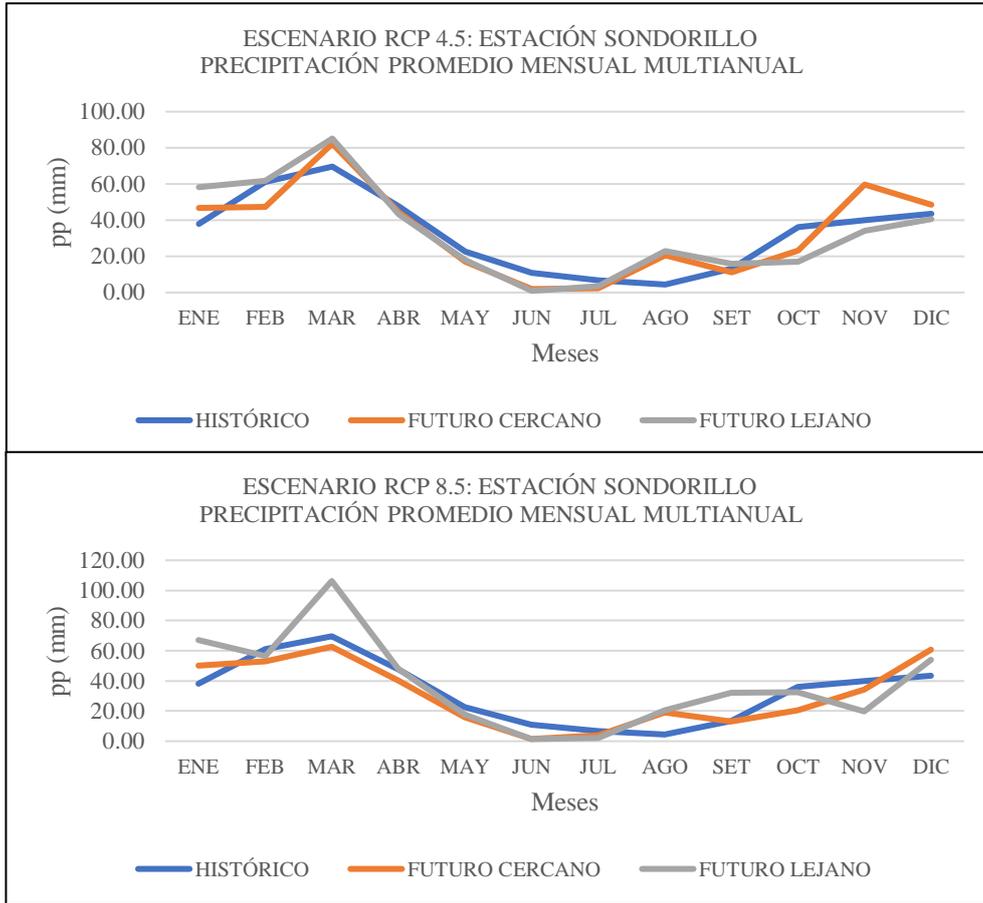
Anexo 76. Variabilidad de la precipitación bajo escenarios de cambio climático en estación Chirinos



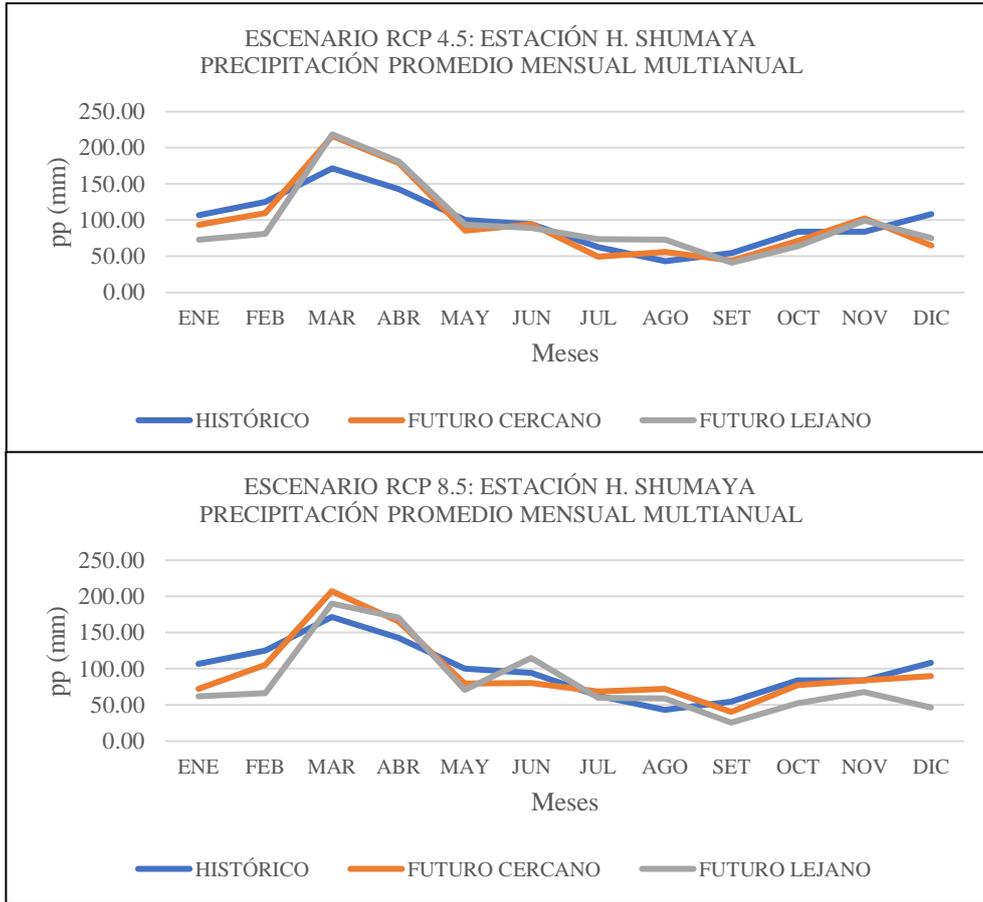
Anexo 77. Variabilidad de la precipitación bajo escenarios de cambio climático en estación Tabaconas



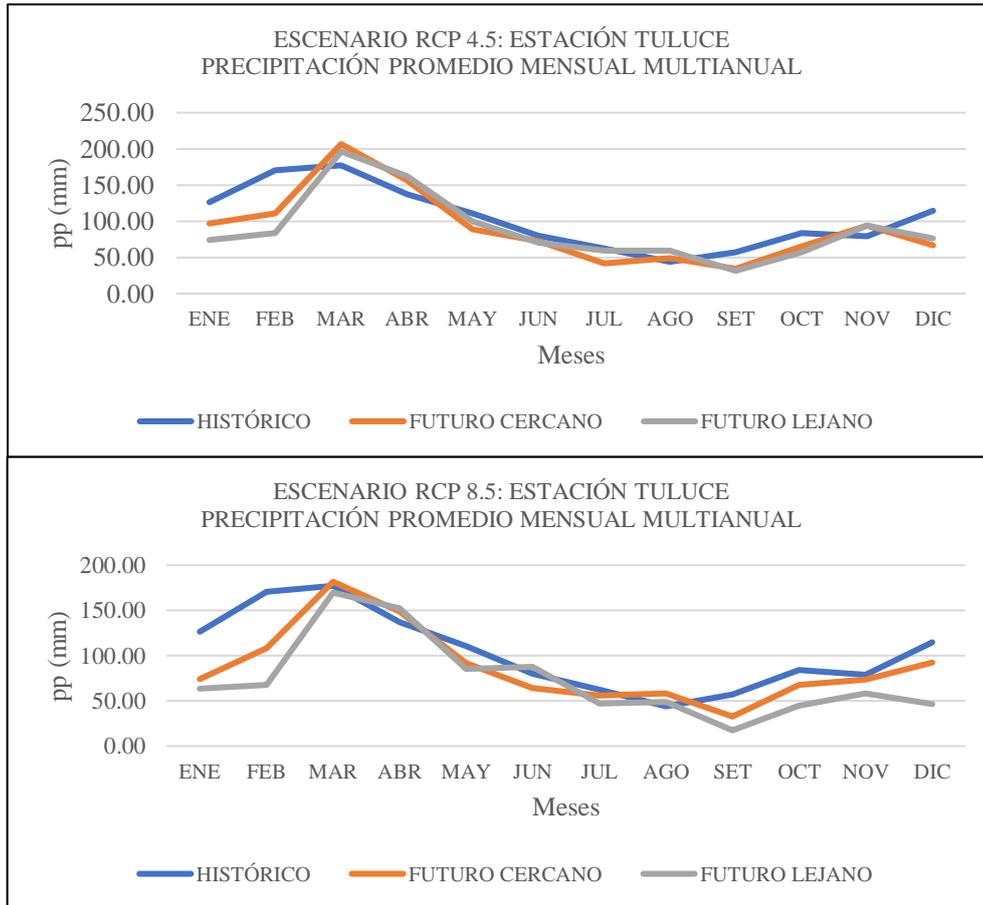
Anexo 78. Variabilidad de la precipitación bajo escenarios de cambio climático en estación Sondorillo



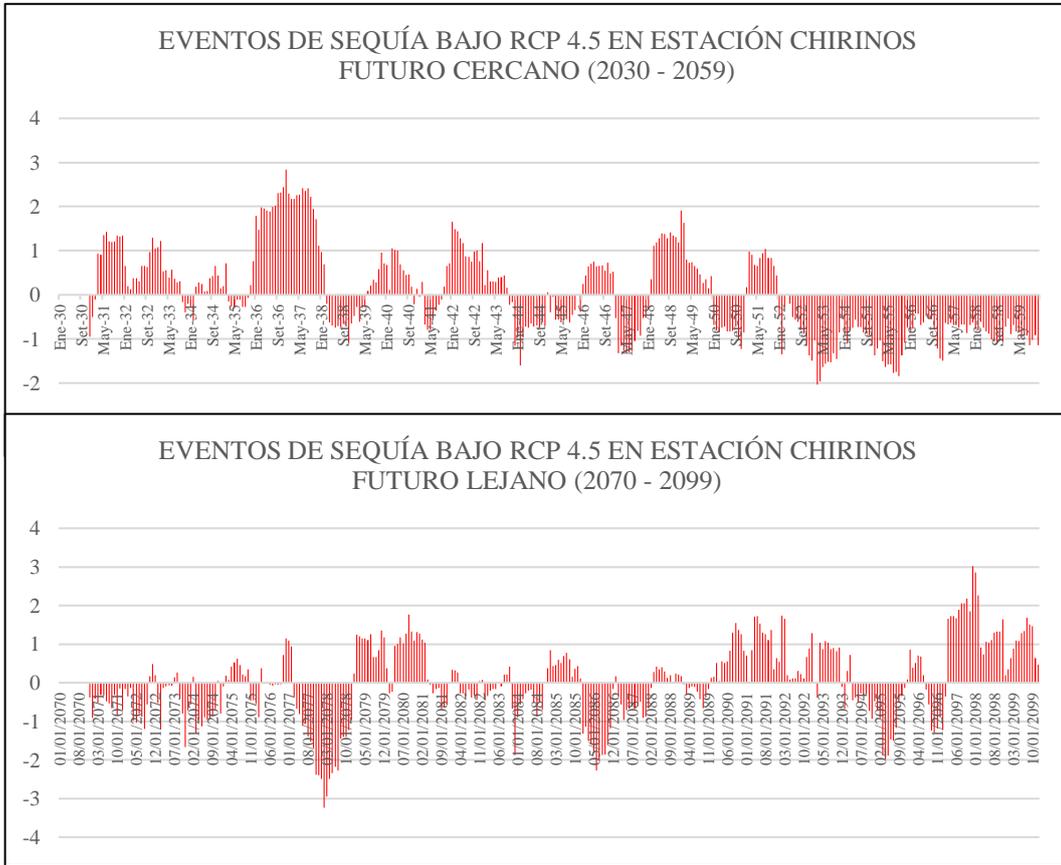
Anexo 79. Variabilidad de la precipitación bajo escenarios de cambio climático en estación Tabaconas



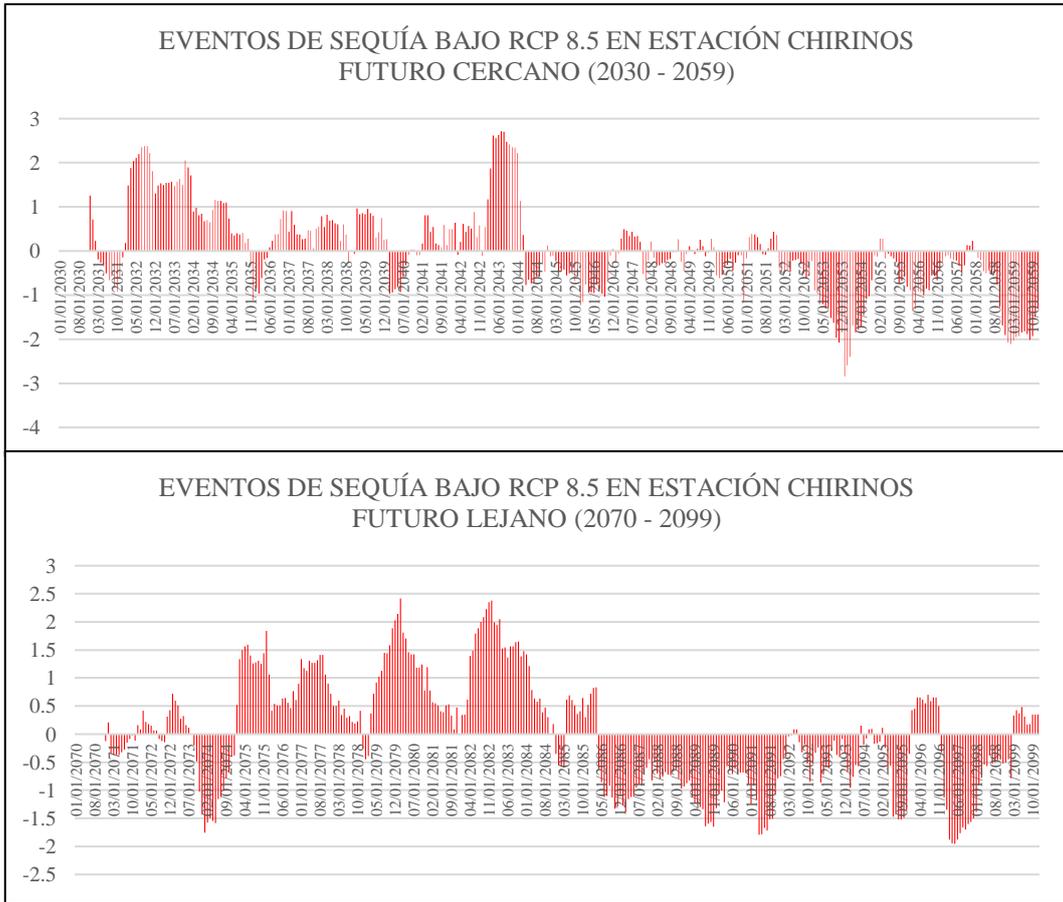
Anexo 80. Variabilidad de la precipitación bajo escenarios de cambio climático en estación Tuluca



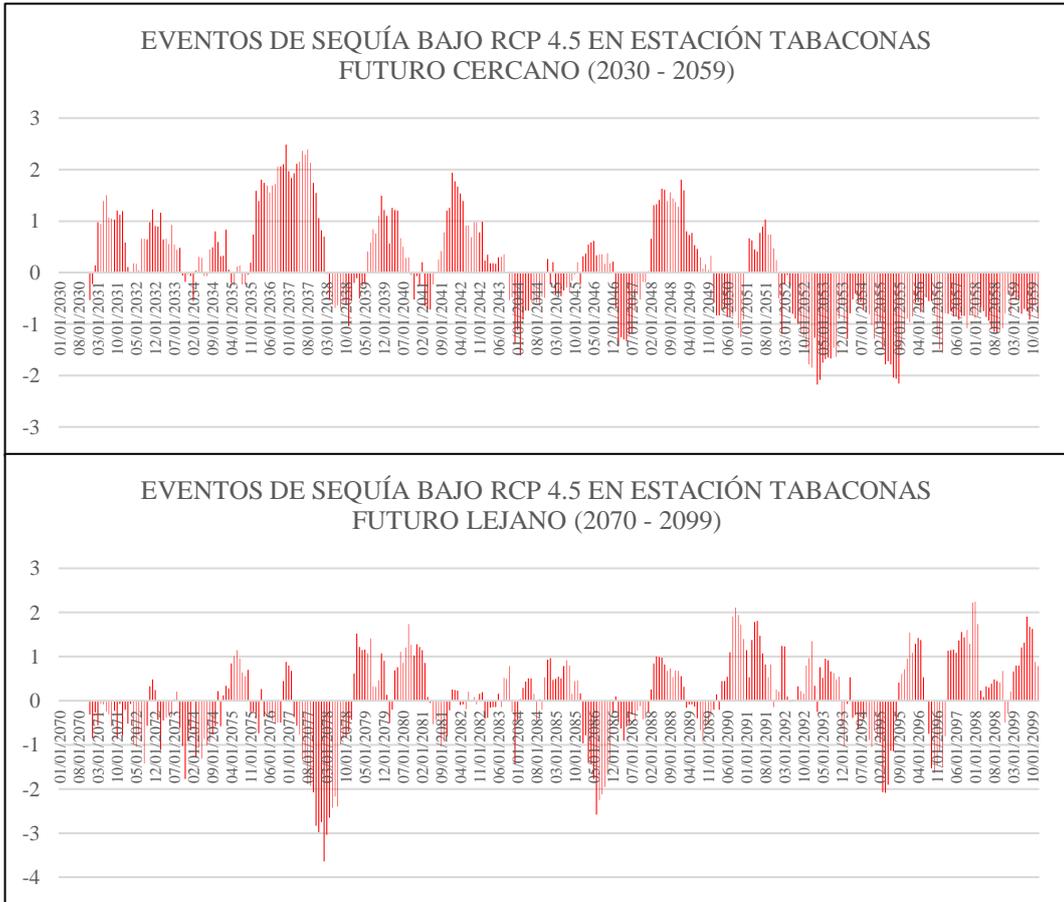
Anexo 81. Serie de tiempo de SPI bajo escenario de cambio climático RCP 4.5 en estación Chirinos



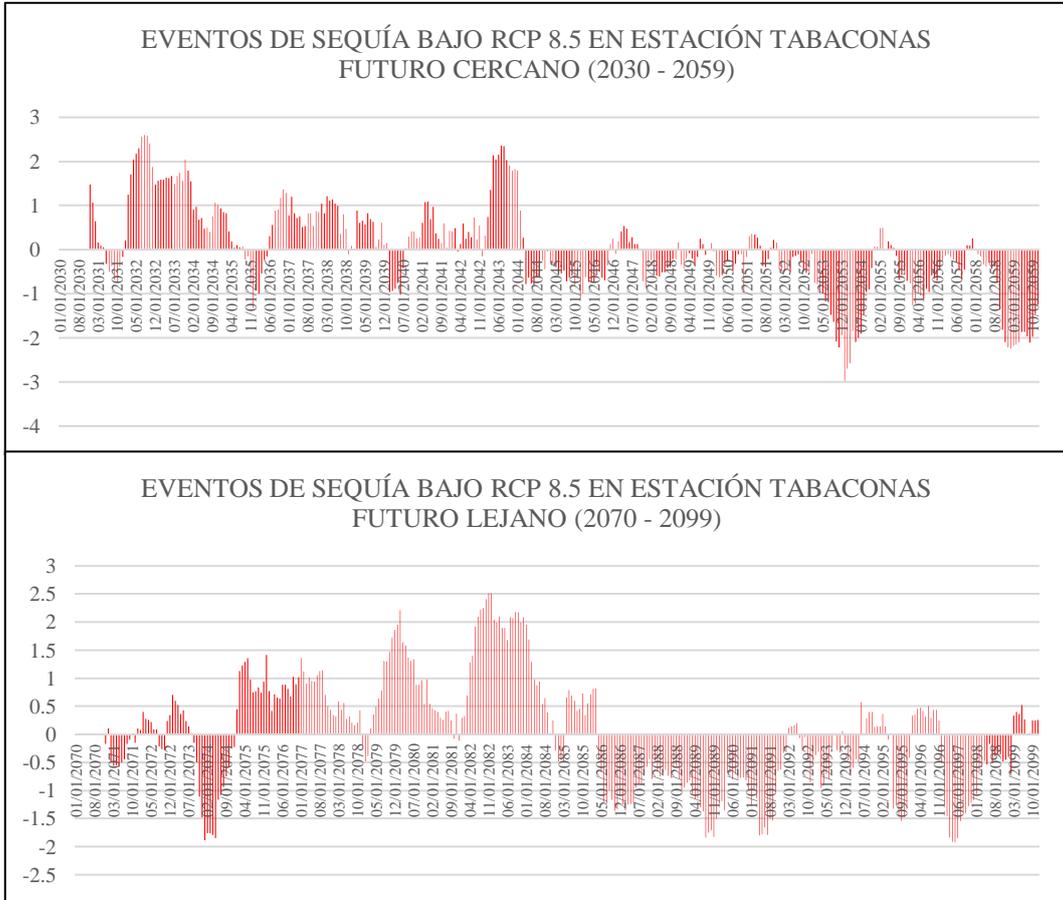
Anexo 82. Serie de tiempo de SPI bajo escenario de cambio climático RCP 8.5 en estación Chirinos



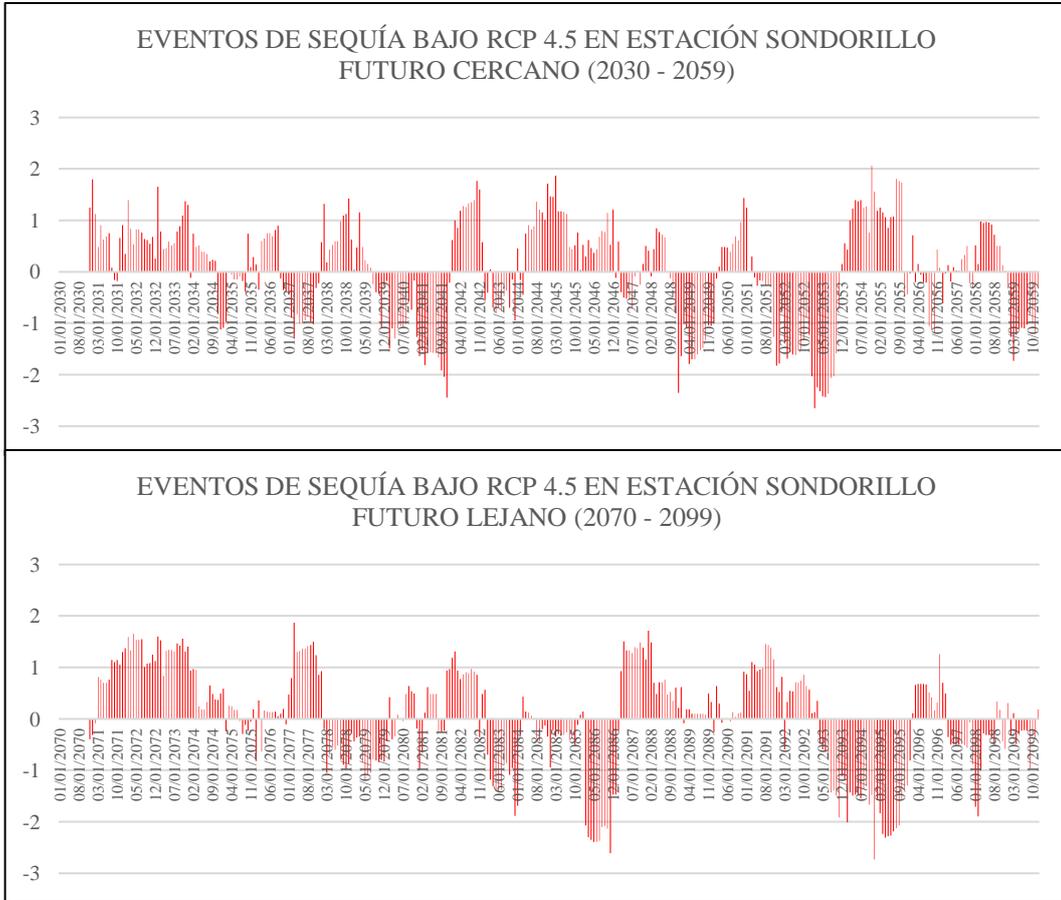
Anexo 83. Serie de tiempo de SPI bajo escenario de cambio climático RCP 4.5 en estación Tabaconas



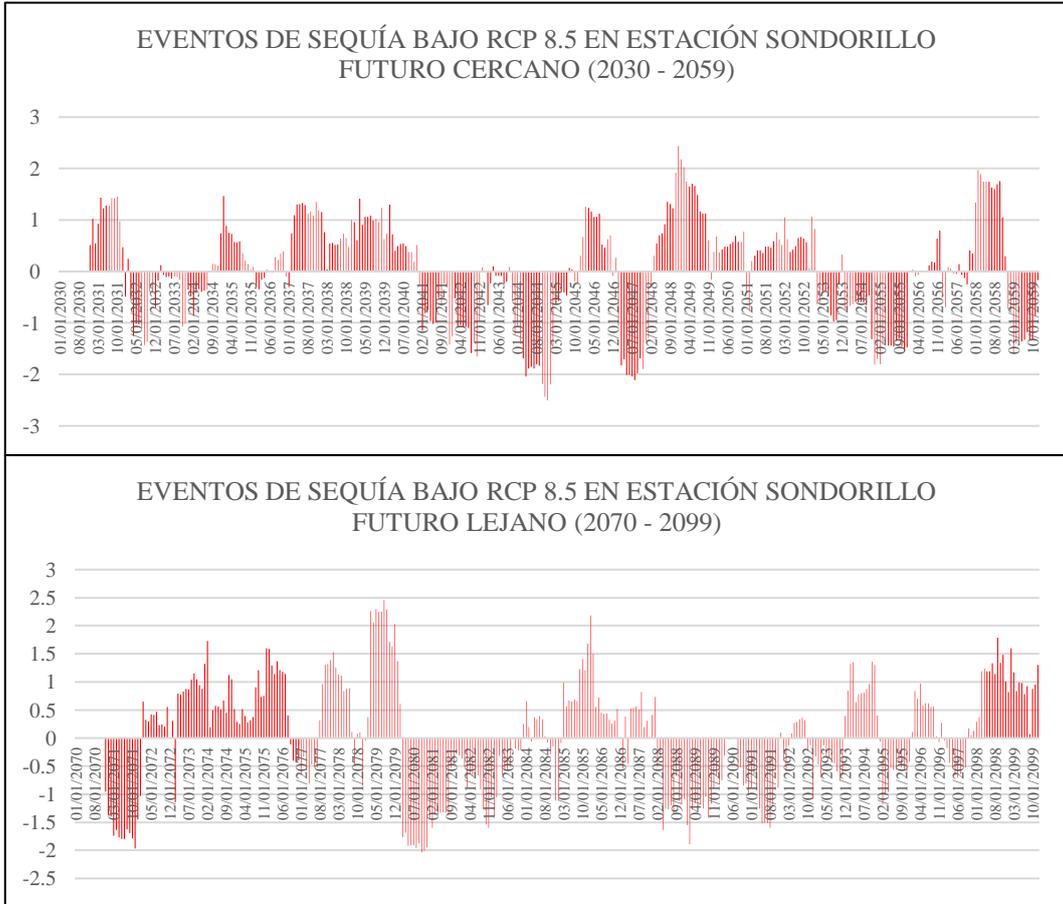
Anexo 84. Serie de tiempo de SPI bajo escenario de cambio climático RCP 8.5 en estación Tabaconas



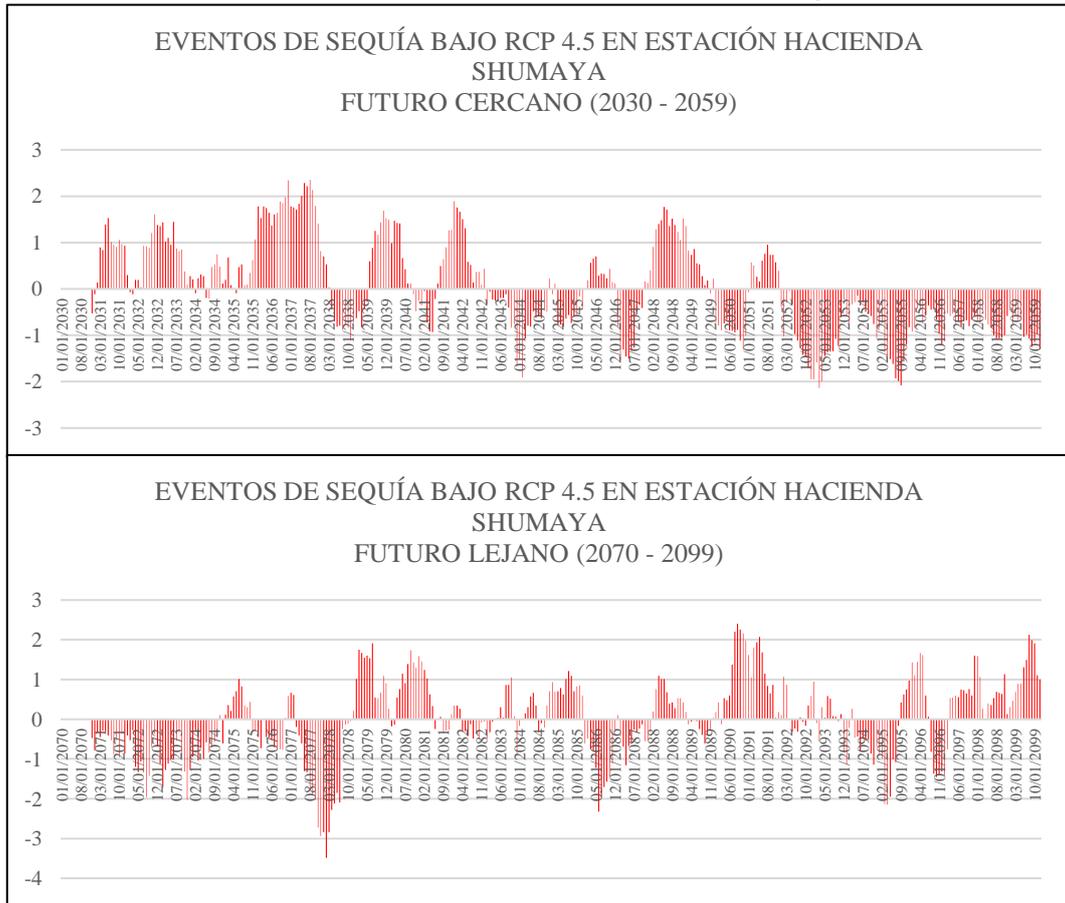
Anexo 85. Serie de tiempo de SPI bajo escenario de cambio climático RCP 4.5 en estación Sondorillo



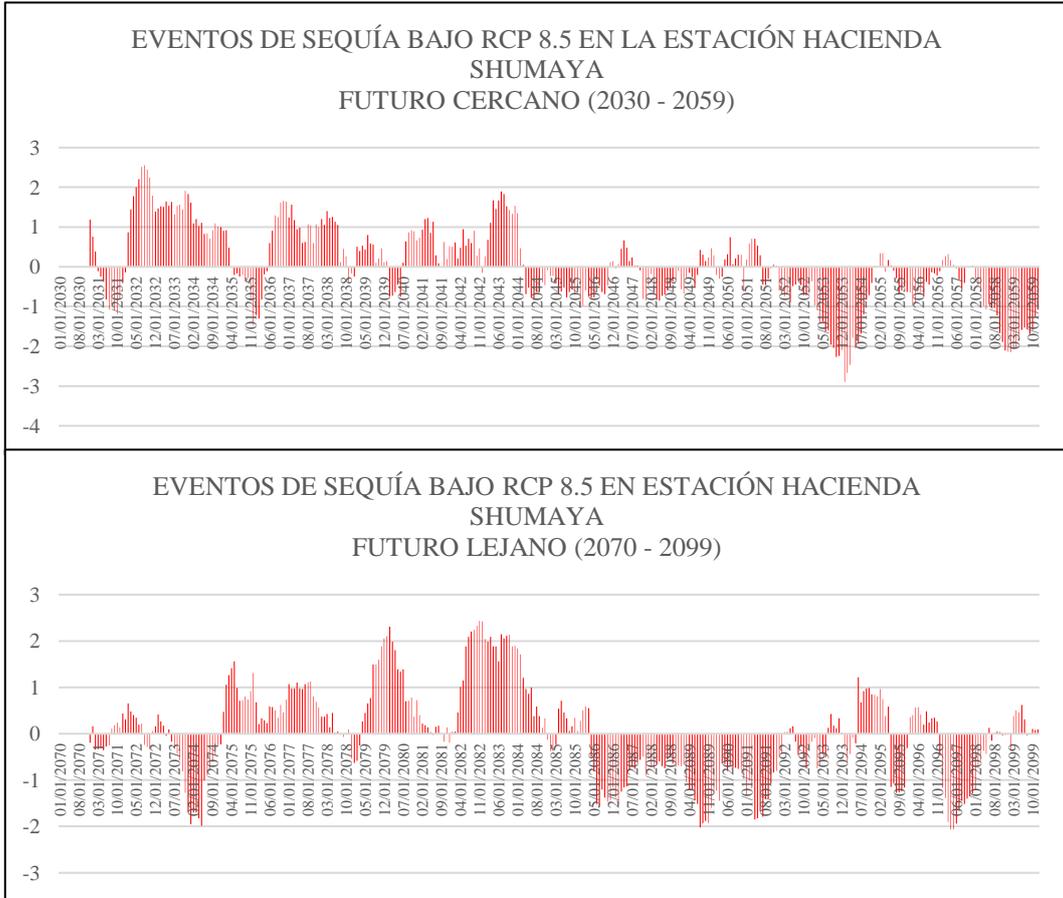
Anexo 86. Serie de tiempo de SPI bajo escenario de cambio climático RCP 8.5 en estación Sondorillo



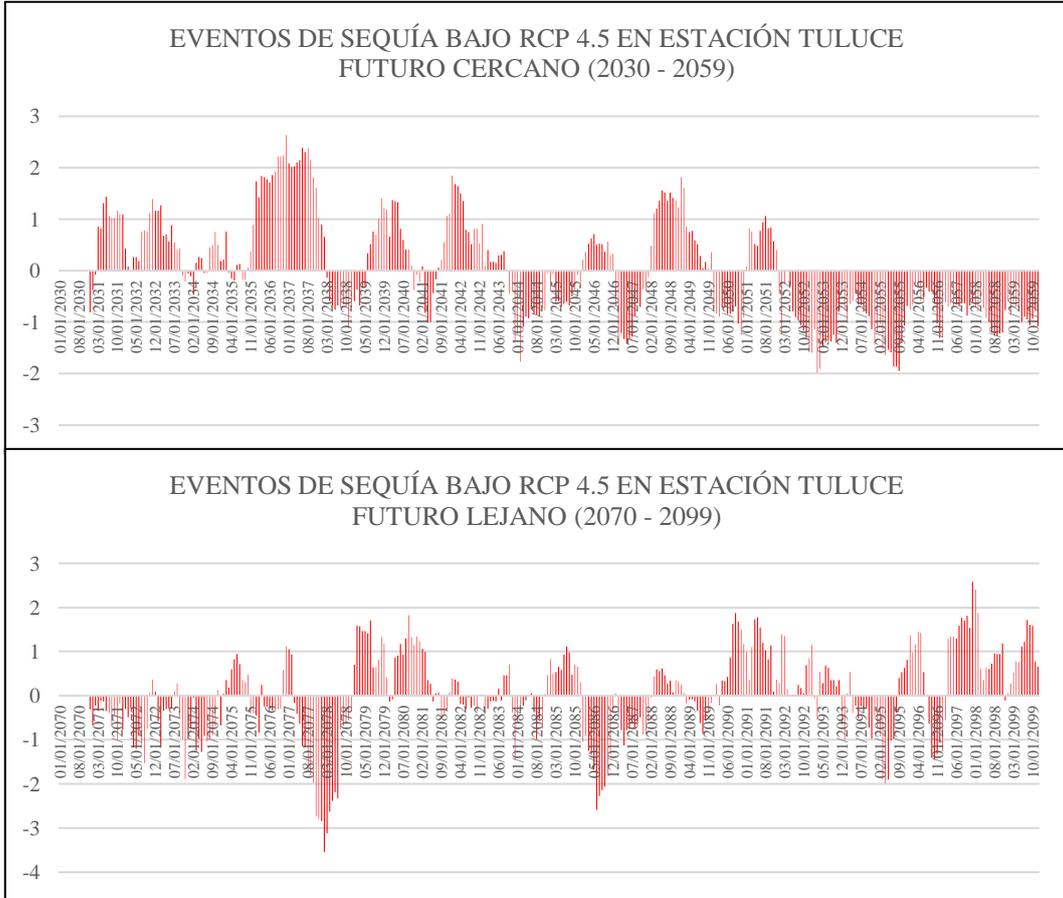
Anexo 87. Serie de tiempo de SPI bajo escenario de cambio climático RCP 4.5 en estación Hacienda Shumaya



Anexo 88. Serie de tiempo de SPI bajo escenario de cambio climático RCP 8.5 en estación Hacienda Shumaya



Anexo 89. Serie de tiempo de SPI bajo escenario de cambio climático RCP 4.5 en estación Tuluca



Anexo 90. Serie de tiempo de SPI bajo escenario de cambio climático RCP 8.5 en estación Tuluze

