



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**DETERMINACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA LA
PREDICCIÓN DE FORZANTES METEOROLÓGICAS A
ESCALA LOCAL EN UN CLIMA NO ESTACIONARIO.
APLICACIÓN A CUENCAS DE CHILE CENTRAL**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
ANDRÉS SALAZAR MOREY**

PROFESORA GUÍA:
XIMENA VARGAS MESA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
JAMES MCPHEE TORRES
EDUARDO RUBIO ÁLVAREZ

SANTIAGO DE CHILE
2017

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE: Ingeniero Civil
POR: Andrés Antonio Salazar Morey
FECHA: Enero 2017
PROFESOR GUÍA: Ximena Vargas Mesa

DETERMINACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA LA PREDICCIÓN DE FORZANTES METEOROLÓGICAS A ESCALA LOCAL EN UN CLIMA NO ESTACIONARIO. APLICACIÓN A CUENCAS DE CHILE CENTRAL

Actualmente, los Modelos de Circulación Global, MCG, intentan simular series de tiempo de las forzantes meteorológicas con precisión; sin embargo, la representatividad de estos modelos a nivel de cuencas puede no ser adecuada, debido principalmente a su baja resolución espacial. Para llevar a cabo el proceso de escalamiento de las proyecciones del MCG a nivel local, se requiere la existencia de datos concurrentes entre estaciones de medición locales y las proyecciones del MCG en un periodo de línea base, con el fin de determinar una relación estadística entre lo observado y lo simulado, mediante dicha relación, se aplica una corrección al período futuro, considerando además que las series son estacionarias. Sin embargo, la hipótesis básica del cambio climático es precisamente que existe una tendencia, lo que significa un cambio ya sea en la media o en la varianza de la serie temporal, contradiciendo la existencia de estacionareidad.

Este trabajo de investigación consistió en plantear un procedimiento para proyectar datos de precipitación y temperatura, las forzantes meteorológicas más utilizadas en hidrología, a una escala local, es decir al nivel de una cuenca considerando un escenario no estacionario, adoptando en esta etapa una tendencia en la media de la variable en estudio.

Para dichos efectos se consideraron los resultados de un modelo de circulación global, seleccionado considerando como criterio apropiado el análisis de la estacionalidad. Teniendo además como base la existencia de información de larga data, entre 100 a 150 años de información, en tres estaciones meteorológicas de la Dirección Meteorológica de Chile, DMC: Aeropuerto La Florida en La Serena, Quinta Normal en Santiago y Aeropuerto Carriel Sur en Concepción.

Considerando el hecho de que existen evidencias de tendencia a la disminución de precipitación y al aumento de temperatura en cuencas de Chile central, se crea una oportunidad para desarrollar una metodología que incorpore la existencia de la no estacionareidad y así mejorar las proyecciones futuras de las forzantes.

Los resultados obtenidos, permiten verificar que la metodología resulta ser certera cuando los tipos de tendencia, ya sean al aumento o la disminución de la media de la forzante, coinciden entre las proyecciones del MCG y las observaciones locales.

AGRADECIMIENTOS

Antes que todo, quiero agradecer a familia. A mis padres, por su comprensión y apoyo incondicional, por estar siempre a mi lado a pesar de las circunstancias, y no solo a lo largo de esta carrera, sino a lo largo de toda mi vida. También quiero agradecer a mis hermanos, Carlos, Carolina y Paulina, que desde chico me han guiado, y han hecho mi vida un poco más fácil gracias a sus consejos y enseñanzas. Tampoco puedo dejar afuera a mi Abuelita, a quién considero una segunda madre, gracias también por todo lo que me entregaste y por sobre todo, enseñarme a ser una mejor persona.

Quiero agradecer a todos los amigos que hice en mi época universitaria, Cami, Contru, Ulloa, Caicha y muchos otros, en general a los de plan común, los civiles y los de hidráulica. Infinitos momentos que jamás olvidaré, gracias por acompañar a esas cervezas en la tarde que hacían más ameno el estudio, y también al aguante y convicción que mostraron cada vez que estudiábamos para algún control. También a mis amigos y amigas de La Serena que me han acompañado toda la vida, que han estado siempre en los momentos difíciles, y siempre están dispuestos a sacarme una sonrisa con sus tallas.

Agradecimientos especiales también al Mota, al Nico y al Seelmann, que fueron parte fundamental del desarrollo de esta memoria, gracias al apoyo técnico y la buena onda por compartir parte de su tiempo y trabajo conmigo.

Sin duda, agradezco mi profesora guía Ximena Vargas, por su paciencia, interés y voluntad, durante más de un año de desarrollo de este trabajo, siempre preocupada y dispuesta a ayudar. Agradezco también a los profesores de la comisión James McPhee y Eduardo Rubio, por su colaboración y compromiso con esta memoria.

Por último, quiero hacer mención de un compañero que ya no se encuentra con nosotros, pero con el cual me siento en deuda y eternamente agradecido, gracias Oscar, por todo lo que nos enseñaste, por siempre prestarnos ayuda, y porque siempre creíste en todos nosotros. Gracias a tu familia, por todo el cariño que nos entregaron, por su voluntad y solidaridad, por siempre aguantarnos en tu casa cuando estudiábamos y por los innumerables buenos momentos.

Así culmina una etapa llena de altos y bajos, pero con el gusto de haber ganado una de las experiencias más valiosas de mi vida.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos	2
1.2 Organización del informe	3
CAPÍTULO II: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Clima y cambio climático.....	4
2.2 Forzantes meteorológicas y estacionareidad	8
2.3 Predicción del clima	10
2.3.1 Modelos de circulación general	11
2.3.2 Escalamiento estadístico	12
2.3.3 Escalamiento estadístico en climas no estacionarios.....	13
2.4 Selección de un MCG adecuado.....	16
CAPÍTULO III: CARACTERIZACIÓN DE ZONAS DE ESTUDIO	18
3.1 Estación Meteorológica La Serena, Aeropuerto La Florida.....	18
3.2 Estación Meteorológica Quinta Normal, Oficinas DMC.....	19
3.3 Estación Meteorológica Concepción, Aeropuerto Carriel Sur:	21
CAPÍTULO IV: RECOPIACIÓN Y PREPARACIÓN DE DATOS.....	23
4.1 Datos observados	23
4.2 Selección del MCG.....	24
4.3 Datos simulados	31
CAPÍTULO V: MODELACIÓN DE LA NO ESTACIONAREIDAD.....	33
5.1 Obtención de la relación para el cambio de variables:	33
5.2 Escalamiento espacial:	37
5.3 Determinación de los periodos de calibración y validación para el método del cambio de variables.....	50
CAPÍTULO VI: CORRECCIÓN DE SESGO.....	52
6.1 Método del cambio de variables:	52
6.2 Método de la medida de la incertidumbre:	58
CAPÍTULO VII: VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA.....	61
7.1 Método del cambio de variables:	61
7.2 Método de la medida de la incertidumbre:	70
CAPÍTULO VIII: ANÁLISIS DE RESULTADOS	79
8.1 Método del cambio de variables:	79
8.2 Método de la medida de la incertidumbre:	81
CAPÍTULO IX: CONCLUSIONES.....	83

9.1	Consideraciones generales de la metodología.....	83
9.2	Cumplimiento de objetivos y conclusiones generales	84
BIBLIOGRAFÍA.....		86

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

El cambio climático está afectando a gran parte del planeta, y es de interés estudiarlo tanto por la responsabilidad social que ello significa, como también por la implicancia que tiene en los estudios y proyectos que se deseen realizar a futuro, generando así una visión más amplia, que también permite tomar mejores decisiones. Teniendo en cuenta lo anterior, es posible señalar que los cambios en forzantes meteorológicas traen consigo una perturbación en todo el balance hídrico, afectando así a la escorrentía superficial (Molina, 2007). Esto está relacionado directamente con el diseño de obras hidráulicas, pudiendo significar un aumento en el caudal de diseño si se consideran los efectos de aumentar la longitud de la información hidrológica en el cálculo del periodo de retorno como señala Arias (2011), quien obtiene para el caudal milenario un aumento de hasta el 23,9% en cuencas de la Región Del Maule. Luego, desde el punto de vista hidrológico resulta fundamental el análisis de la variación de las forzantes meteorológicas debidas al cambio climático.

Aunque existen distintos Modelos de Circulación Global, MCG (o GCM, por su sigla en inglés Global Climate Model), para simular lo que puede ocurrir en el futuro, estos poseen baja resolución espacial, por lo que para hacer estudios a nivel de cuenca, se requiere utilizar una técnica de escalamiento (downscaling) consiguiendo de esta forma, las forzantes a nivel local. Existen dos técnicas para esto (Hamlet et al., 2010), el escalamiento dinámico, (DD por sus siglas en inglés, Dynamical Downscaling) y el escalamiento estadístico (SD, por sus siglas en inglés, Statistical Downscaling). El escalamiento dinámico se basa en el empleo de modelos de circulación regional, MCR (RCM, por sus siglas en inglés Regional Climate Model), utilizando grillas más pequeñas, cuyas condiciones de borde están dadas por el MCG, y además tomando en cuenta variables como la topografía con una mejor resolución, que la considerada en los MCG. Por otro lado, el escalamiento estadístico, utiliza los datos simulados de un MCG, estableciendo una relación en base a los datos observados históricos de la región en la cual se desea obtener mayor resolución. El escalamiento dinámico está fuertemente restringido por los requerimientos computacionales, por lo que esta investigación se limita a la utilización del escalamiento estadístico.

Lo usual en los estudios realizados en el país (Ayala et al., 2009; Lagos y Vargas, 2009; McPhee et al., 2009; Lagos y Vargas, 2012; Gómez et al., 2013; Vargas et al., 2013; Lagos et al., 2015) ha sido utilizar el escalamiento estadístico donde, luego de escalar espacialmente la variable al punto de medición, se realiza la corrección de sesgo, determinando una función de transferencia entre la variable observada y la simulada ya escalada, para igual valor de la probabilidad de excedencia. Esto se realiza en el período en que existe información común en el período de línea base (1970 a 2005) y luego se aplica la misma función de transferencia a los valores futuros proyectados considerando que el sistema es estacionario. Un análisis preliminar realizado (Vargas et al., 2015) ha evidenciado la no estacionariedad de algunas de las series históricas, lo que ha motivado la necesidad tanto de evaluar la incertidumbre de las estimaciones futuras como a plantear una metodología que aborde la existencia de la no estacionariedad tanto pasada

como futura (o ambas) de las series en estudio y evaluar la incertidumbre que significa el no tomarla en consideración. Cabe mencionar que para poder evaluar la incertidumbre, es necesario considerar estaciones de larga data, ya que estas permiten analizar periodos prolongados y separar en sub-periodos de estudio, siendo estos necesarios para desarrollar la metodología.

En el ámbito de la estadística, la estacionareidad de una serie temporal se define como aquella serie en la que la esperanza y la varianza de la variable aleatoria no varían en función del tiempo. Aplicando el concepto sobre las series de tiempo hidrológicas se tiene que la no estacionareidad implicaría una variación de dichos estadísticos en función del tiempo para las forzantes meteorológicas. La principal evidencia de la no estacionareidad futura es debida a la tendencia simulada para la media de la variable, por lo que en esta investigación se abordará esta situación basándose en la hipótesis de variación lineal en el tiempo suponiendo una desviación estándar constante (Kannan et al., 2014; Salvi et al., 2015).

1.1 Objetivos

La presente memoria tiene como propósito principal proponer un método para el escalamiento a nivel local de las forzantes meteorológicas como lo son la precipitación y la temperatura, proyectadas por un modelo de circulación global en un clima no estacionario.

El proyecto de investigación tiene tres objetivos específicos, los cuales se buscan cumplir de forma simultánea una vez culminada la obtención de resultados.

- Evidenciar la no estacionareidad de series de precipitación y temperatura en estaciones meteorológicas del país de larga data, correspondientes a:
 - Aeropuerto La Florida en La Serena, correspondiente a la cuenca del río Elqui.
 - Quinta Normal en Santiago, correspondiente a la cuenca del río Maipo.
 - Aeropuerto Carriel Sur en Concepción, correspondiente a la cuenca del río Bío Bío.
- Proponer un modelo para considerar en el proceso de escalamiento estadístico, la no estacionareidad en la media.

- Analizar el efecto de la no estacionareidad de las forzantes en la curva de duración y evaluar la incertidumbre de no considerar su variabilidad en las proyecciones pasadas de las forzantes meteorológicas.

1.2 Organización del informe

En el capítulo II se presenta una revisión bibliográfica referente a lo realizado hasta el momento en materia de cambio climático, más específicamente a la herramienta de escalamiento estadístico y el cómo abordar la existencia de la no estacionareidad.

En el capítulo III se realiza una breve descripción del tipo de clima que presentan las áreas de estudio, con el fin de contextualizar el trabajo a realizar en su lugar de aplicación.

En el capítulo IV se resume básicamente toda la etapa preliminar del estudio, correspondiente a la recopilación de antecedentes meteorológicos de las estaciones de medición y la obtención de datos necesarios para comenzar la investigación, como por ejemplo la obtención de series simuladas, que requieren previamente de la selección de un MCG.

En el capítulo V se aborda el tema de modelar la no estacionareidad en el proceso de escalamiento estadístico. Esto incluye el análisis de como incorporar su efecto a la metodología general que se desea determinar, por lo que aquí se comprueban las tendencias que gobiernan las series observadas. Es importante recalcar, que en esta etapa es necesario realizar el escalamiento espacial de las series simuladas, para definir las tendencias que gobiernan a dichas series.

El capítulo VI corresponde a la etapa de escalamiento temporal, es decir ya incorporado el efecto de la no estacionareidad a través de la construcción de series sin tendencia mediante un cambio de variables, Una vez definidas las series sin tendencia se procede a elaborar las funciones de transferencia asociadas a estas series. Además, se trabaja con un método paralelo que busca cuantificar el error de no considerar la no estacionareidad mediante la construcción de un conjunto de funciones de transferencia establecidas en distintos periodos de línea base.

El capítulo VII consiste en validar los resultados antes obtenidos, comparando las proyecciones obtenidas a base de las funciones de transferencia establecidas y los datos observados de las estaciones meteorológicas.

Finalmente, el capítulo VIII contiene las conclusiones y recomendaciones generales del estudio en función de los resultados obtenidos.

CAPÍTULO II: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Los temas tratados en este capítulo abarcan los conceptos claves para la comprensión de este trabajo. Por una parte se explicita lo hecho hasta el momento respecto de las técnicas de escalamiento y sus restricciones, incursionando en el contexto bajo el cual se dan los posibles escenarios futuros del cambio climático.

2.1 Clima y cambio climático

La Tierra está rodeada de una capa gaseosa de aproximadamente 400 kilómetros llamada atmósfera. Los fenómenos atmosféricos son estudiados por la ciencia de la Meteorología, la cual tiene como objetivo principal, el predecir las condiciones futuras del medio ambiente como temperatura, precipitaciones, humedad, nubosidad, entre otras. En general, en la Hidrología, a la atmósfera se le confiere las funciones de almacenar y transportar el vapor de agua y acumular calor a través de la absorción de la radiación solar.

El Clima por otro lado, es el conjunto de fenómenos meteorológicos que definen un comportamiento altamente probable en alguna extensión de la tierra para un periodo determinado. De esta forma, se entiende por clima, el estado más probable del medio ambiente. El acople de las condiciones climáticas en el tiempo y el espacio se conoce como Sistema Climático, es un sistema complejo que depende de factores de larga y corta escala de tiempo físicos, bioquímicos, geológicos, entre otros.

La Tierra además, emite el calor en forma de radiación, por lo que existe un balance entre la energía que proviene del sol y la que sale al exterior, pero es debido a la composición de la atmósfera, que la Tierra no emite instantáneamente lo que recibe. Los Gases de Efecto Invernadero, GEI, son los encargados de retener la radiación por un periodo más prolongado de tiempo en la atmósfera, provocando que la tierra aumente su temperatura promedio. De esta manera el efecto invernadero y su aumento de la concentración en el tiempo en la atmósfera, inducen un cambio inminente en el sistema climático.

En el último tiempo, se han realizado estudios (IPCC, 2007) que plantean como ha aumentado la temperatura global producto de la emisión de GEI a la atmósfera, este efecto se ha incrementado de manera brusca desde la revolución industrial y se conoce como Calentamiento Global. El planteamiento básicamente afirma que en base a lo observado; aumento del nivel medio del mar, derretimiento de la nieve en los polos, y aumento de las temperaturas; se está manifestando la acentuación de fenómenos climáticos como las sequías y las olas de calor, además de su repercusión en el ecosistema, que trae consigo desplazamiento hacia los polos de numerosas especies. En la figura 2.1, se observan las tendencias, que denotan el aumento del calentamiento global en los últimos años, el cual se estima que llevará a la intensificación de los regímenes hidrológicos (Arnell, 1999),

aumentando las precipitaciones a nivel global, pero producto de una distribución desigual, en la que también se manifestará la intensificación del estrés hídrico de forma localizada, el cual ya afecta al tercio de la población mundial.

Luego, el cambio climático se puede entender como el producto de la interacción de los cambios naturales que experimenta el planeta y el calentamiento global producido por el aumento de emisiones de GEI.

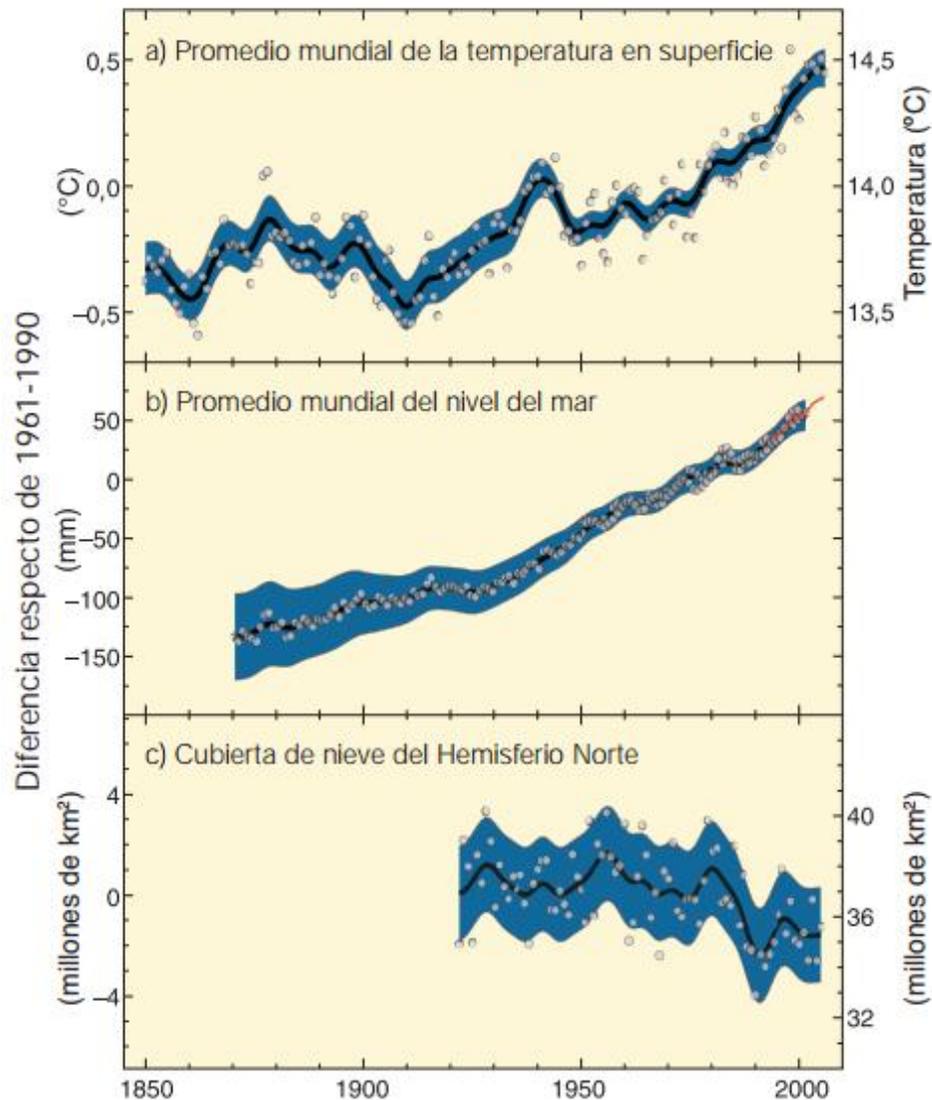


Figura 2.1: Variación observada de a) El promedio mundial de las temperaturas en superficie; b) el promedio del nivel medio del mar a partir de datos mareométricos y satelitales; y c) la cubierta de nieve en el hemisferio norte. Fuente IPCC (2007).

Por otra parte, entendiendo que el cambio climático está relacionado con posibles escenarios de contaminación en el futuro, se han realizado distintos estudios que modelan

dichos escenarios. En este trabajo se utilizaron aquellos desarrollados por el experimento 3.2 del CMIP5 (Por sus siglas en inglés, Coupled Model Intercomparison Project), los cuales están asociados a distintos niveles de emisiones, y por ende a un aumento de la temperatura promedio de la Tierra.

El IPCC, ha definido un conjunto de posibles escenarios futuros, estos han sido modificados a medida que transcurre el tiempo, incluyendo una mayor cantidad de procesos y forzantes que afectan al sistema climático. La figura 2.2 representa un esquema en el cual se pueden observar a priori, aquellos procesos naturales y de origen antropogénico que influyen en el sistema climático.

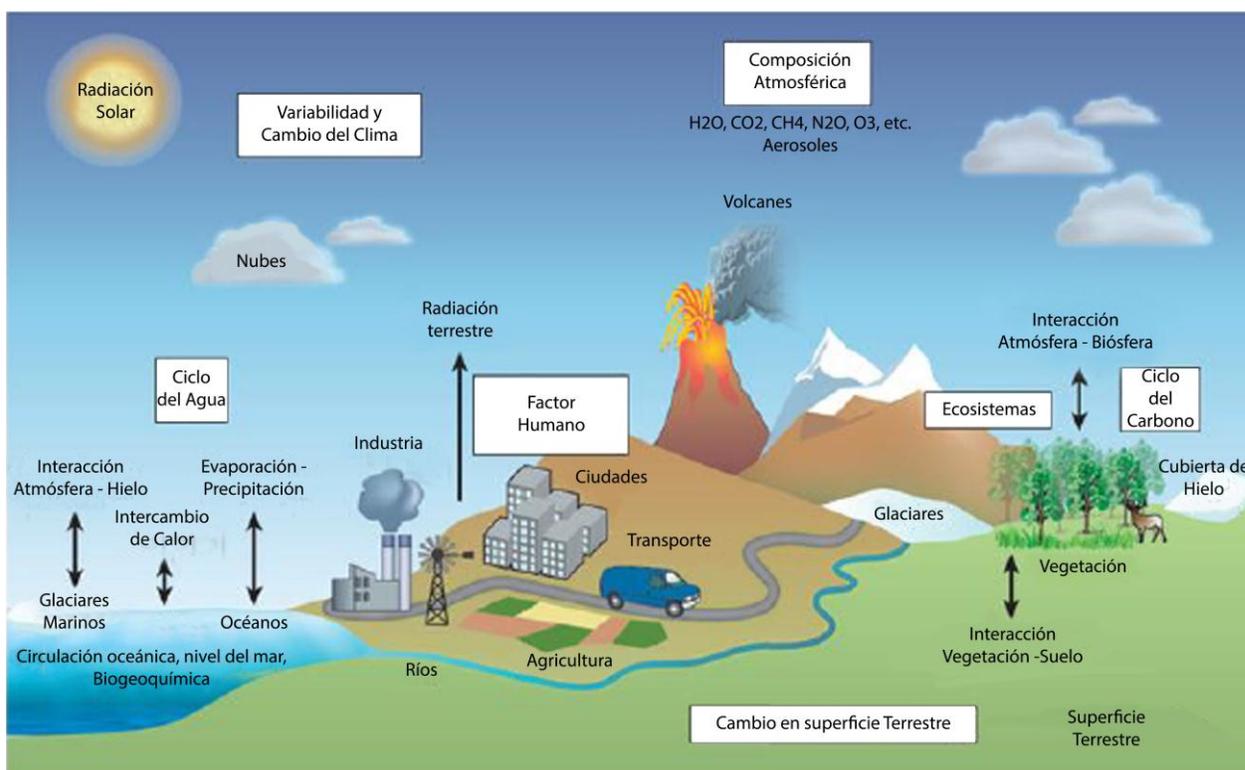


Figura 2.2: Esquema de interacción entre los procesos de mayor relevancia en el sistema climático. Adaptación de Moss et al. (2010).

A diferencia de estudios anteriores, en los cuales a los escenarios se les atribuía un nivel de contaminación específico que dependiera de variables demográficas, económicas y tecnológicas, los distintos escenarios que se manejan a partir del CMIP5, fijan niveles de forzamiento radiativo para el año 2100, que van desde los 2,6 W/m² a los 8,5 W/m². Luego, los cuatro escenarios RCP (Por sus siglas en inglés, Representative Concentration Pathways) comprenden niveles de forzamiento radiativo; Bajo (RCP2.6); Medio-bajo (RCP4.5); Medio-alto (RCP6.0) y Alto (RCP8.5). La principal ventaja de esta clasificación, es que permite contemplar el efecto de las políticas orientadas a mitigar los efectos de la contaminación atmosférica, puesto que distintos escenarios pueden gatillar a la misma forzante radiativa. La tabla 2.1, muestra una breve descripción de cada escenario.

Tabla 2.1: Resumen escenarios RCP. Fuente: Moss et al. (2010).

Escenario	FR (W/m ²) al año 2100	Concentración de CO ₂ -equiv en la atmósfera [ppm]
RCP2.6	2.6	490
RCP4.5	4.5	650
RCP6.0	6.0	850
RCP8.5	8.5	>1370

Luego, se puede aseverar que existe una relación entre los niveles de contaminación y la forzante radiativa, es decir se esperan mayores valores de la forzante radiativa a mayor concentración de GEI. Por, otro lado el efecto de los distintos escenarios en el aumento de la temperatura promedio mundial, se muestra a continuación en la figura 2.3.

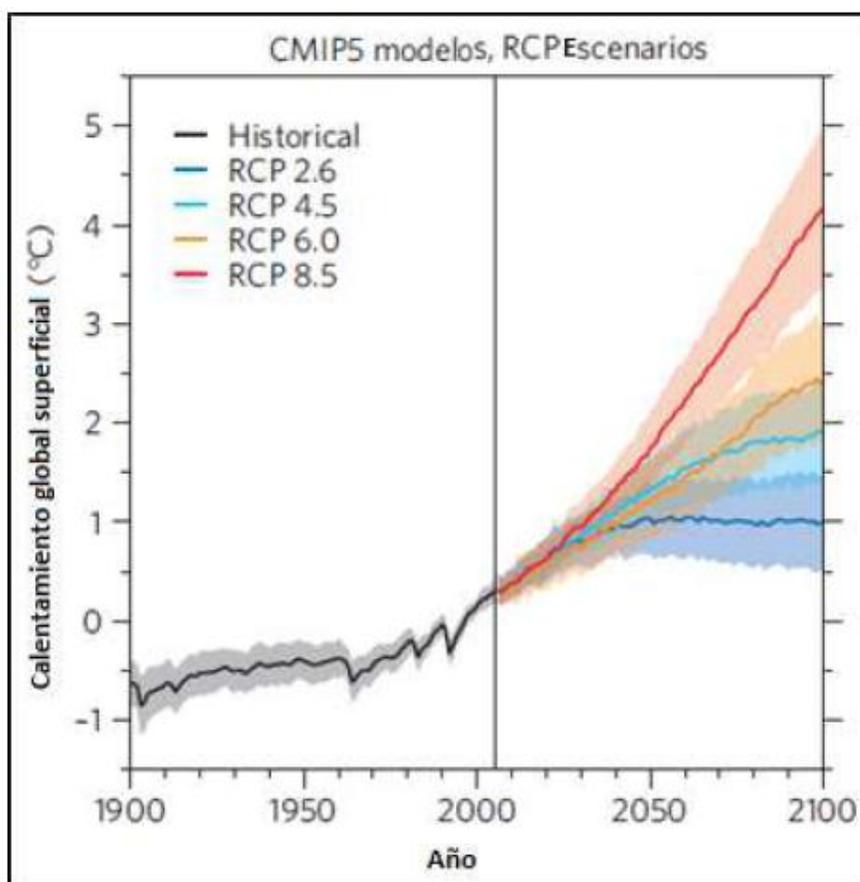


Figura 2.3: Aumento de la temperatura promedio de la tierra para distintos escenarios RCP, tomando como actual el año 2010, donde la media de la temperatura se representa como la línea de color fuerte, y la desviación estándar como la línea de color suave.

Fuente: Knutti et al. (2012).

Analizando la figura, es posible observar como el promedio histórico ha tendido a aumentar en el último siglo, y como los escenarios RCP2.6, RCP4.5 y RCP.6.0, tienden a

estabilizar el calentamiento global en el año 2100, a diferencia del RCP8.5, en el cual continúa el aumento más drástico de las temperaturas.

De esta forma, resulta de interés basarse en estos escenarios para realizar estudios de cambio climático, ya que son perfectamente posibles debido al rumbo que están tomando las decisiones en materia de políticas públicas relacionadas al cuidado del medio ambiente y el ecosistema.

2.2 Forzantes meteorológicas y estacionareidad

Las forzantes meteorológicas, son aquellas variables que caracterizan un clima, y corresponden a magnitudes físicas del estado del ambiente en un determinado lugar y momento, como lo son la temperatura, precipitación, presión atmosférica, nubosidad, radiación, humedad relativa, viento, etcétera. Dichas variables determinan el comportamiento de la atmósfera tanto a gran escala como a pequeña escala; básicamente el intercambio de calor que existe entre las masas de aire y agua que conforman la Tierra produce variaciones de temperatura y presión, las que influyen directamente en el ciclo del agua, por ende las forzantes meteorológicas afectan directamente en el régimen hidrológico de una cuenca.

Cuando se habla de cambio climático, se espera que las forzantes meteorológicas que determinan el clima, varíen en el tiempo, pero ciertas variables se mantienen relativamente constante en las escalas de tiempo que se desean estudiar en hidrología. Según se ha observado (D'Arcangeli, 1997; Serrano R, 2014; Silva V. 2015), en general ha existido un aumento de temperaturas y disminución de precipitaciones y caudales en cuencas de Chile central, además algunas cuencas presentan modificaciones en su régimen, de nival a nivo-pluvial en zonas de mayor altura, lo que se atribuye al aumento de temperaturas y derretimiento de glaciares producto del aumento de la cota de nieves, lo que deja al descubierto el efecto del cambio climático en la modificación del ciclo hidrológico de las cuencas en estudio.

En relación con los estudios de cambio climático, existe un gran interés por el estudio de las forzantes meteorológicas. El CIMP5 considera a la forzante radiativa como variable de entrada para los MCG, a su vez esta forzante radiativa está asociada a los posibles escenarios futuros del calentamiento global, y dependiendo de estos escenarios se pueden observar distintas configuraciones climáticas que tienen efecto sobre otras forzantes, las cuales son variables de salida de los MCG. Desde otra perspectiva, un clima estacionario es aquel que no presenta una tendencia en la variación de sus forzantes meteorológicas en el tiempo, es decir si bien presenta fluctuaciones, las propiedades estadísticas como la media, la desviación estándar y la función densidad de probabilidades se mantienen constante en el tiempo, por otra parte, un clima no estacionario no presenta dicho comportamiento. En general un clima no estacionario presenta una tendencia en sus forzantes, ya sea al aumento o disminución de estas, aquella tendencia puede ser lineal o no, y dependerá exclusivamente del sistema climático.

Debido al cambio climático, en muchas cuencas de Chile central existe dicha tendencia en algunas forzantes meteorológicas como la temperatura y la precipitación, lo que evidencia de cierta forma la no estacionariedad. En general, en el escalamiento de los modelos de cambio climático no consideran la no estacionariedad como hipótesis, por lo que se cuestiona la credibilidad en la calibración de dichos modelos (Salvi et al., 2015; Vaze et al., 2015). A modo de ejemplo, se presenta la figura 2.4, donde es posible observar como varían las mediciones de la temperatura en distintas estaciones meteorológicas del país en el transcurso de los últimos años.

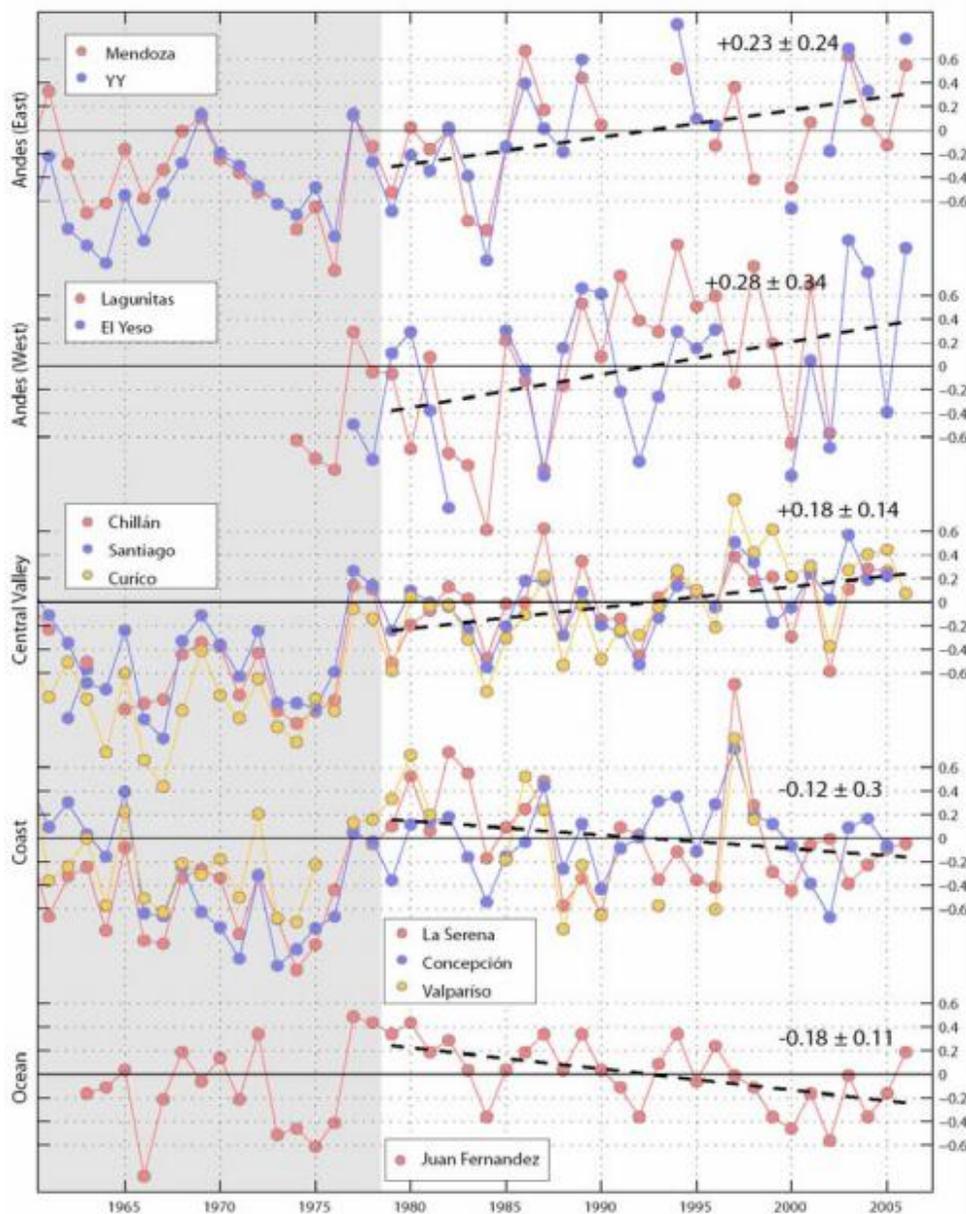


Figura 2.4: Variación de la temperatura en diversas estaciones de Chile central, agrupadas según su altura. Los números del gráfico en negrita indican la tendencia lineal en °C por década, junto a un rango de incertidumbre calculada mediante un ajuste lineal entre 1979 y 2005. Fuente: Falvey & Garreaud (2009).

Así como varían las temperaturas y las precipitaciones, también lo hace la escorrentía, es por eso que surge el desafío de encontrar una forma de predecir el comportamiento de las forzantes meteorológicas de un clima no estacionario a futuro, ya que actualmente se está evidenciando la manifestación de no estacionariedad en muchas cuencas que antes presentaban estacionariedad, por lo que resulta de interés en el área de hidrología analizarlas para encontrar soluciones preventivas a los posibles escenarios de escasez hídrica en el futuro.

2.3 Predicción del clima

Se considera que los Modelos de Circulación General (MCG) entregan una buena aproximación de las forzantes meteorológicas a futuro en grandes extensiones de área, lamentablemente carecen de una resolución adecuada a nivel de cuenca; por ello a la hora de hacer un acercamiento en un punto de la grilla, se pierde precisión, y el resultado puede no ser representativo de las condiciones locales. También existen Modelos de Circulación Regional (MCR), la utilización de estos modelos se le conoce como Escalamiento Dinámico (ED); estos modelos son capaces de tomar en cuenta variables como la topografía y lograr reproducir con mayor precisión lo que ocurre en extensiones de menor área, sin embargo estos modelos son de alta demanda computacional y son muy sensibles a las condiciones de borde impuestas al comienzo de la modelación, por lo que no siempre resultan la mejor alternativa (Hamlet et al., 2010). Por último, el Escalamiento Estadístico (ES) permite obtener predicciones precisas en grillas suficientemente pequeñas, pero requiere de información meteorológica existente y fidedigna, por lo que resulta una alternativa atractiva para el estudio de cuencas de Chile central donde ya se posee dicha información por periodos lo suficientemente prolongados.

La figura 2.5 muestra un esquema en el cual se indica la resolución de las distintas técnicas de predicción del clima y como estas interactúan con los distintos factores que determinan el clima de una región, como lo son la topografía, la vegetación y el tipo de suelo.

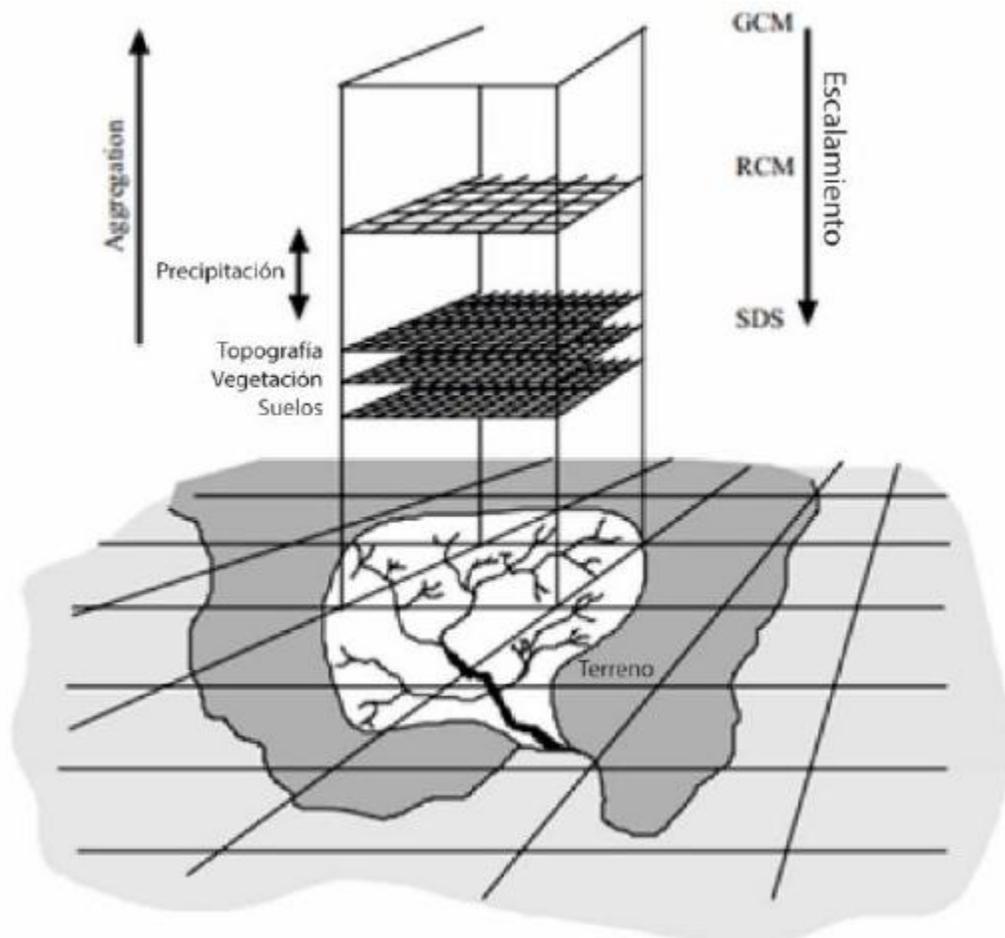


Figura 2.5: Escalamiento de datos. Adaptación de Wilby et al. (2007).

2.3.1 Modelos de circulación general

Un modelo de circulación general es un modelo matemático sobre la circulación de un fluido como la atmósfera o el océano; se basan en las ecuaciones de Navier-Stokes sobre una esfera rotatoria, donde se utilizan términos termodinámicos para las fuentes de energía disponibles como por ejemplo la radiación. Básicamente, modelan el intercambio de masa y energía que existe en la atmósfera, utilizando como input la forzante radiativa.

Lamentablemente estas grillas son demasiado grandes para analizar lo que ocurre dentro de una cuenca, como fue mencionado anteriormente. Los MCG entregan resultados bastante razonables, pero al disminuir el tamaño de la grilla con técnicas de interpolación, se pierde un margen considerable de precisión, obteniéndose resultados poco realistas que requieren de un ajuste. A pesar de estos limitantes, es importante considerar los resultados obtenidos de un MCG, dado que se ha comprobado su efectividad al momento de predecir datos en grillas extensas, por lo que para obtener mejor resolución a partir de simulaciones de un MCG, se utiliza la técnica de escalamiento estadístico.

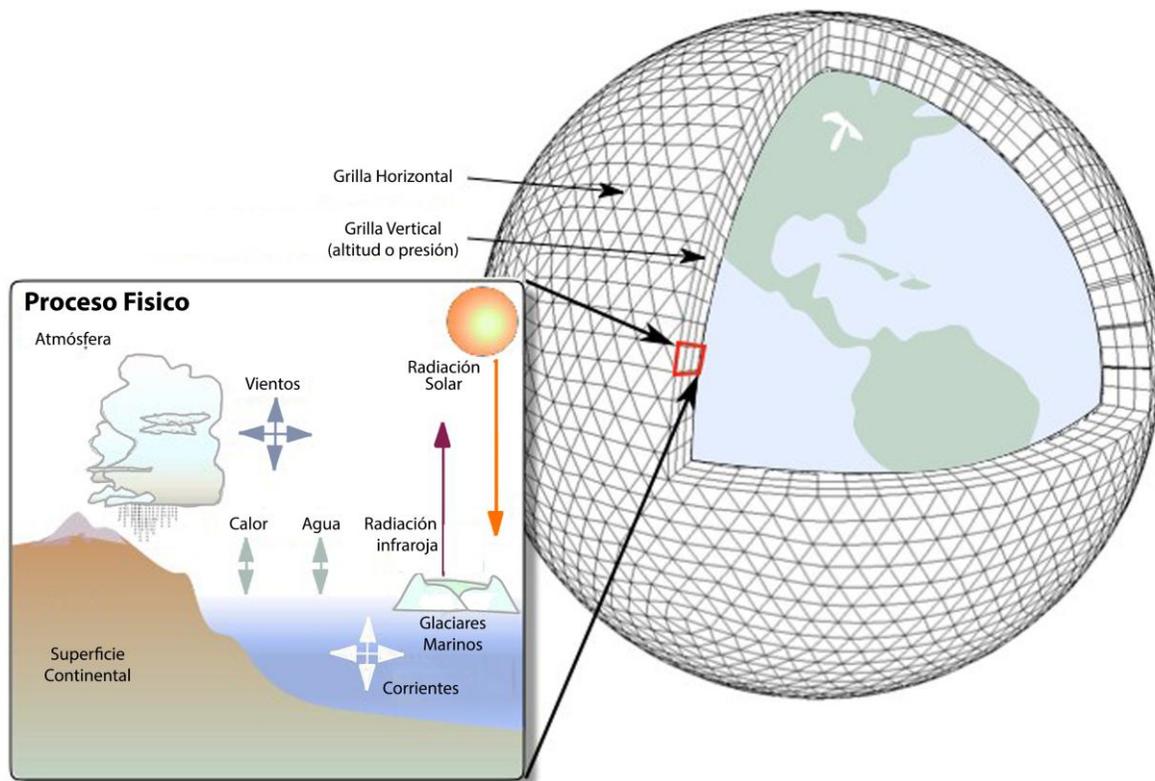


Figura 2.6: Esquema de grillas de un MCG. Adaptación de Cambio climático Global (2016).

En la figura 2.6 se puede observar un modelo de grillas, donde el acercamiento representa los procesos que ocurren de forma vertical, es decir el intercambio de energía y masa entre las distintas capas de la atmósfera. De igual manera, cada grilla en planta representa una extensión de área donde interactúan los mismos procesos de forma horizontal.

2.3.2 Escalamiento estadístico

El escalamiento estadístico relaciona los datos observados de una estación meteorológica de la variable que se desea escalar con los resultados obtenidos de un GCM. En un principio, esto permite conocer la predicción solo en el punto donde se ubica la estación meteorológica pero, después de aplicar la técnica de forma reiterada, se obtiene conocimiento de varios puntos dentro de una misma grilla extensa, lo que en teoría permitiría disminuir el tamaño de la grilla al interpolar dichos puntos. Es importante mencionar que el escalamiento estadístico se puede aplicar de tres enfoques distintos (Hamlet, 2010): corrección de sesgo, método delta y un híbrido de los dos, todos con distintas ventajas. En este trabajo solo se utilizará el primero, ya que los dos últimos no comprenden la extracción de datos espacial y temporalmente escalados de parte de un MCG.

En relación a lo mencionado anteriormente y como muestran los estudios realizados en el último tiempo en Chile (Ayala et al., 2009; Lagos y Vargas, 2009; McPhee et al., 2009; Lagos y Vargas, 2012; Gómez et al., 2013; Vargas et al., 2013; Lagos et al., 2015), se recurre a la técnica de escalamiento estadístico y corrección de sesgo para obtener mejor resolución, esta consiste en tres etapas: la selección de un MCG adecuado, el escalamiento espacial y el escalamiento temporal (DGA, 2012).

La Selección de un MCG es fundamental, dado que existe una amplia gama de modelos al respecto, en general estos se deben evaluar dependiendo de las características de la zona de interés. En base a estudios realizados en Chile (Lagos et al., 2015), y con el fin de minimizar la incertidumbre de las proyecciones, se seleccionan aquellos MCG, según criterio de ajuste de la estacionalidad de precipitación y temperatura del modelo en el periodo histórico, considerando que si se representa adecuadamente la estacionalidad un modelo es más confiable.

El escalamiento espacial consiste en trasladar los resultados obtenidos de la simulación de un MCG al punto de interés, es decir el punto donde se ubica la estación meteorológica de referencia. El MCG entrega como resultado la simulación de datos para una grilla determinada, donde cada vértice de la grilla representa un nodo, luego la técnica de escalamiento temporal consiste en ponderar el dato de interés por el inverso de la distancia a cada uno de los nodos de la grilla que involucra la estación meteorológica.

Por otro lado el escalamiento temporal, consiste en ajustar la serie anual o estacional de la variable de interés con las observaciones locales en la estación meteorológica mediante correlaciones estadísticas, como lo es la corrección de sesgo, que permite relacionar los datos simulados y observados mediante una función transferencia obtenida a partir de las curvas de duración de las series en estudio. Luego, usando la función de transferencia se obtienen las predicciones del GCM escaladas a la locación de una estación meteorológica.

2.3.3 Escalamiento estadístico en climas no estacionarios

Este tema trata sobre la aplicación de la técnica de escalamiento estadístico a climas no estacionarios, ya que la relación establecida no sería válida. Wilby et al. (1998) propuso tres factores que pueden ser asociados con no estacionariedad en los modelos de escalamiento estadístico: un set incompleto de variables predictoras, una calibración no adecuada en los periodos de estudio, y situaciones en las cual la estructura del sistema climático cambia a través del tiempo. En general se ha demostrado que al aplicar modelos de escalamiento estadístico sobre climas no estacionarios, se pierde credibilidad, dado que al utilizar periodos distintos de estudio, se obtienen funciones de transferencia distintas, lo que no demuestra coherencia alguna, ya que no se puede obtener una predicción precisa. Salvi et al. (2015) ha resuelto el caso simple en que la media móvil de la variable, se comporta como una función lineal en el tiempo, y la desviación estándar se mantiene constante. La figura 2.7 resume la metodología propuesta por el estudio mencionado.

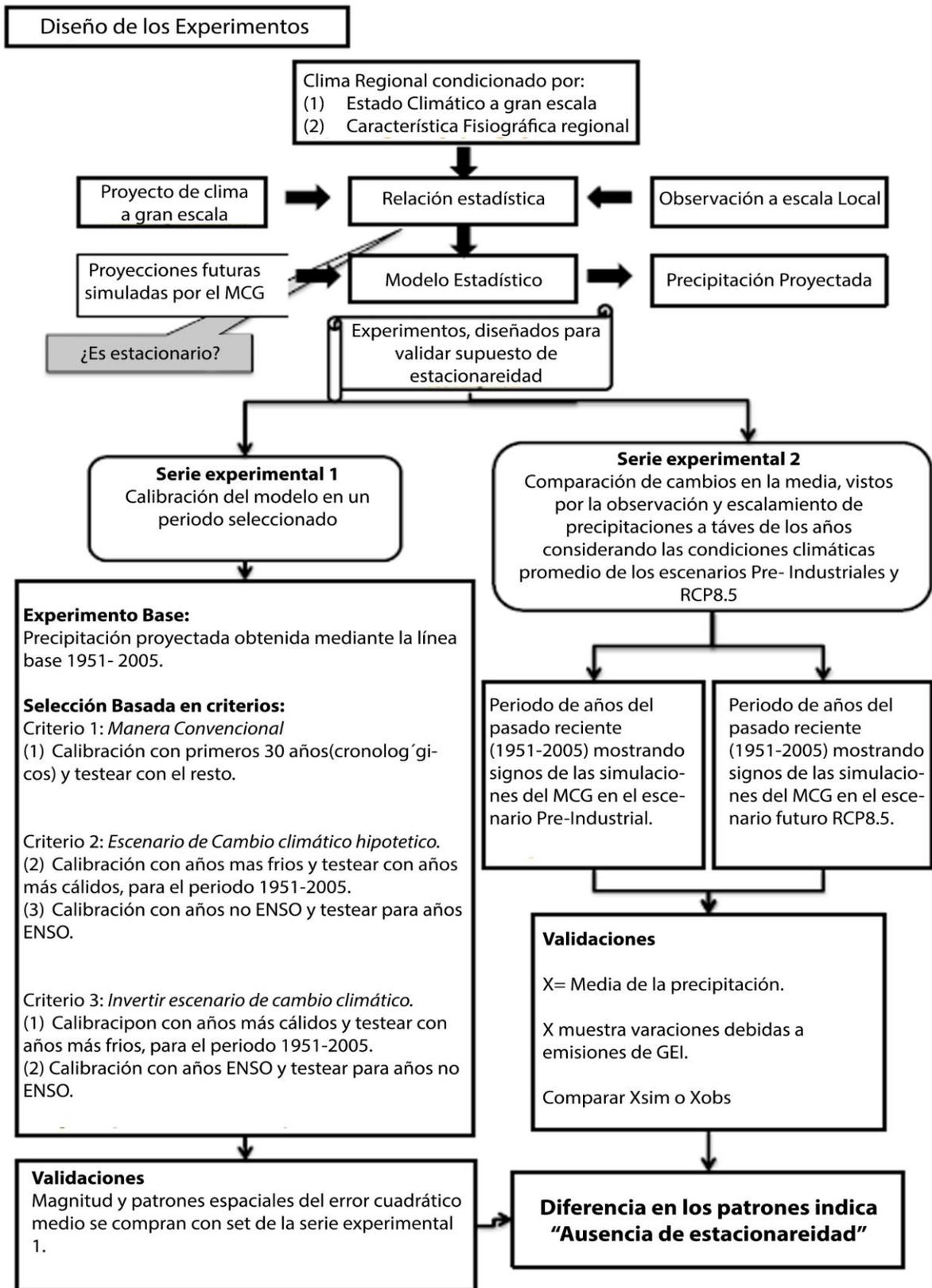


Figura 2.7: Esquema de la metodología para modelos de escalamiento estadístico en climas no estacionarios. Fuente: Salvi et al. (2015).

Luego, basándose en la metodología de la figura 2.7, se tiene que para realizar el escalamiento estadístico en un clima no estacionario, la diferencia radica en la corrección de sesgo.

La corrección de sesgo es la técnica aplicada para realizar el escalamiento temporal, fundamentalmente se busca ajustar los datos a la magnitud correspondiente según el periodo histórico, lo que implica buscar una relación entre series simuladas y observadas. En primera instancia, no existe tal relación, ya que las simulaciones consideran muchos factores en cuenta, pero al comparar las curvas de duración de ambas series, si es posible encontrar similitudes, por lo cual se elabora una función de transferencia capaz de transformar la serie simulada a una serie coherente con la serie observada. Para esto se ajusta la curva de duración de la serie observada a una función conocida, mediante regresiones lineales. Esto permite conocer los valores que toma la curva de duración de datos simulados para una misma probabilidad de excedencia de la serie observada, lo cual se realiza relacionando ambas curvas de duración en el mismo periodo de tiempo y se obtiene una relación capaz de comparar, y por ende corregir la serie simulada para cualquier probabilidad de excedencia tanto en magnitud como en estacionalidad.

Para considerar la no estacionareidad en el escalamiento estadístico a realizar, se emplearon dos métodos. El primero consiste, en transformar los datos simulados y observados mediante la función correspondiente a la línea de tendencia, es decir eliminar la tendencia de la serie de datos, y aplicar la corrección de sesgo al nuevo set de datos estacionario, posterior a esto se debe deshacer el cambio de variables. El segundo método consiste en evaluar la incertidumbre de aplicar la corrección de sesgo a una misma estación con un set de datos no estacionario correspondiente a distintos intervalos del periodo total de estudio.

Respecto del primer método, se debe modelar el efecto de la no estacionareidad según la función correspondiente a la línea de tendencia obtenida a partir de las series simuladas y observadas, e incorporarla al escalamiento, para posteriormente poder aplicar la corrección de sesgo. En este estudio se analizará el supuesto más simple, es decir una tendencia lineal en la media, y constante en la desviación estándar (Kannan et al. 2014; Salvi et al. 2015).

$$\begin{aligned}\bar{x}_{q(sim,obs)}(t) &= at + b \\ \sigma &= c\end{aligned}$$

Donde:

a, b : Constantes de la regresión.

c : Constante.

Luego de modelar la no estacionareidad, se transforman los datos simulados y observados mediante la función anteriormente descrita, es decir eliminar la tendencia de la serie haciendo el cambio de variable:

$$y_{sim,obs} = x_{sim,obs} - \bar{x}_{q(sim,obs)}(t)$$

Donde:

$x_{sim,obs}$: Dato simulado u observado según sea el caso.

$y_{sim,obs}$: Dato transformado simulado u observado según sea el caso

Al obtener una serie sin tendencia. Es posible aplicar el escalamiento temporal suponiendo un clima estacionario, sin contradecir aquella hipótesis del escalamiento estadístico que supone estacionareidad en las series simuladas y observadas.

2.4 Selección de un MCG adecuado

Según el último informe del IPCC (2013), se manejan simulaciones tanto proyectadas como históricas para 21 MCG, por lo cual resulta fundamental seleccionar el modelo a trabajar, básicamente se seleccionará aquel que represente de mejor manera las condiciones meteorológicas con respecto a las estaciones seleccionadas. La metodología utilizada usualmente en los últimos estudios sugiere considerar los siguientes criterios:

- Representación de la estacionalidad.
- Representación de la variabilidad.
- Representatividad del cambio en escenarios futuros.

La metodología consiste en aplicar todos los criterios de forma consecutiva. Para el primer caso es necesario realizar un escalamiento espacial por inverso de la distancia en un periodo de línea base (1970-2005) para los 21 MCG, seleccionando aquellos que representen de mejor forma la estacionalidad de las variables observadas. Posteriormente se aplica el caso dos, el cual consiste en un escalamiento temporal ajustando funciones transferencias construidas mes a mes para cada forzante (Lagos et al., 2015), seleccionando aquellos MCG que representen de mejor forma la variabilidad temporal de las variables observadas. Finalmente se debe aplicar el caso tres, el cual consiste en realizar un ensamble de las proyecciones de cambio climático de los 21 MCG y se busca seleccionar a los MCG que representen de mejor forma dicho ensamble.

Luego, para demostrar la representatividad de los 21 MCG, se consideró el coeficiente de Correlación R^2 , y el error cuadrático medio (ECM), los cuales se calcularon de la siguiente forma.

$$R^2 = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{(n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2)(n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2)}$$

$$ECM = \frac{\sum(y_i - x_i)^2}{n}$$

Donde:

n : Es el número de variables y o x, correspondientes a cada mes, en este caso 12.

x_i : Corresponde al valor de la variable observada en el mes i.

y_i : Corresponde al valor de la variable simulada en el mes i.

CAPÍTULO III: CARACTERIZACIÓN DE ZONAS DE ESTUDIO

Este capítulo tiene como objetivo determinar las características climáticas que definen las zonas de estudio, para así comprender el comportamiento que presentan los registros de las variables en las estaciones. Tomando en cuenta que todas se encuentran separadas por una gran distancia, además de presentar diferencias de cota, y otros factores predominantes como su cercanía al mar, la topografía, etc. se puede suponer que estos influyen de forma implícita en las forzantes meteorológicas observadas. Básicamente se presenta la definición de la cuenca que compromete cada una de las estaciones de estudio y el tipo de clima que presencian.

3.1 Estación Meteorológica La Serena, Aeropuerto La Florida

La estación de La Serena se localiza en la cuenca hidrográfica del río Elqui, ubicada en la IV Región de Coquimbo, aproximadamente entre los meridianos 69°48' y 71°17' de longitud Oeste y los paralelos 29°35' y 30°20' de latitud sur, y cubre un área de 9.826 Km² en total.

El río nace de la unión de los ríos Turbio proveniente de la cordillera y Claro proveniente del sur, el lugar de intersección de ambos ríos se encuentra una altitud de 815 m.s.n.m, unos 2 kilómetros aguas arriba del pueblo de Rivadavia. En general desarrolla una dirección de Este a Oeste y no recibe aportes de otros afluentes, a excepción de algunas quebradas que usualmente no participan salvo en años húmedos. La cuenca presenta tres tipos de clima:

- **Clima Estepárico costero o Nuboso:** Se muestra alrededor de todo el sector litoral influyendo unos 40 kilómetros hacia el interior a través de los valles transversales típicos de la topografía de la región. Se caracteriza principalmente por la abundante nubosidad y alta humedad relativa del ambiente, alcanzando temperaturas moderadas, con un promedio de precipitaciones anuales de 130 mm percibiendo periodos secos de 8 a 9 meses.
- **Clima Estepa Cálido:** Este tipo de clima se presencia hacia el interior del valle del río Elqui, por sobre los 800 m.s.n.m, principalmente se nota la ausencia de nubosidad y humedad en el aire, y precipitaciones. Se alcanzan temperaturas superiores a lo observado en la costa, con periodos prolongados de sequía.
- **Clima Templado Frío de Altura:** Se visualiza principalmente en la cordillera de los andes por sobre los 3000 m.s.n.m, presenta temperaturas bajas y altas

precipitaciones, además alberga nieves permanentes que constituyen un aporte de agua sustancial en el periodo estival.

La delimitación de la cuenca se realizó con el software QGIS, sus características geográficas y topográficas se muestran en la figura 3.1. La estación está ubicada actualmente en el aeropuerto de La Serena, en el sector de la Florida.

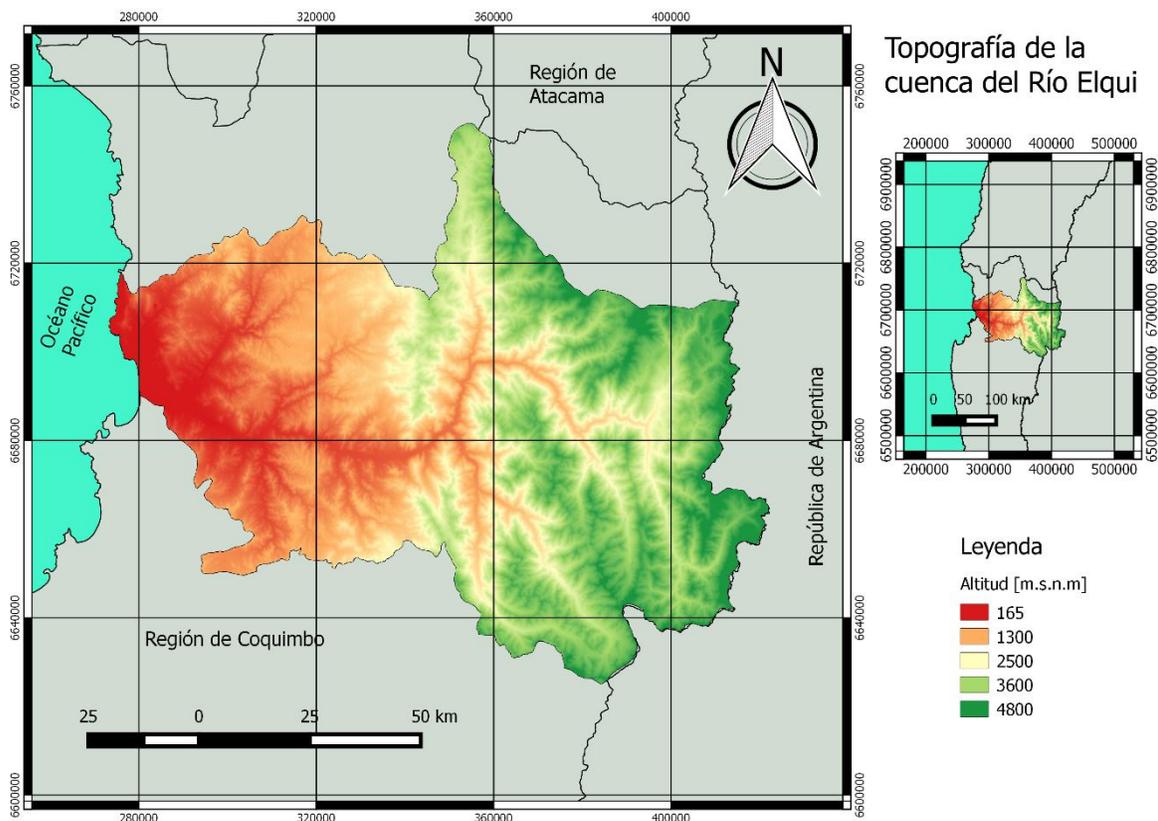


Figura 3.1: Mapa geográfico de la cuenca del Río Elqui en coordenadas UTM, (Datum WGS84).

3.2 Estación Meteorológica Quinta Normal, Oficinas DMC

La estación Quinta Normal se sitúa en la cuenca hidrográfica del río Maipo, la cual se encuentra predominantemente en la Región Metropolitana aunque parte de su cuenca incluye a la V Región de Valparaíso y VI Región del Libertador Bernardo O'Higgins. Geográficamente se encuentra entre los meridianos $69^{\circ}55'$ y $71^{\circ}33'$ longitud Oeste y entre los paralelos $32^{\circ}55'$ y $34^{\circ}15'$ latitud sur. En total se extiende en un área de 15.304 Km².

Por otra parte, el río Maipo desarrolla una longitud de 250Km aproximadamente y recibe aportes importantes de la sub-cuenca del río Mapocho, el cual se ubica al Norte del río Maipo. Esta cuenca presenta dos tipos de clima:

- **Clima templado mediterráneo con estación seca prolongada:** Se manifiesta en la casi totalidad de la cuenca, principalmente se presencian periodos secos extensos y un invierno pronunciado con temperaturas extremas las cuales pueden alcanzar los cero grados. La temperatura promedio es de 14,5°C, pero el rango de variabilidad es amplio tal que las máximas en estación de verano pueden superar los 30°C. En lo que a la precipitación respecta, se registran valores de aproximadamente 404 mm al año. En los sectores centrales de la cuenca, aledaños a la estación Quinta Normal, es común presenciar baja humedad y una menor precipitación lo que se debe al efecto de la topografía, mientras que en lugares más elevados en relieve, es usual percibir precipitaciones por sobre el promedio de la cuenca.
- **Clima Frío de altura:** Es posible distinguir este clima en la cordillera de los Andes al superar los 3000 metros de altitud, se caracteriza por bajas temperaturas y precipitaciones en forma de nieve, lo que permite la reserva de nieve en las quebradas altas del cordón montañoso.

La delimitación de la cuenca se realizó con el software QGIS, sus características geográficas y topográficas se muestran en la figura 3.2. La estación está ubicada actualmente en las oficinas de la DMC, en Quinta Normal.

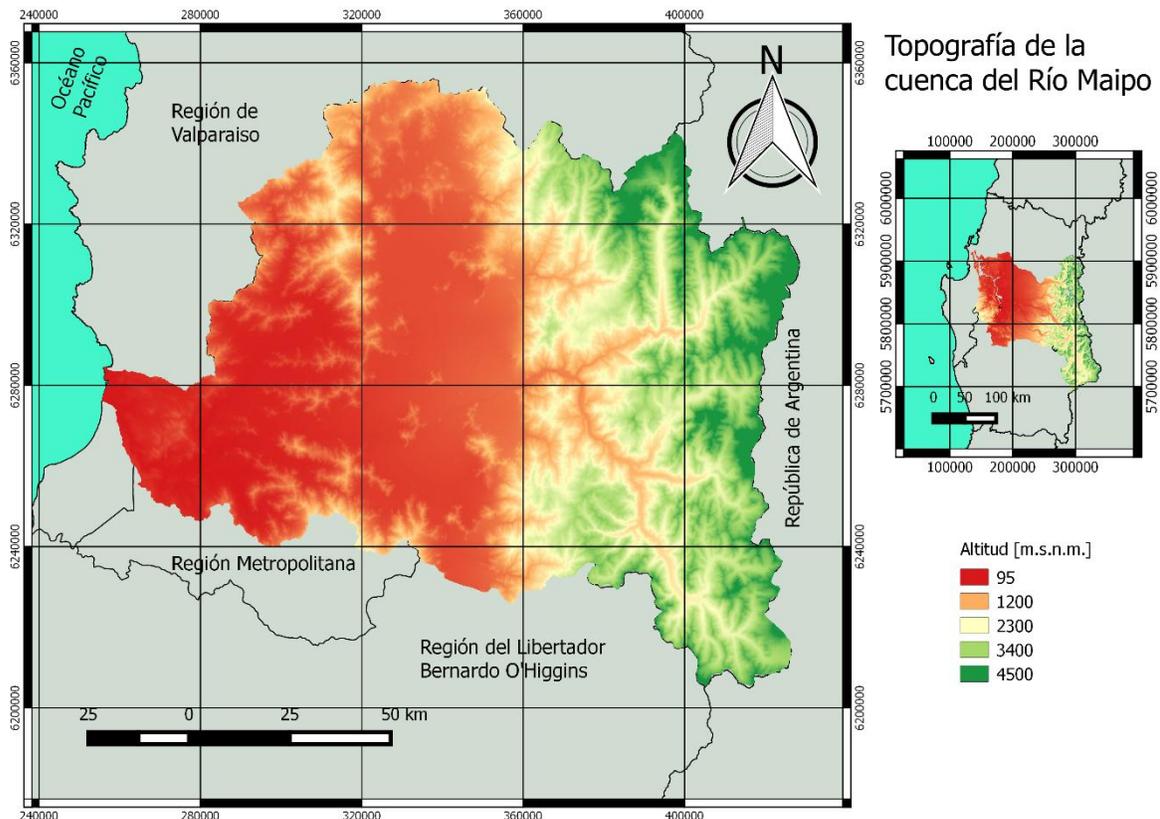


Figura 3.2: Mapa geográfico de la cuenca del Río Maipo en coordenadas UTM (Datum WGS84).

3.3 Estación Meteorológica Concepción, Aeropuerto Carriel Sur:

La estación Concepción se ubica en la cuenca del río Bío Bío, la cual está situada entre los meridianos 71°00' y 73°20' de longitud Oeste y los paralelos 36°42' y 38°49' de latitud sur. Esta cuenca comprende parte de la VIII Región del Bío Bío y de la IX Región de la Araucanía; abarca una gran superficie cercana a los 24.260 Km², por lo cual se le atribuye una gran escorrentía superficial.

El río Bío Bío se genera en la ribera este de la laguna Gualletué en el sector cordillerano y desarrolla grandes meandros en su curso superior. Aproximadamente tiene unos 380 Km de longitud y se caracteriza por tener un gran número de afluentes. Esta cuenca presenta tres climas:

- **Clima Templado Húmedo:** En la zona costera, y parte de la cordillera de la Costa, se manifiesta el clima templado húmedo, con precipitaciones que fluctúan entre los 1.200 mm y los 2.000 mm anuales.
- **Clima Templado Mediterráneo:** Al alejarse del sector litoral, hacia el norte, al interior de la cuenca y parte de la zona precordillerana predomina el clima templado mediterráneo, que se caracteriza en esta zona por un periodo seco de cuatro meses; se precipitaciones del orden de 1.300 mm, que aumentan en la zona alta de la cuenca alcanzando los 2.200 mm anuales, mientras que las temperaturas medias anuales fluctúan entre los 7°C y 10°C.
- **Clima Frío de Altura:** Por sobre los 1500 m de altitud, reaparece el clima frío de altura típico de la montaña, donde se alcanzan precipitaciones por sobre los 2.000 mm y temperaturas medias anuales de aproximadamente 4°C.

La delimitación de la cuenca se realizó con el software QGIS, sus características geográficas y topográficas se muestran en la figura 3.3. La estación está ubicada actualmente en el aeropuerto Carriel Sur, en Concepción.

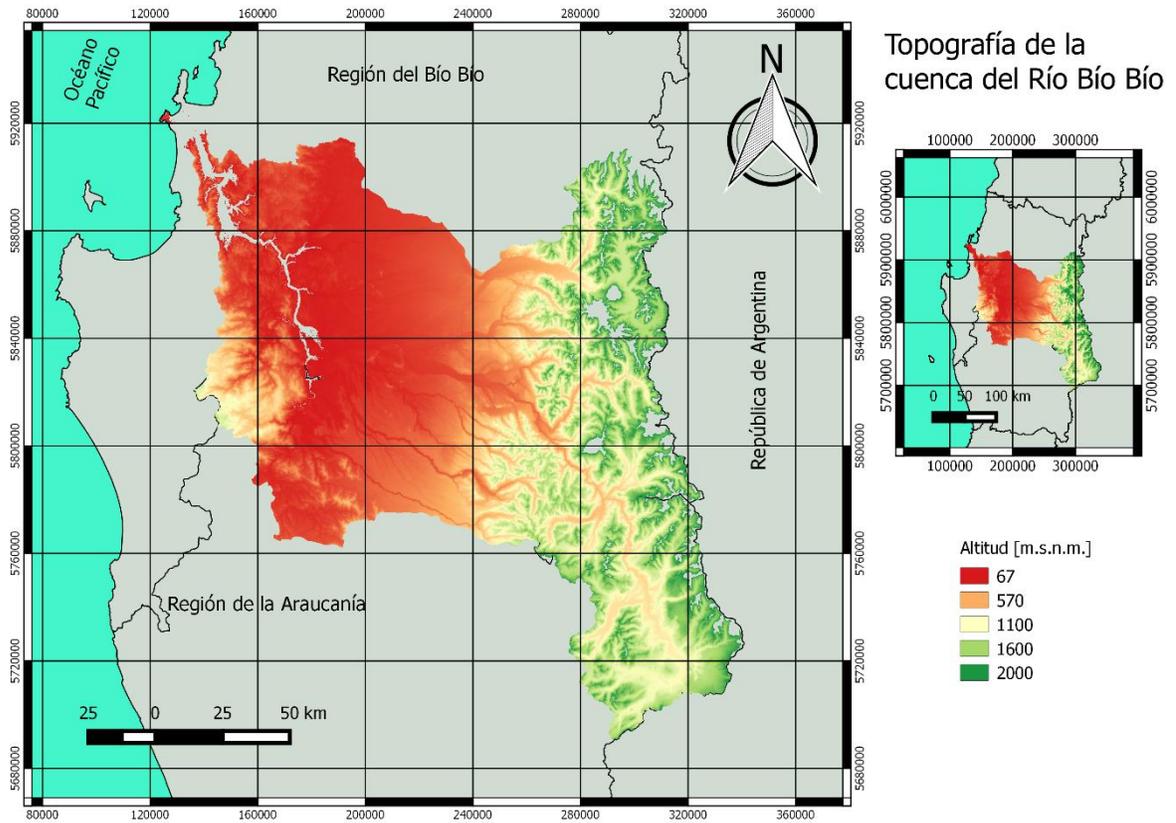


Figura 3.3: Mapa geográfico de la cuenca del Río Bío Bío en coordenadas UTM (Datum WGS84).

CAPÍTULO IV: RECOPIACIÓN Y PREPARACIÓN DE DATOS.

Como ya es mencionado en los capítulos anteriores el método del escalamiento como herramienta de re-análisis se basa principalmente en la observación de datos históricos, los cuales son relacionados mediante una función transferencia con datos simulados por los MCG. Dicho esto, resulta fundamental definir las zonas de estudio y extraer la información necesaria para desarrollar la metodología propuesta en este trabajo. Este capítulo se organiza básicamente explicando la metodología de extracción de datos, tanto observados como simulados.

4.1 Datos observados

Para el estudio resulta fundamental la selección de estaciones con información meteorológica de larga data, que además presenten no estacionariedad. En el trabajo de D’Arcángelli (1997), se analizaron los antecedentes de las estaciones seleccionadas y es posible aseverar que estas cumplen con dichos requisitos. Los datos de temperatura para la estación Quinta Normal y de precipitación para todas las estaciones fueron extraídos de dicho trabajo debido a que estos habían sido ya sometidos a un análisis de consistencia y relleno de datos. Los datos de temperatura del resto de las estaciones, fueron consultados en el sitio en línea y oficinas de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC). El resumen de la información disponible en las estaciones en estudio, se muestra en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Periodos con información continua.

Estación	Precipitación	Temperatura
La Serena	1869-2005	1922-2005
Quinta Normal	1866-2005	1861-2005
Concepción	1892-2005	1929-2005

La información, se incluye en el Anexo A Datos observados, indicándose cuáles son datos rellenos y con qué estación de referencia.

Dado que los datos de temperatura de las estaciones La Serena y Concepción estaban incompletos, fue necesario efectuar el relleno de los datos anuales faltantes. Esto se realizó correlacionando la información disponible con las estaciones cercanas que se indican en la tabla 4.2.

Tabla 4.2: Estaciones de referencia para relleno de datos, en paréntesis se indica la estación a la cual están referenciadas.

Estación de referencia	Coordenadas		Periodo con datos
	Latitud	Longitud	Temperatura
Punta Tortuga (La Serena)	29°57'	71°22'	1870-1983
Vicuña (La Serena)	30°02'	70°44'	1942-1976
Punta Tumbes (Concepción)	36°37'	73°06'	1900-1970

Debido a la falta de datos en común, la cercanía con el mar, y la diferencia de cota de las estaciones, es que no se encontraron relaciones representativas a nivel mensual, por lo que se utilizaron correlaciones de datos sin discriminar en que mes se estaba relleno un dato, es decir utilizando un única correlación de datos para cada estación, la cual consistía básicamente en asignar un punto en un mismo gráfico el dato correspondiente a cada mes de cada año para ambas estaciones, obteniéndose de esta forma, relaciones mucho más representativas para realizar el relleno de datos, las correlaciones utilizadas se encuentran en el Anexo 4.1.2 Correlaciones.

4.2 Selección del MCG

De acuerdo a lo expresado en el capítulo II, es necesario considerar una serie de criterios. Sin embargo este estudio se restringe solo al análisis estacional, lo cual corresponde al escalamiento espacial, ya que se está trabajando bajo el supuesto de no estacionariedad, y al aplicar la corrección de sesgo para analizar la selección del MCG, se estaría transgrediendo dicha afirmación. Además se está trabajando con el periodo histórico para desarrollar una metodología de predicción de datos, con lo cual no tiene sentido analizar la representatividad de las proyecciones de las simulaciones.

Para comenzar a filtrar la selección y con el fin de no asignar un MCG distinto a cada estación, es importante que el MCG seleccionado se comporte de manera apropiada en todas las estaciones, para ello se elabora un ranking con aquellos MCG que tienen mejores R2, y ECM, este asigna un punto por mostrar el mejor R2 o ECM en alguna estación, medio punto por presentar el segundo mejor R2 o ECM, y se resta un punto por presentar el peor R2 o ECM. Aquellos MCG que superaron el primer filtro, es decir lograron asignación de puntaje significativa (sobre medio punto), se muestran en las tablas 4.2 y 4.3. Cabe mencionar que el sistema de puntajes permite empates, por lo cual los MCG N°2 y N°13 comparten el ranking N° 4.

Tabla 4.3: Coeficiente de Correlación (R2) para los Mejores cinco MCG.

N°	GCM	PP LS	PP QN	PP CON	T° LS	T° QN	T° CON	Ranking
2	BNU-ESM	0,978	0,979	0,979	0,996	0,989	0,991	4
5	CNRM-CM5	0,977	0,992	0,975	0,998	0,989	0,991	1
10	GFDL-ESM2M	0,991	0,939	0,978	0,996	0,989	0,994	2
13	MIROC-ESM-CHEM	0,990	0,977	0,978	0,994	0,987	0,991	4
19	NorESM1-M	0,981	0,981	0,960	0,997	0,987	0,993	3

Tabla 4.4: Error Cuadrático Medio (ECM) para los Mejores cinco MCG

N°	GCM	PP LS	PP QN	PP CON	T° LS	T° QN	T° CON	Ranking
2	BNU-ESM	3,18	24,21	368,84	2,86	1,74	1,01	4
5	CNRM-CM5	5,35	105,91	168,77	2,64	1,42	0,97	1
10	GFDL-ESM2M	2,22	59,87	180,05	2,48	1,53	0,93	2
13	MIROC-ESM-CHEM	1,64	46,86	240,90	2,55	1,57	1,11	4
19	NorESM1-M	2,16	48,69	256,80	2,40	1,48	0,91	3

Las figuras 4.1 a 4.6 muestran en detalle cómo se comportan estos cinco modelos en comparación con los datos históricos, es importante agregar que desde esta parte de la lectura, y con el propósito de simplificar la presentación de los resultados, las estaciones están nombradas por el lugar en el que se encuentran: La Serena, Quinta Normal y Concepción.

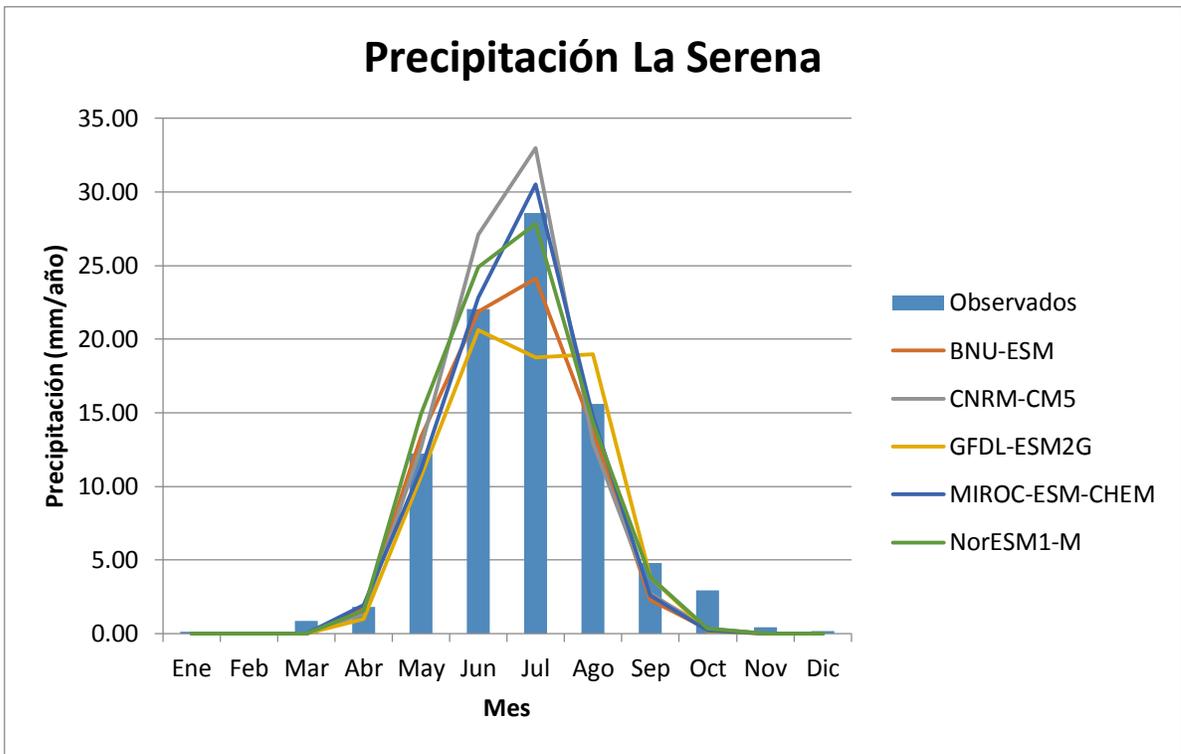


Figura 4.1: Curva de variación estacional para Precipitación en Estación La Serena.

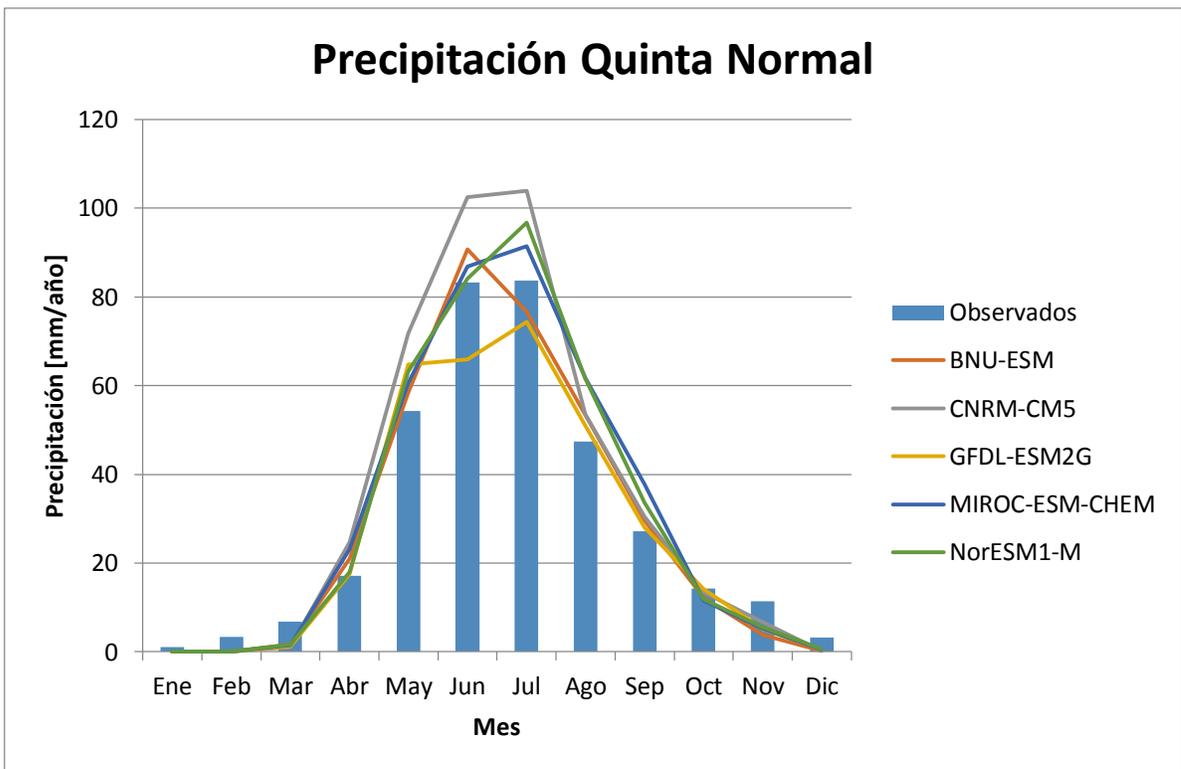


Figura 4.1: Curva de variación estacional para Precipitación en Estación Quinta Normal.

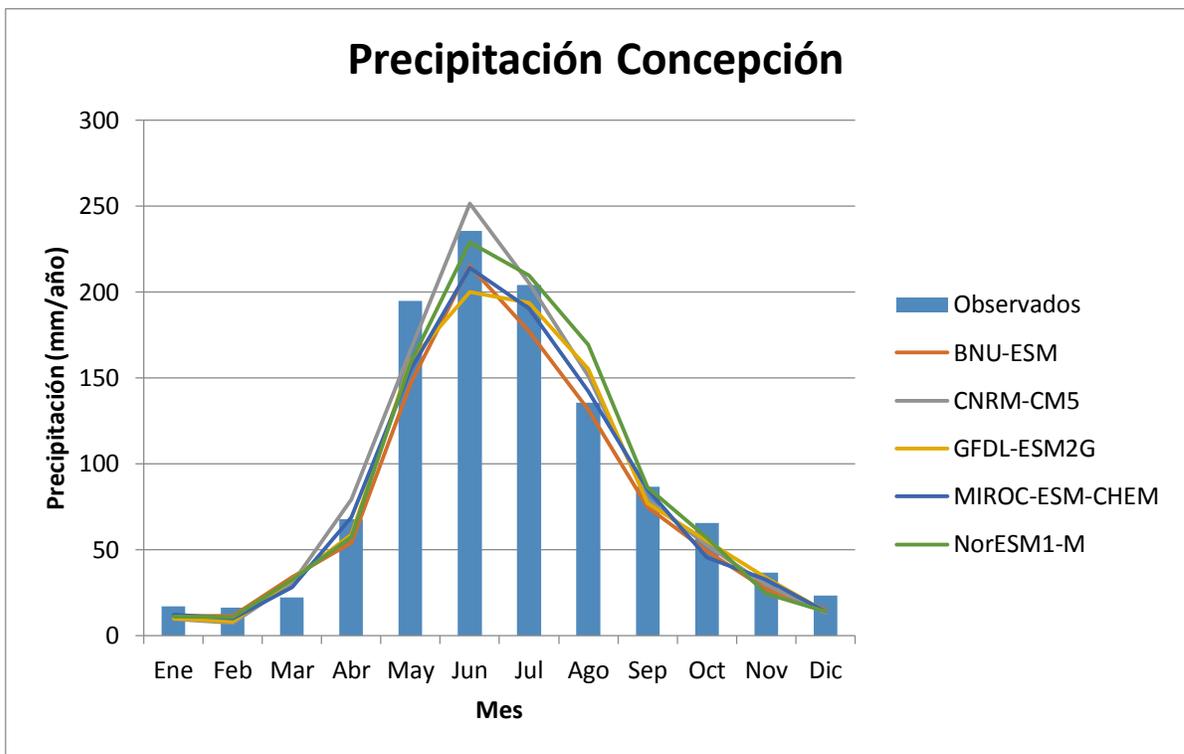


Figura 4.3: Curva de variación estacional para Precipitación en Estación Concepción.

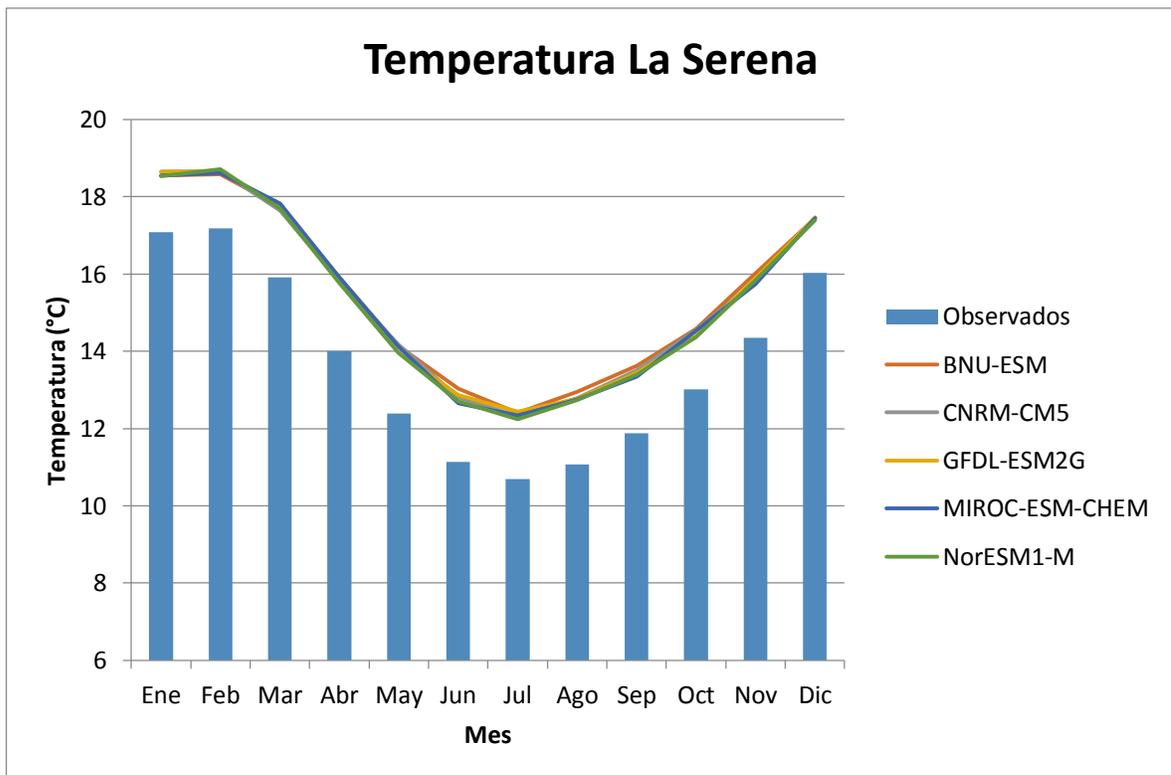


Figura 4.4: Curva de variación estacional para Temperatura en Estación La Seerena

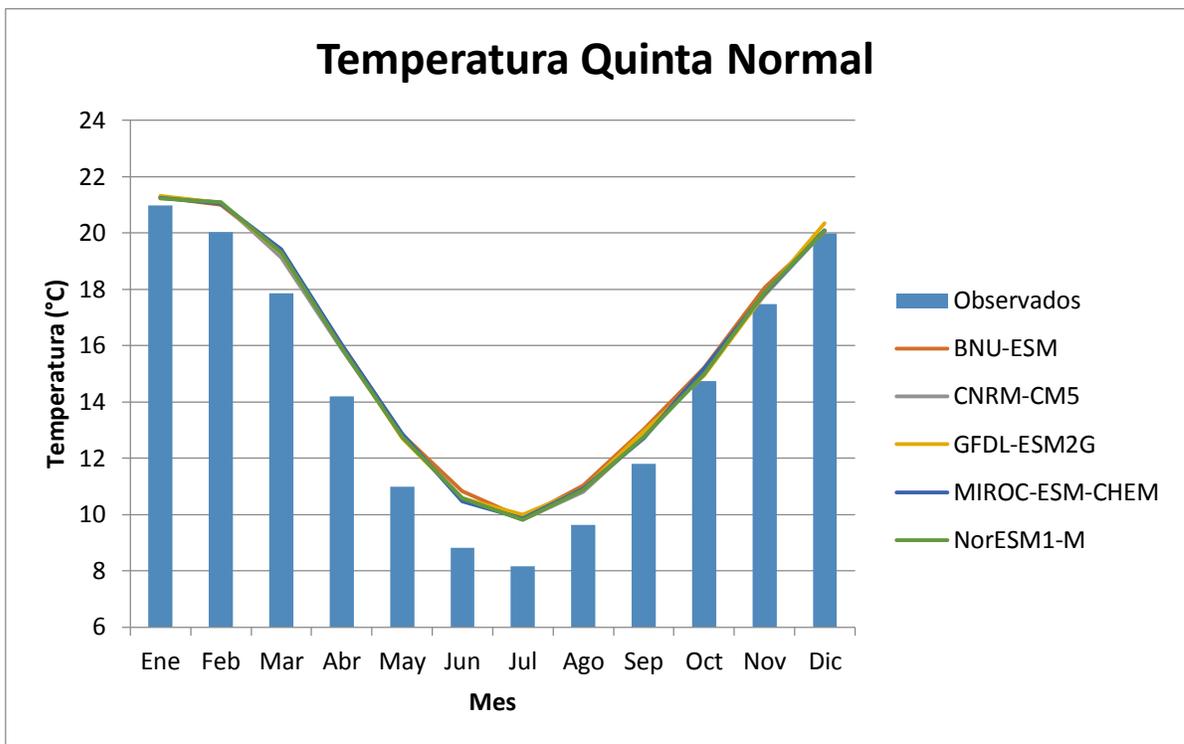


Figura 4.5: Curva de variación estacional para Temperatura en Estación Quinta Normal.

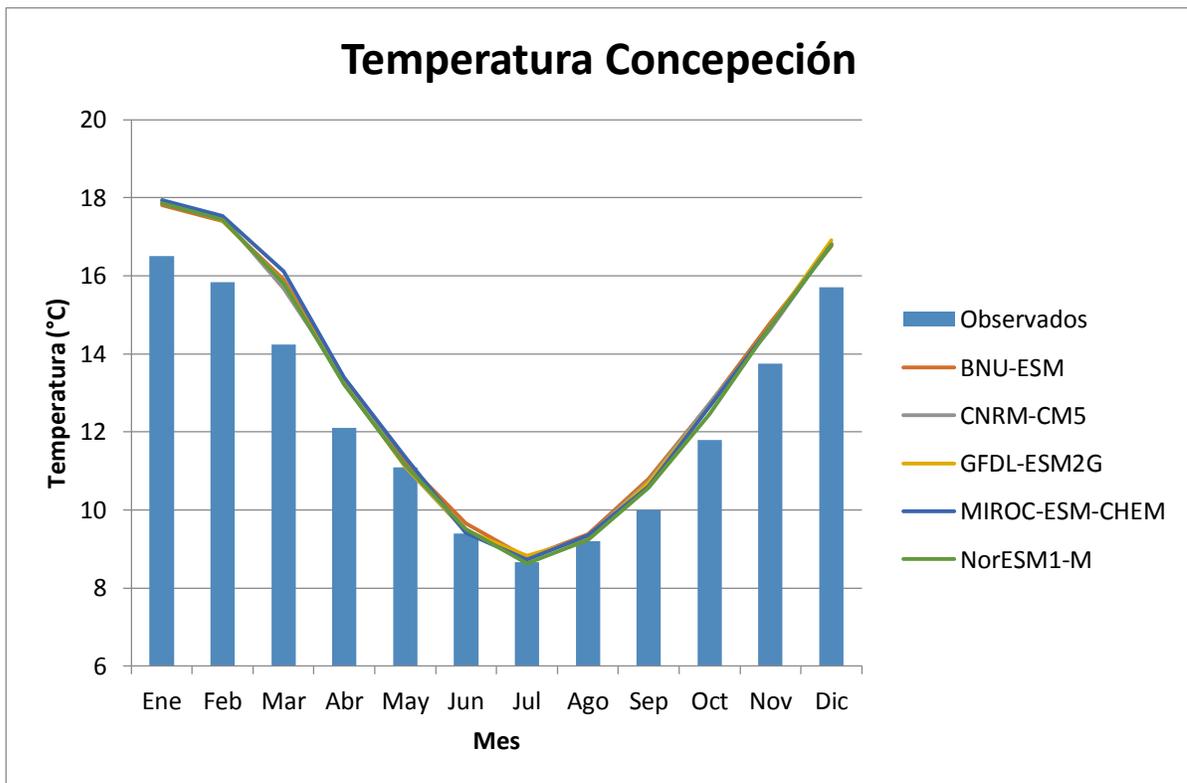


Figura 4.6: Curva de variación estacional para Temperatura en Estación Concepción.

Como es posible observar en el caso de la temperatura, incluso para los 21 modelos se tienen relaciones bastante representativas, siendo difícil afirmar cual MCG representa mejor la situación, por lo que se consideró como criterio representativo lo que ocurre con la precipitación, sin considerar la temperatura.

Además, como criterio adicional se decidió seleccionar aquel MCG que represente de mejor forma los meses en que se tienen extremos, con lo cual se seleccionó MIROC-ESM-CHEM debido a que CNRM-CM5, que tiene mejores indicadores representativos, sobrestima en general las precipitaciones en todas las estaciones. Además, los otros modelos, si bien son bastante representativos en algunas estaciones, funcionan mal en otras, como el caso de Nor-ESM1-M en la estación Quinta Normal donde el mes que se obtiene la máxima precipitación no se ve representado en lo absoluto. Siendo así, MIROC-ESM-CHEM el que mejor se comporta desde un punto de vista integral.

Adicionalmente se realizó un análisis de los promedios anuales, para observar las curvas de duración y verificar el correcto comportamiento del modelo seleccionado, los resultados se aprecian en las figuras 4.7 a 4.9. Luego, es posible apreciar, que si bien CNRM-CM5 y Nor-ESM1-M representan bien los valores observados para alta y baja probabilidad en La Serena y Quinta normal respectivamente, fallan considerablemente en la estación Concepción. MIROC-ESM-CHEM se comporta de manera mejor considerando el conjunto de todas las estaciones, sin sobrestimar o subestimar los años extremos.

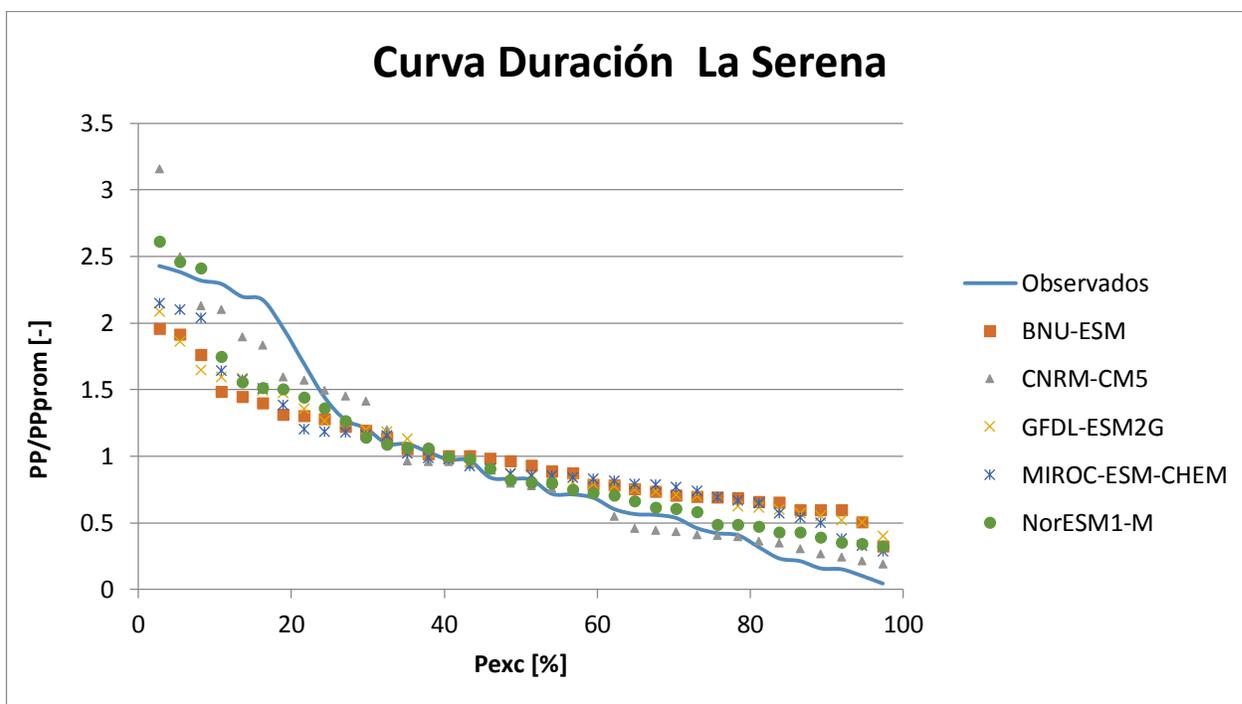


Figura 4.7: Curva de Duración para Precipitación en Estación La Serena.

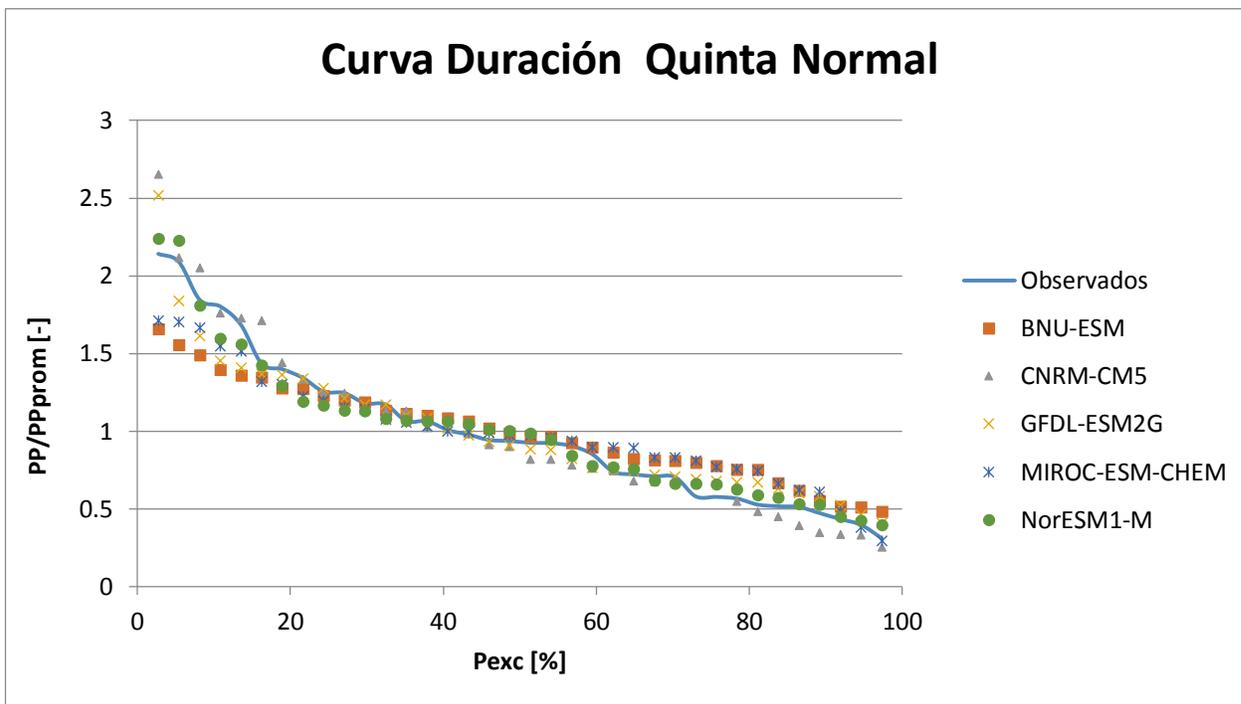


Figura 4.8: Curva de Duración para Precipitación en Estación Quinta Normal.

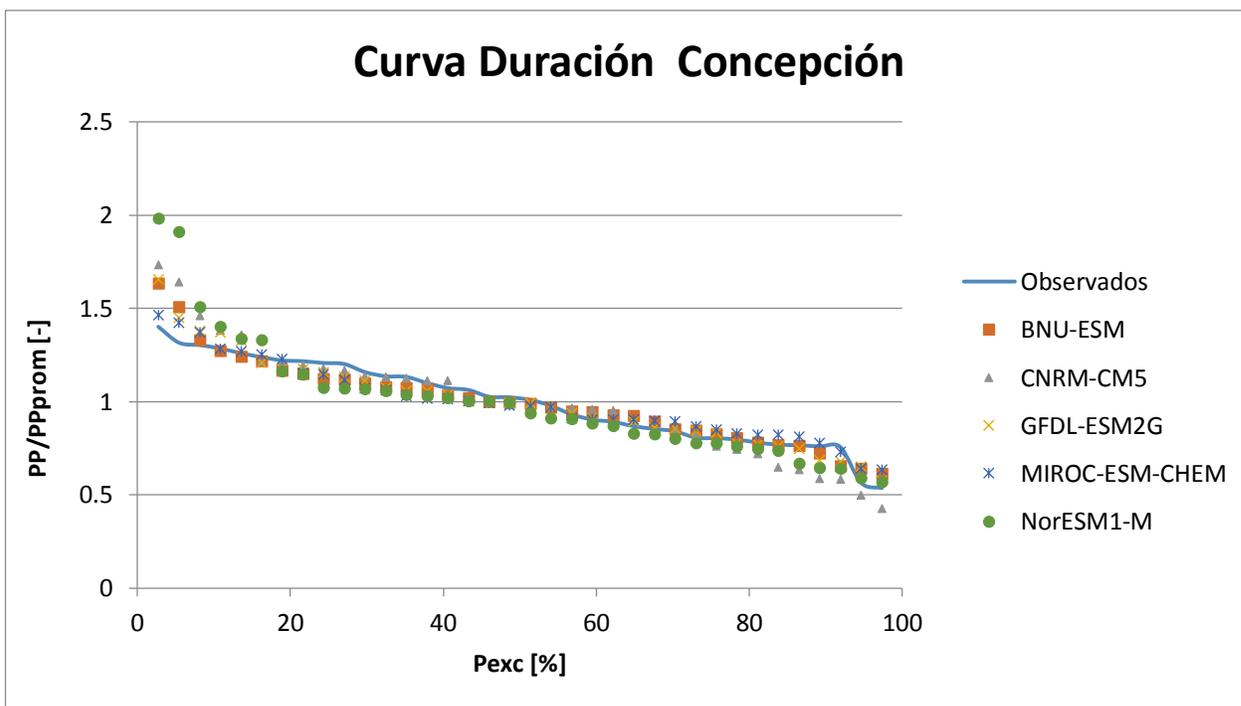


Figura 4.9: Curva de Duración para Precipitación en Estación Concepción.

4.3 Datos simulados

Del acápite anterior, se concluyó que el modelo que mejor representaba el periodo histórico en las estaciones de estudio era MIROC-ESM-CHEM, por lo que se realizó la descarga de datos del sitio del CMIP5 (Pcmdi.llnl.gov., 2016), el cual contiene la información de todos los modelos incluidos en el proyecto del CMIP5. Básicamente se recopila toda la información disponible para temperaturas promedio y precipitaciones totales a nivel mensual, correspondientes al periodo histórico 1850-2005.

Adicional a esto, se elabora un código con el software MATLAB, para extraer la información de los nodos de importancia, el cual recibe como input la posición geográfica de las estaciones, y los nodos en los que esta se encuentra. De esta forma, resulta útil definir la zona de estudio, la tabla 4.4 presenta un resumen con las coordenadas geográficas de las estaciones:

Tabla 4.5: Coordenadas geográficas de las estaciones en estudio.

Estación	Latitud	Longitud	Nomenclatura
La Serena	-29,90°	-71,20°	LS
Quinta Normal	-33,43°	-70,68	QN
Concepción	-36,76°	-73,05°	CON

Luego de definir las coordenadas de las estaciones, es necesario identificar en que nodos de la malla del MCG se encuentran estos, para lo cual se ejecuta un código que extrae los valores de los nodos, los que se presentan en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Coordenadas geográficas de los nodos adyacentes a las estaciones en estudio.

Estación	Nombre Nodo	N1 LS	N2 LS	N3 LS	N4 LS
La Serena	Latitud	-29,3014°	-29,3014°	-32,0919°	-32,0919°
	Longitud	-73,1250°	-70,3125°	-73,1250°	-70,3125°
Quinta Normal	Nombre Nodo	N1 QN	N2 QN	N3 QN	N4 QN
	Latitud	-32,0919°	-32,0919°	-34,8825°	-34,8825°
	Longitud	-73,1250°	-70,3125°	-73,1250°	-70,3125°
Concepción	Nombre Nodo	N1 CON	N2 CON	N3 CON	N4 CON
	Latitud	-34,8825°	-34,8825°	-37,6731°	-37,6731°
	Longitud	-73,1250°	-70,3125°	-73,1250°	-70,3125°

Donde es importante tener en cuenta la nomenclatura que para efectos prácticos, el nodo N1 es el nodo izquierdo superior, el nodo N2 es el nodo derecho superior, el nodo N3 es el

nodo izquierdo inferior y el nodo N4 es el nodo derecho inferior. La figura 4.10 muestra sus respectivas posiciones:



Figura 4.10: Posiciones de los nodos y estaciones en vista satelital.

CAPÍTULO V: MODELACIÓN DE LA NO ESTACIONAREIDAD.

En el capítulo anterior, se prepararon los datos para realizar el escalamiento, pero se debe tener en cuenta, que este trabajo incluye dos metodologías para realizar este procedimiento. Por un lado se pretende eliminar la tendencia en las series de precipitación y temperatura mediante un cambio de variables, con el fin de definir un periodo histórico corregido y sin tendencia en la series, para así realizar el escalamiento estadístico de manera convencional sin contradecir la hipótesis de suponer que el clima es estacionario. De manera alternativa y paralela, se realiza el escalamiento utilizando distintos intervalos del periodo histórico, para obtener un conjunto de funciones de transferencia, éstas determinan un rango de incertidumbre con el cual se trabaja al suponer la hipótesis de que el clima es estacionario cuando en realidad no lo es.

5.1 Obtención de la relación para el cambio de variables:

Antes de comenzar el modelamiento de la no estacionareidad para el método del cambio de variables, es importante definir un periodo de calibración y un periodo de validación. Es decir, el periodo histórico cuenta con la información desde 1850-2005, en el cual solo se trabaja con un sub-intervalo para dicho modelamiento, con el fin de utilizar el intervalo restante para validar el modelo una vez finalizado el escalamiento estadístico. Esto se realiza según la tendencia que muestren las series, con el fin de analizar distintos escenarios, es decir, que exista o no tendencia en algún periodo, o si la tendencia es la misma en ambos periodos ya sea de calibración o validación.

Para obtener la relación que permite eliminar la tendencia de las series de precipitación y temperatura, es necesario realizar un análisis de promedios móviles, donde se aplica el procedimiento mencionado en el capítulo II. Luego de aplicar el método, considerando distintas amplitudes del periodo de media móvil, se selecciona como la relación representativa aquella que muestre un coeficiente de determinación $R^2 \geq 0,5$ y que además, represente de mejor manera la curva es decir, que se ajuste de mejor manera a una función lineal y con desviación estándar constante, es decir:

$$\bar{x}_q = m * x_{sim,obs} + n$$

Donde:

\bar{x}_q : Representa el promedio móvil de un periodo de q años.

m : La pendiente que muestra la tendencia.

$x_{sim,obs}$: El valor observado o simulado.

n : Punto de intercepción en la ordenada

De no ser posible identificar y ajustar una única función lineal al sistema debido a la falta de representatividad de la serie. El periodo se divide por tramos, donde se define el

periodo de calibración con una tendencia distinta al periodo de validación, como ya es mencionado anteriormente. Luego, esta metodología permite estudiar distintos escenarios, dependiendo de si la tendencia de los datos observados es compatible con la tendencia en los datos simulados.

Lo que corresponde, siguiendo la metodología, es analizar el periodo histórico y encontrar tendencias representativas considerando intervalos de media móvil de 10, 15, 20 y 25 años.

De esta forma, se presentan las tendencias más representativas para cada estación, las cuales resultaron ser en todos los casos las correspondientes a una media móvil de 25 años, debido a que se obtuvieron mejores R^2 tanto en precipitación como en temperatura para los datos observados en el periodo histórico. Cabe mencionar que desde ahora en adelante, para presentar los resultados se utilizan las siglas PP para denotar precipitación y T para denotar temperatura. Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 5.1 a 5.6.

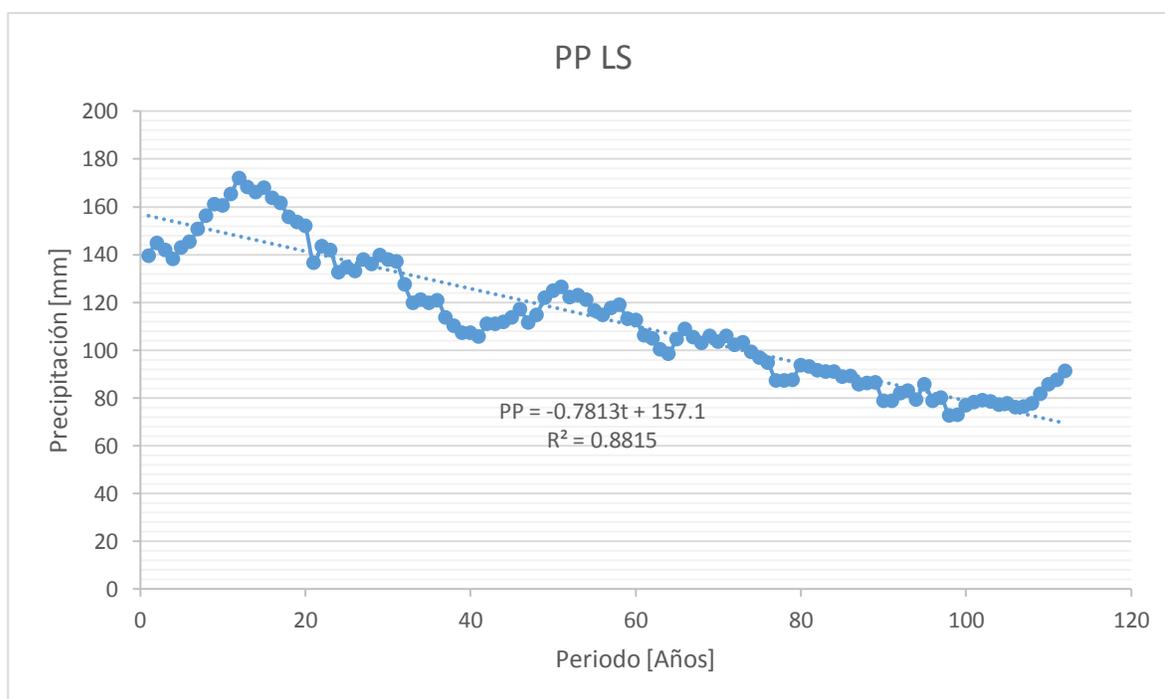


Figura 5.1: Línea de tendencia para precipitaciones en estación La Serena.

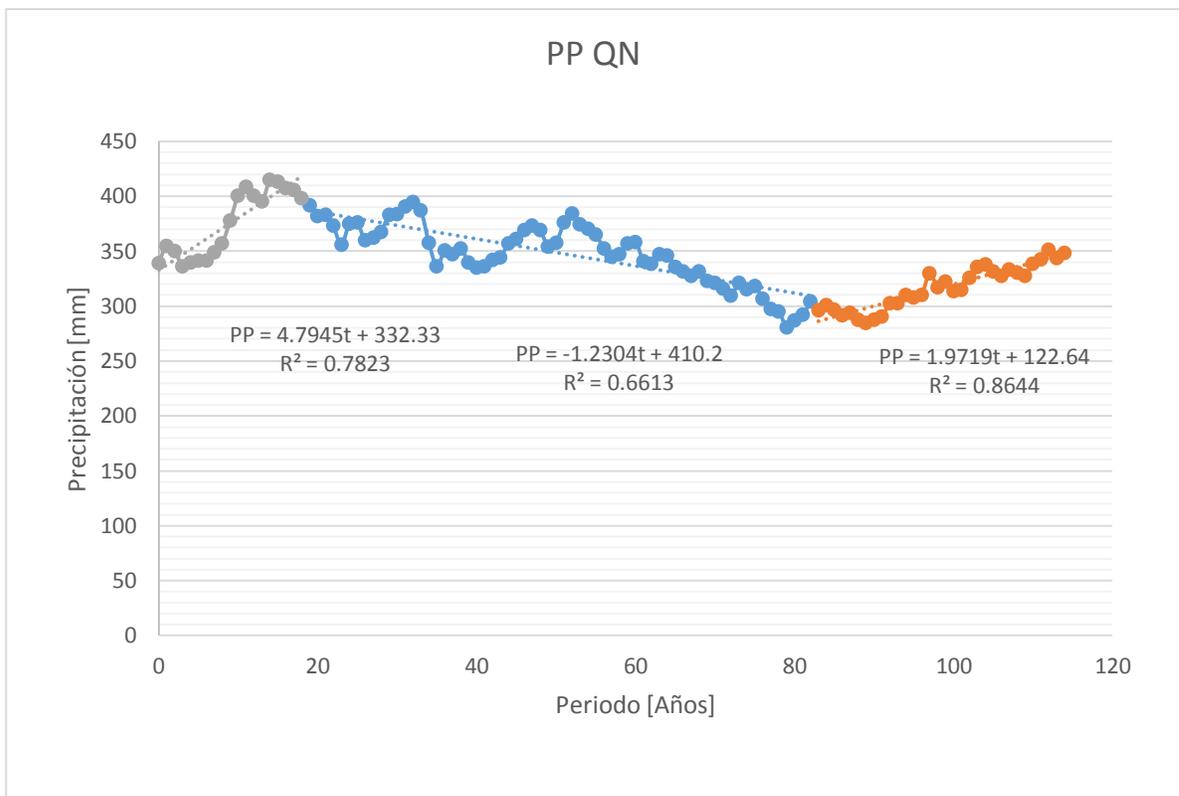


Figura 5.2: Línea de tendencia para precipitaciones anuales en estación Quinta Normal.

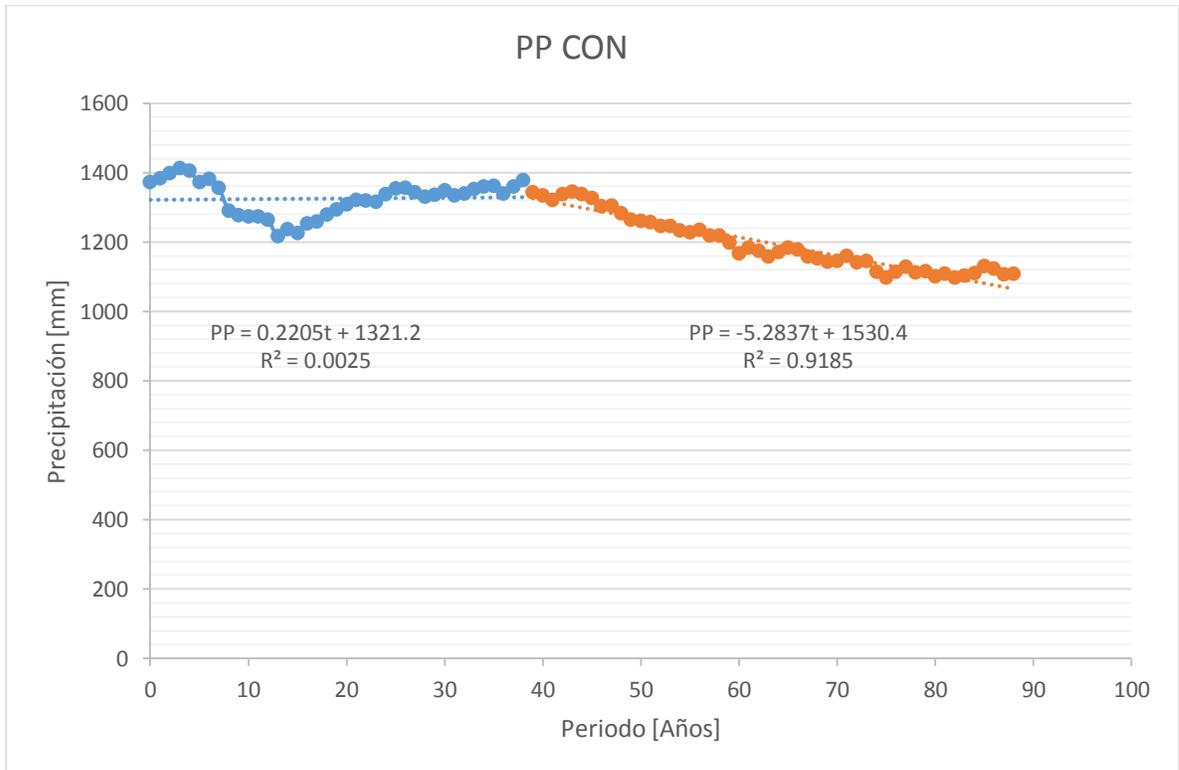


Figura 5.3: Línea de tendencia para precipitaciones anuales en estación Concepción.

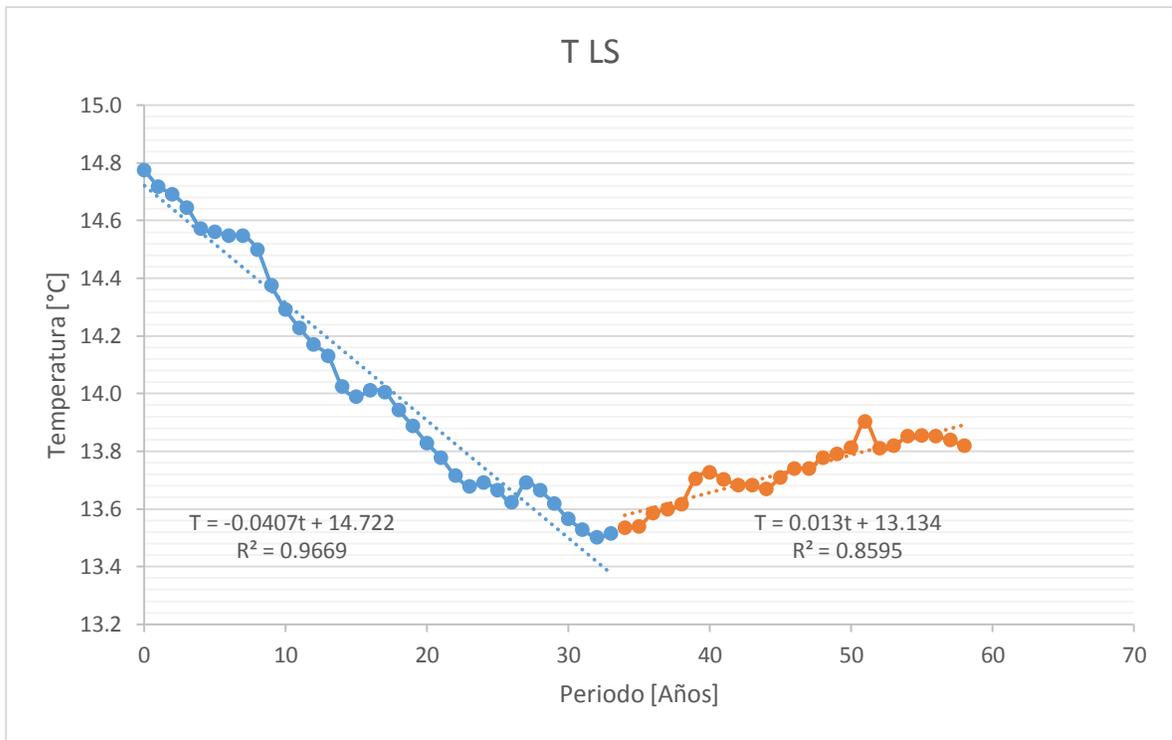


Figura 5.4: Línea de tendencia para Temperatura media anual en estación La Serena.

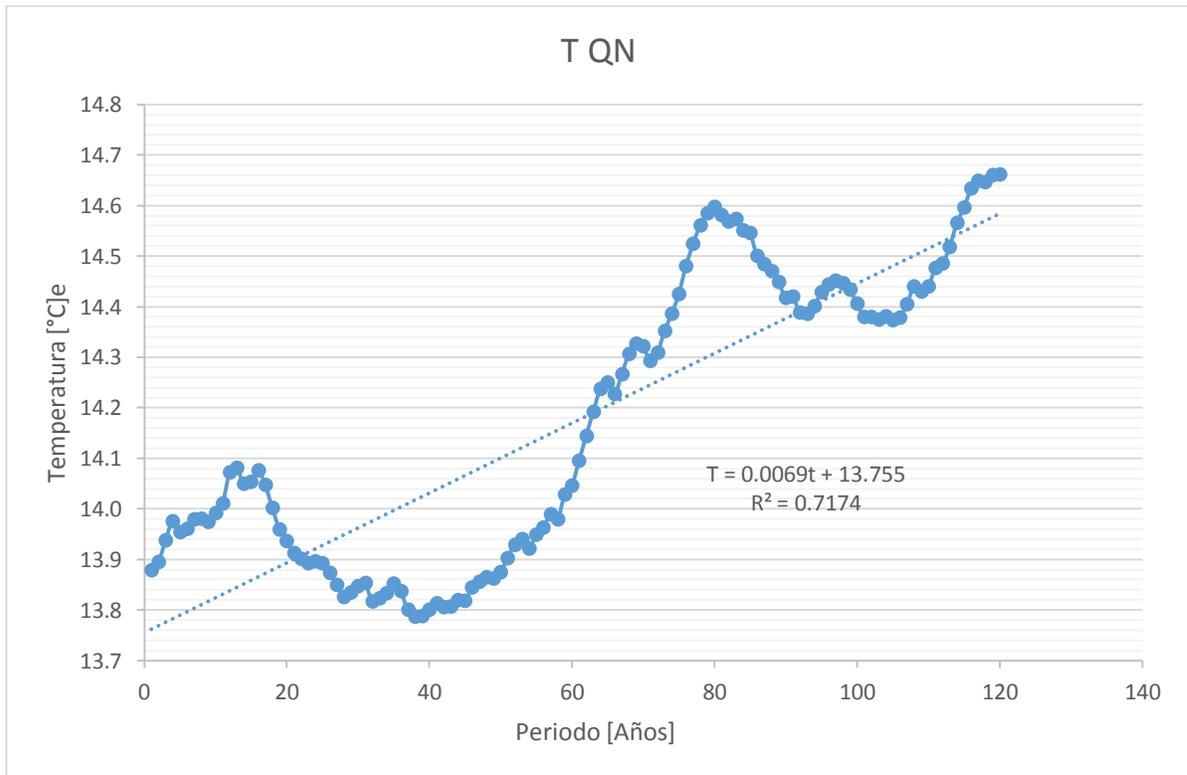


Figura 5.5: Línea de tendencia para Temperatura media anual en estación Quinta Normal.

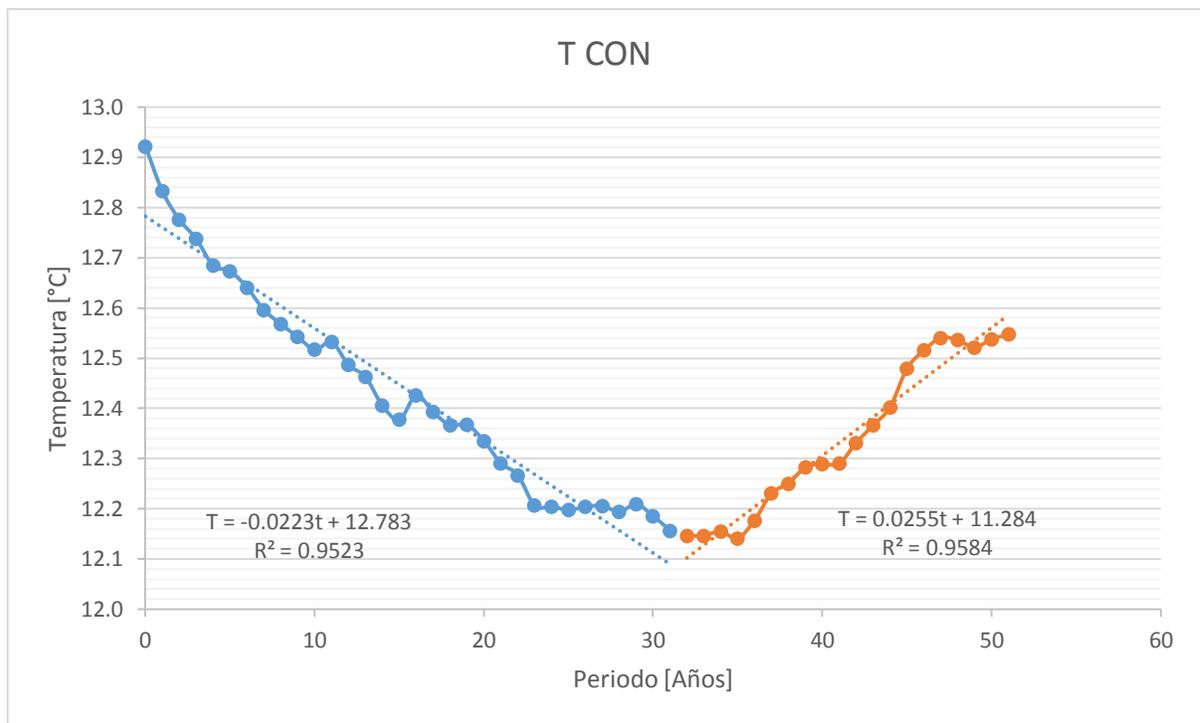


Figura 5.6: Línea de tendencia para Temperatura media anual en estación Concepción.

5.2 Escalamiento espacial:

Para, modelar la no estacionariedad en el proceso de escalamiento estadístico, es necesario también analizar lo que ocurre con los datos simulados, ya que estos también presentan tendencias que deben ser eliminadas para realizar la posterior corrección de sesgo, por eso es necesario escalar espacialmente dichos datos al lugar de cada estación, y reconocer las tendencias para transformar los datos. Básicamente, se escalan los datos y luego se aplica el análisis de tendencia similar al realizado a los datos observados.

En este estudio, se consideraron tres posibles formas de escalamiento espacial, las cuales corresponden al inverso de la distancia, inverso de la distancia al cuadrado y finalmente, usar como representativo algún nodo de los cuatro nodos correspondientes a la grilla del MCG, que para efectos prácticos se definirán como Nodo Izquierdo Superior (N1), Nodo Derecho Superior (N2) Nodo Izquierdo inferior (N3), y Nodo Derecho inferior (N4). Para seleccionar que escalamiento es óptimo se utilizan los tres siguientes criterios, los cuales básicamente se refieren a la semejanza en función de los datos observados:

- Calidad de la correlación con datos observados, en la curva de duración: se preseleccionan aquellos resultados escalados que presenten un buen coeficiente de determinación y que, en lo posible, la ecuación de la recta que correlaciona los datos observados con simulados para igual probabilidad, tenga una pendiente cercana a cero e intersecte al eje y en el origen; es decir, se busca cumplir con los siguientes criterios:

$$R^2 \approx 1; m \approx 1; n \approx 0$$

- Semejanza a la función identidad de los datos observados, en el intervalo donde se encuentran las series, para la curva de duración: siguiendo con la lógica anterior, es necesario que la ecuación de la recta que correlaciona a datos observados con simulados para igual probabilidad, se asemeje a la función identidad de los datos observados en el intervalo en el que se encuentran los valores, es decir: Sean a y b las cotas inferior y superior respectivamente de la serie de datos observados, c y d las cotas inferior y superior respectivamente de la serie de datos simulados, x datos observados $f(x)$ la función que correlaciona datos observados con simulados. Si $\forall x \in [a, b]$ y $\forall f(x) \in [c, d]$ se cumple:

$$f(x) \approx id(x)$$

Con $id(x)$ la función identidad de la series de datos observados, entonces el escalamiento espacial es bueno. Por lo cual se preseleccionan los escalamientos que mejor representen este criterio.

- Semejanza a la línea de tendencia de los datos observados: finalmente, es importante también considerar la tendencia que presenta la serie de datos simulados, que se espera sea semejante a la correspondiente de la serie de datos observados (aquellas obtenidas en el acápite anterior). Este análisis se lleva a cabo en el mismo periodo de media móvil correspondiente al que se utilizó para determinar la línea de tendencia de las series de datos observados, que en este caso resultó ser de 25 años para todas las estaciones y su respectiva forzante meteorológica.

Los dos primeros criterios se pueden analizar en conjunto, mirando el gráfico que ordena simulada versus precipitación observada para igual probabilidad, donde la línea punteada representa la correlación y la línea azul la función identidad de los datos observados. Los resultados se presentan en las figuras 5.7 a 5.12.

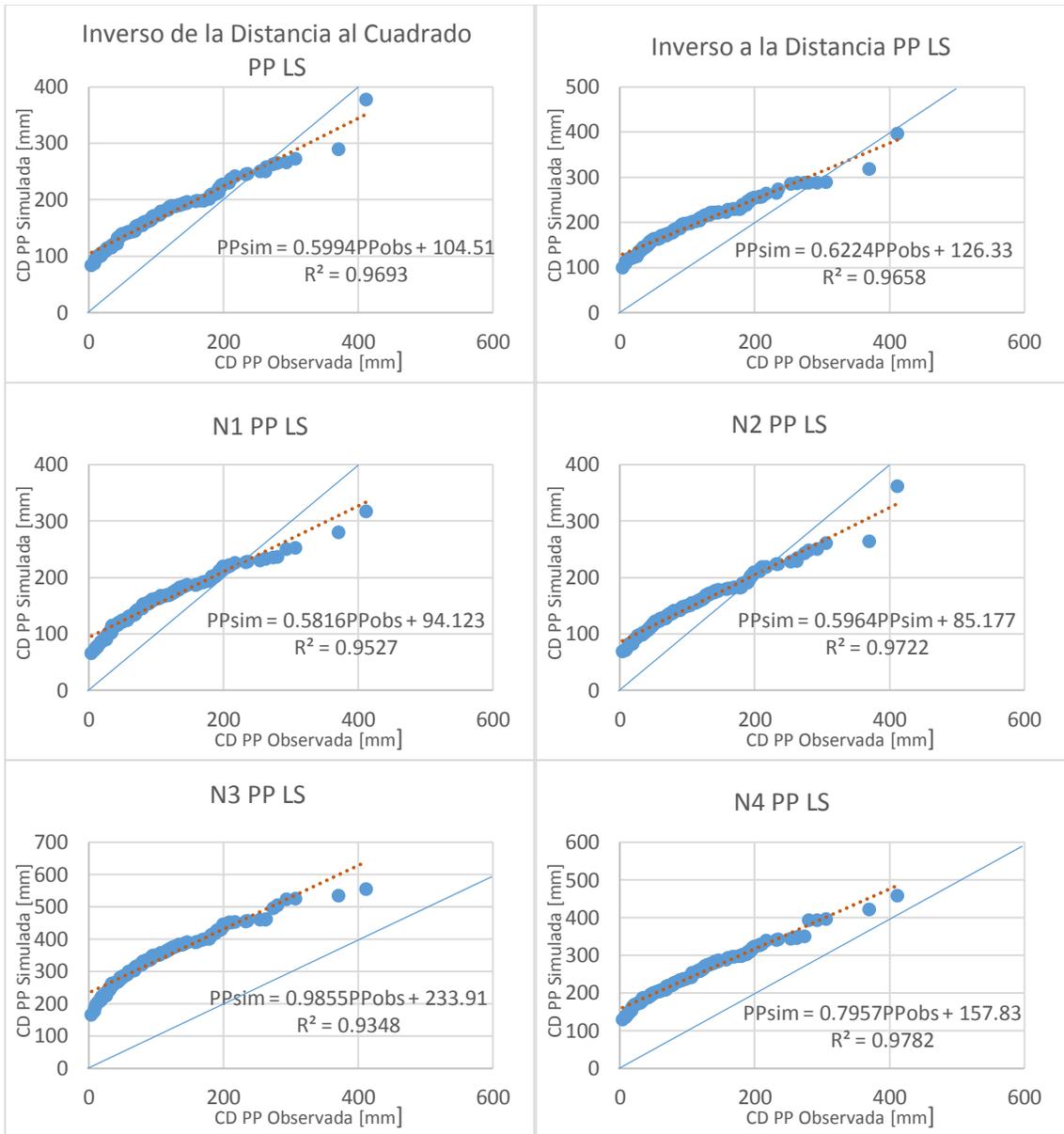


Figura 5.7: Curvas PPSim v/s PPObs, ordenadas de mayor a menor para Estación La Serena.

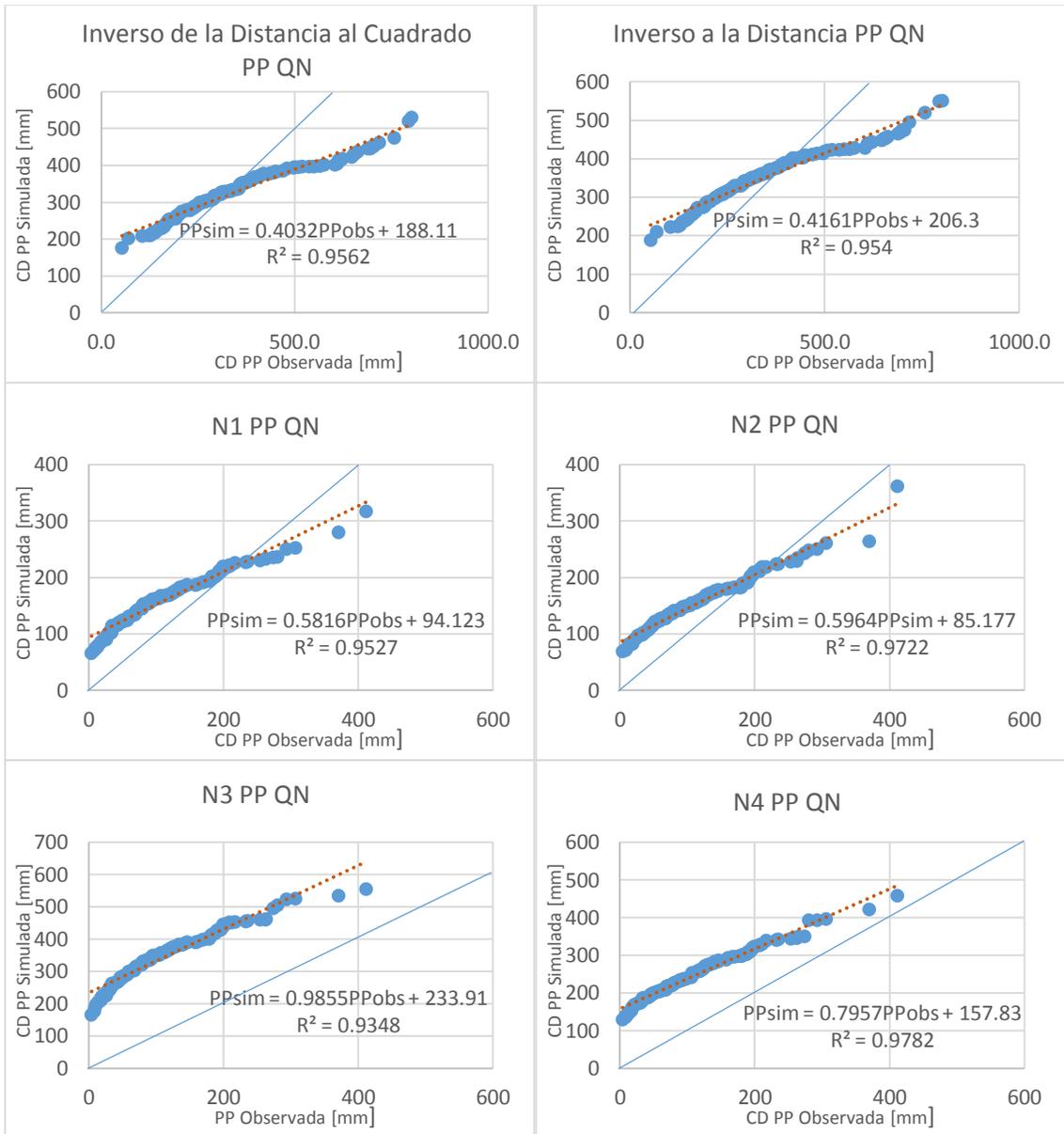


Figura 5.8: Curvas PPSim v/s PPObs, ordenadas de mayor a menor para Estación Quinta Normal.

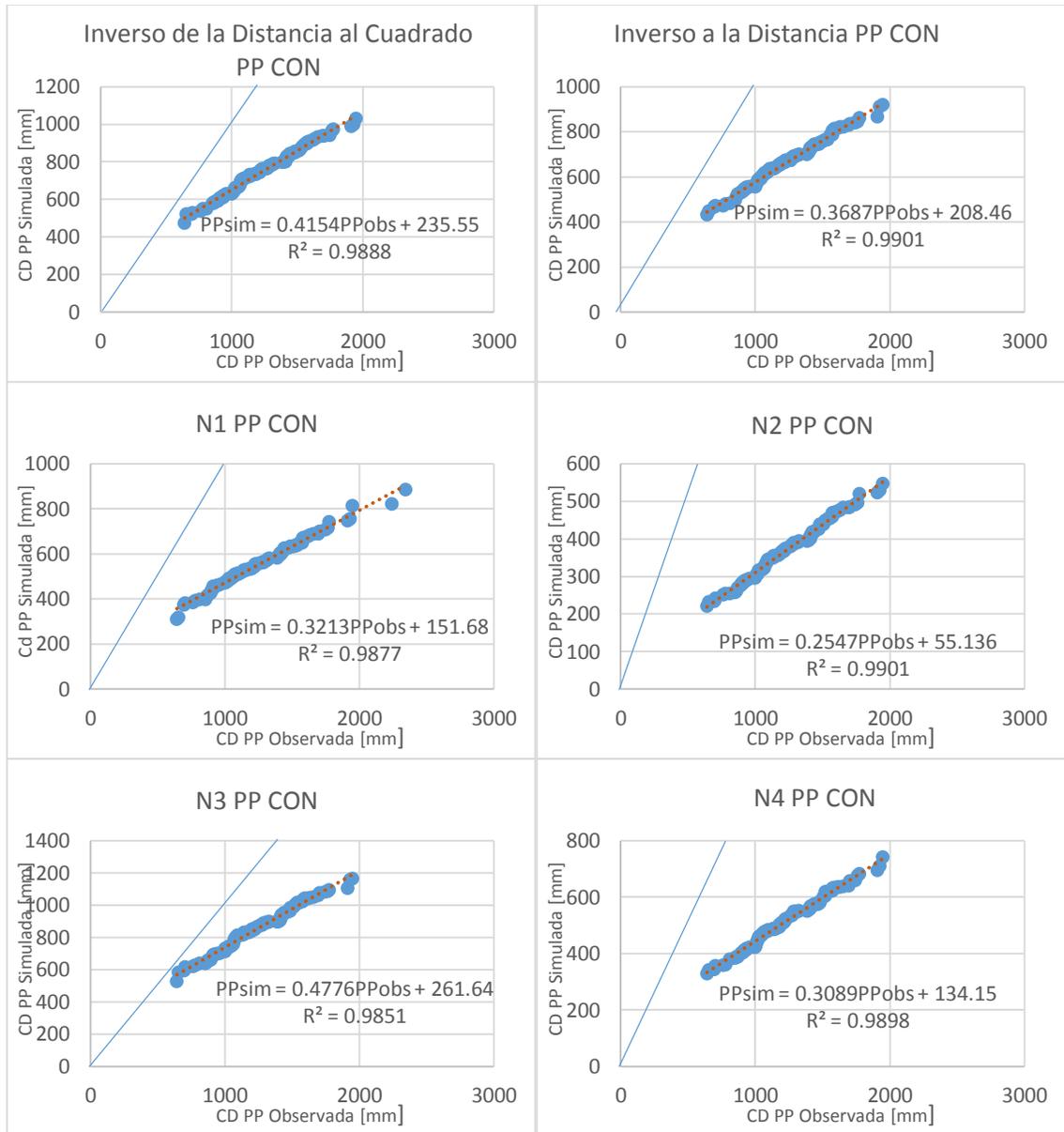


Figura 5.9: Curvas PPSim v/s PPObs, ordenadas de mayor a menor para Estación Concepción.

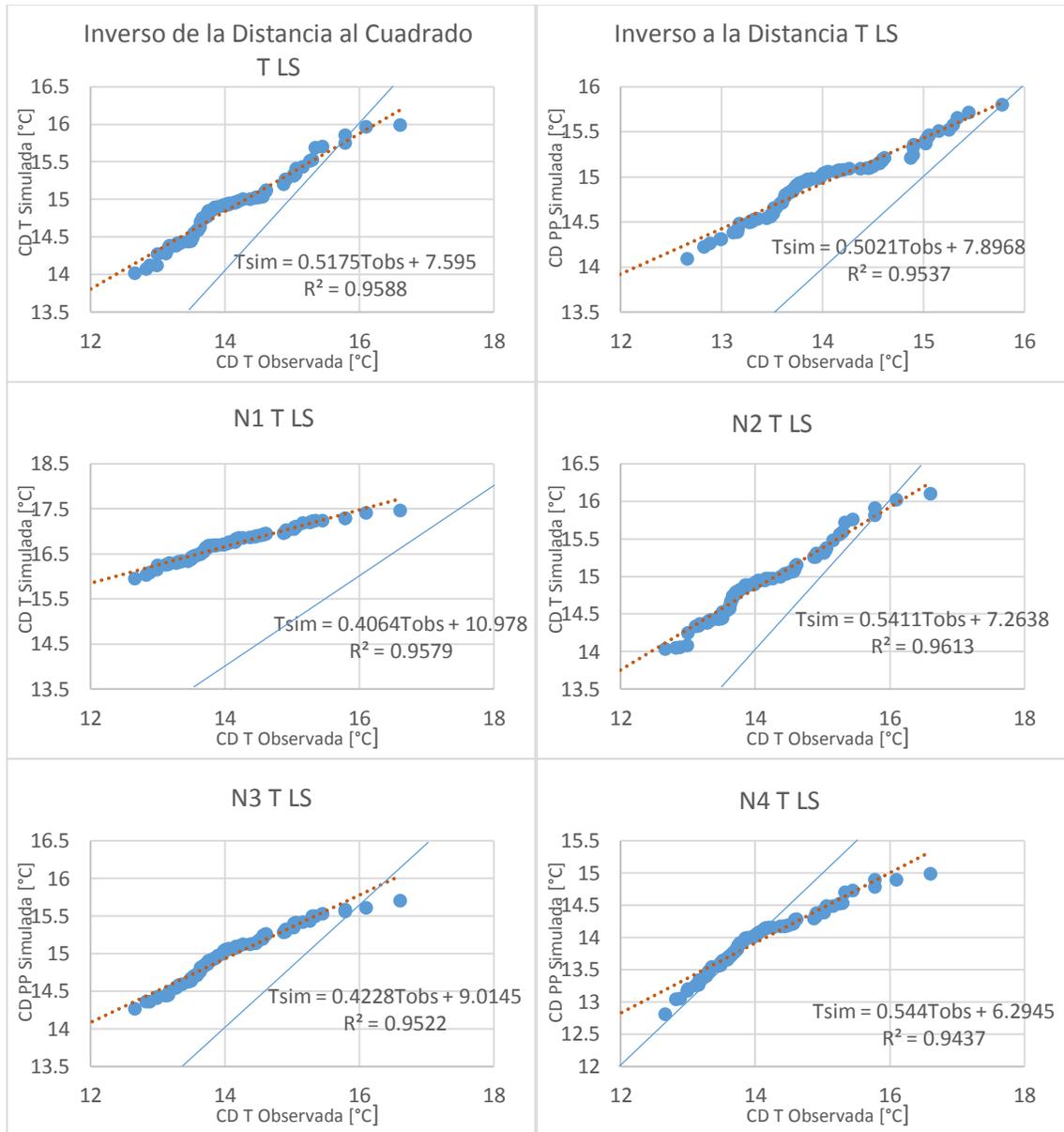


Figura 5.10: Curvas TSim v/s TObs, ordenadas de mayor a menor para Estación La Serena.

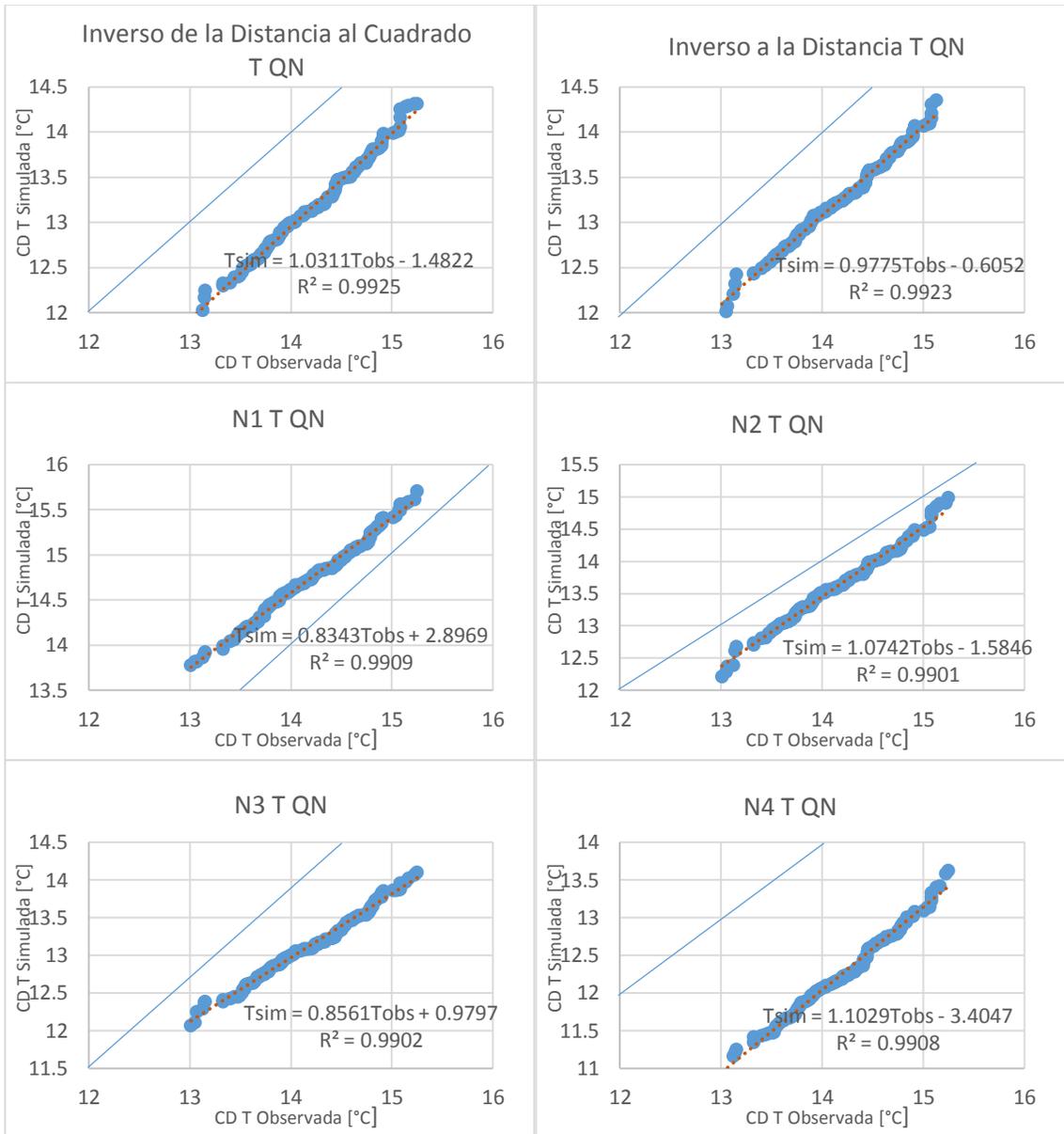


Figura 5.11: Curvas TSim v/s TObs, ordenadas de mayor a menor para Estación Quinta Normal.

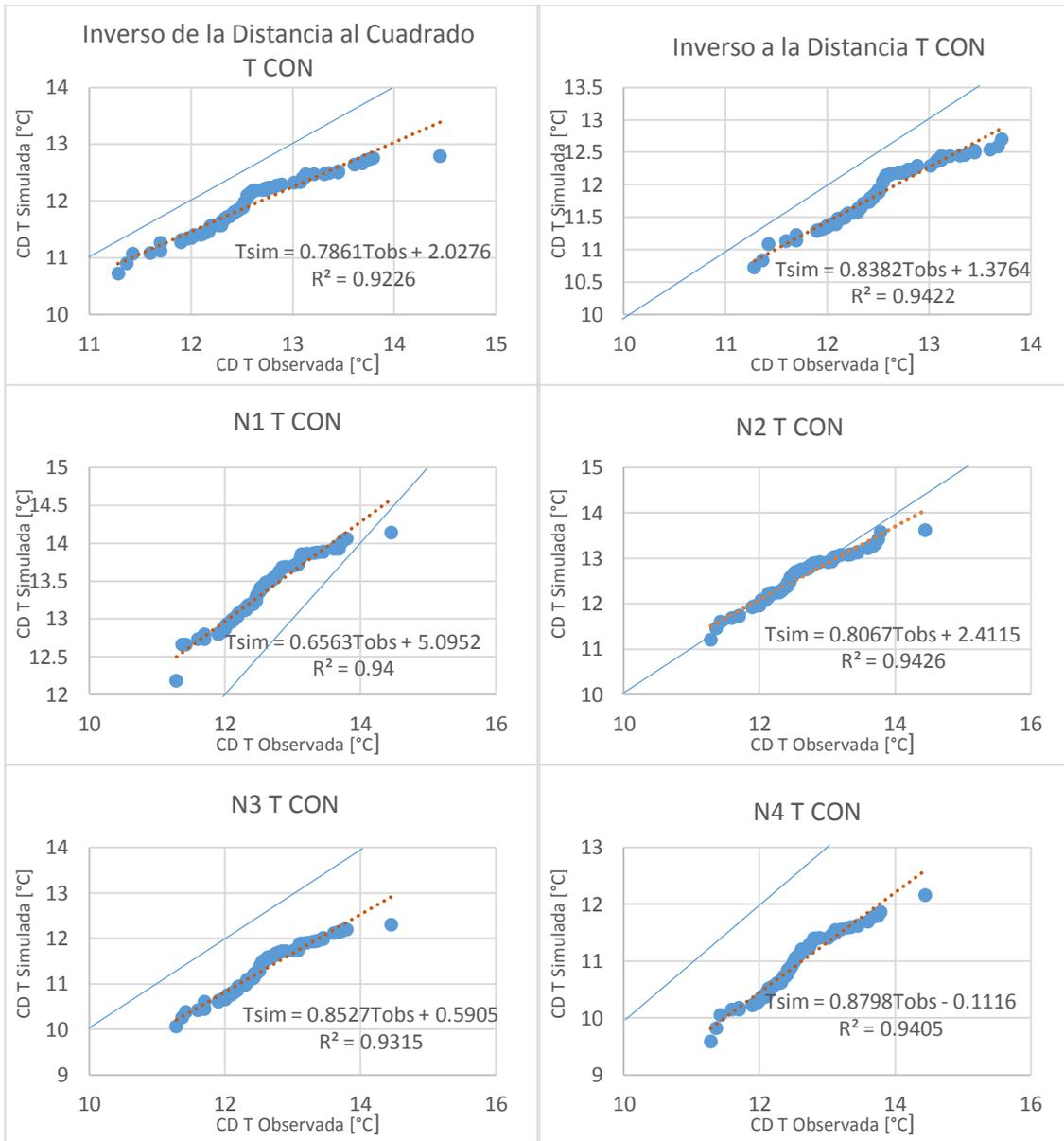


Figura 5.12: Curvas TSim v/s TObs, ordenadas de mayor a menor para Estación Concepción.

Luego, considerando los criterios antes mencionados, es posible preseleccionar los siguientes escalamientos:

- Estación La Serena, Precipitación: Presentan buenas correlaciones los nodos superiores y el nodo inferior derecho con la pendiente más cercana a uno. Pero lamentablemente los nodos superiores no presentan tendencias compatibles con los datos observados, por lo que se deben descartar, seleccionando así el nodo abajo izquierdo como representativo.
- Estación Quinta Normal, Precipitación: Los nodos de arriba presentan buenas correlaciones, el escalamiento de inverso de la distancia e inverso de la distancia al cuadrado también, pero el único que se ajusta de mejor manera a la línea de tendencia es el de inverso de la distancia al cuadrado. Además se debe tener en cuenta que se tenían tres periodos con distintas líneas de tendencia según los datos observados, por lo que las tendencias también deben compatibilizarse con este hecho.
- Estación Concepción, Precipitación: Las relaciones de todos los escalamientos no resultan ser satisfactorias, por lo que se elige como representativo el nodo izquierdo de abajo. Por otro lado, las tendencias resultan ser similares para todos los escalamientos, con lo que deja de ser un criterio relevante.
- La Serena, Temperatura: El nodo de abajo a la derecha es el que más se asemeja a la función identidad de los datos observados, además presenta una buena correlación. Por otro lado, la línea de tendencia solo se ve bien representada en la última parte del periodo para todos los tipos de escalamiento.
- Quinta Normal, Temperatura: Al igual que con otras estaciones, las tendencias son similares en todo tipos de escalamientos, las correlaciones también presentan buenos coeficientes, pero solo el nodo derecho de arriba se asemeja mejor que el resto a la función identidad.
- Concepción, Temperatura: El nodo derecho de abajo es el que más se asemeja a la función identidad de los datos observados y además presenta una buena correlación. Por otra parte, la línea de tendencia solo se ve bien representada en la última parte del periodo para todos los tipos de escalamiento.

En la tabla 5.1 se sintetizan los resultados para el escalamiento espacial:

Tabla 5.1: Selección de escalamiento espacial.

Estación	Precipitación	Temperatura
La Serena	Representado por N3	Representado por N4
Quinta Normal	Inverso de la distancia al cuadrado	Representado por N2
Concepción	Representado por N3	Representado por N2

A continuación, en las figuras 5.13 a 5.18, se presentan las líneas de tendencia de los datos simulados, correspondientes a los escalamientos espaciales seleccionados previamente.

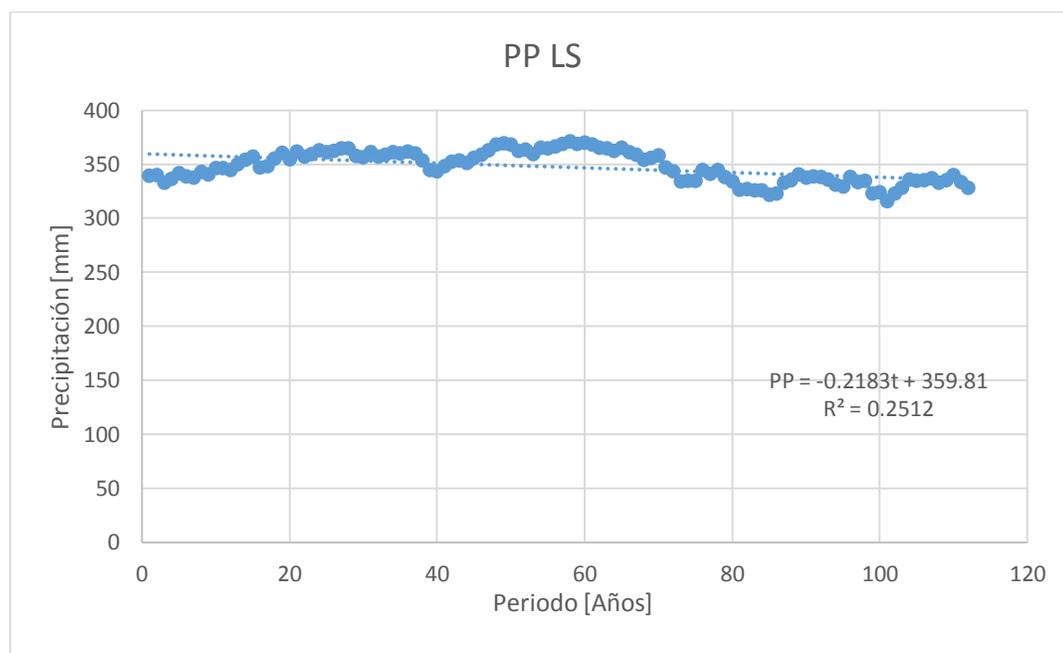


Figura 5.13: Línea de tendencia para precipitaciones simuladas en estación La Serena.

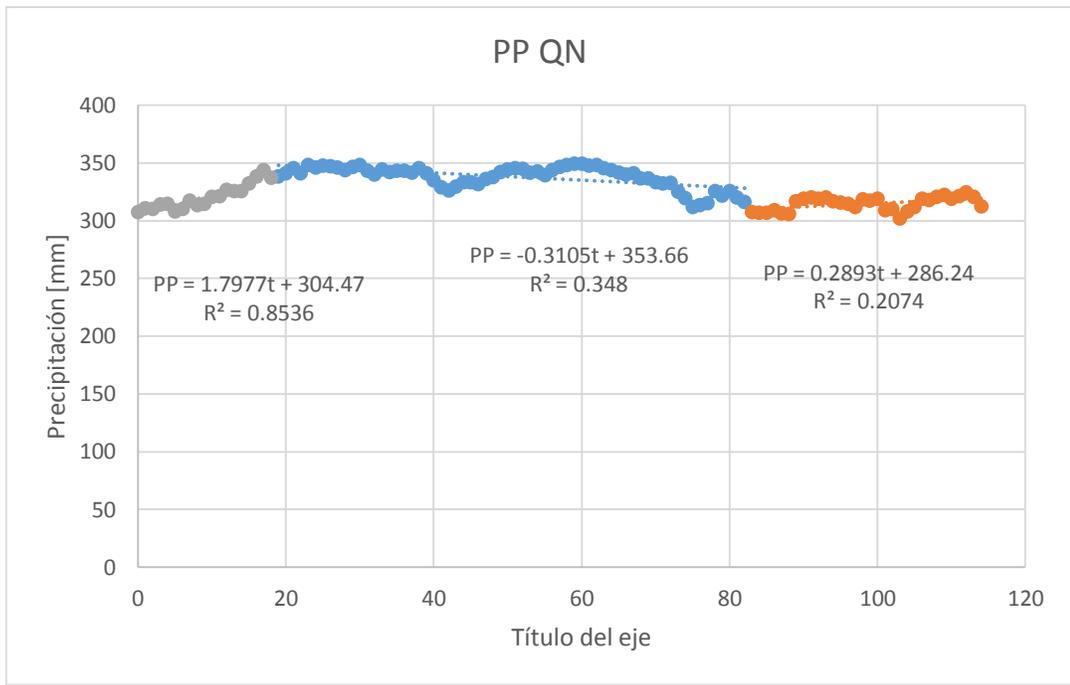


Figura 5.14: Línea de tendencia para precipitaciones simuladas en estación Quinta Normal.

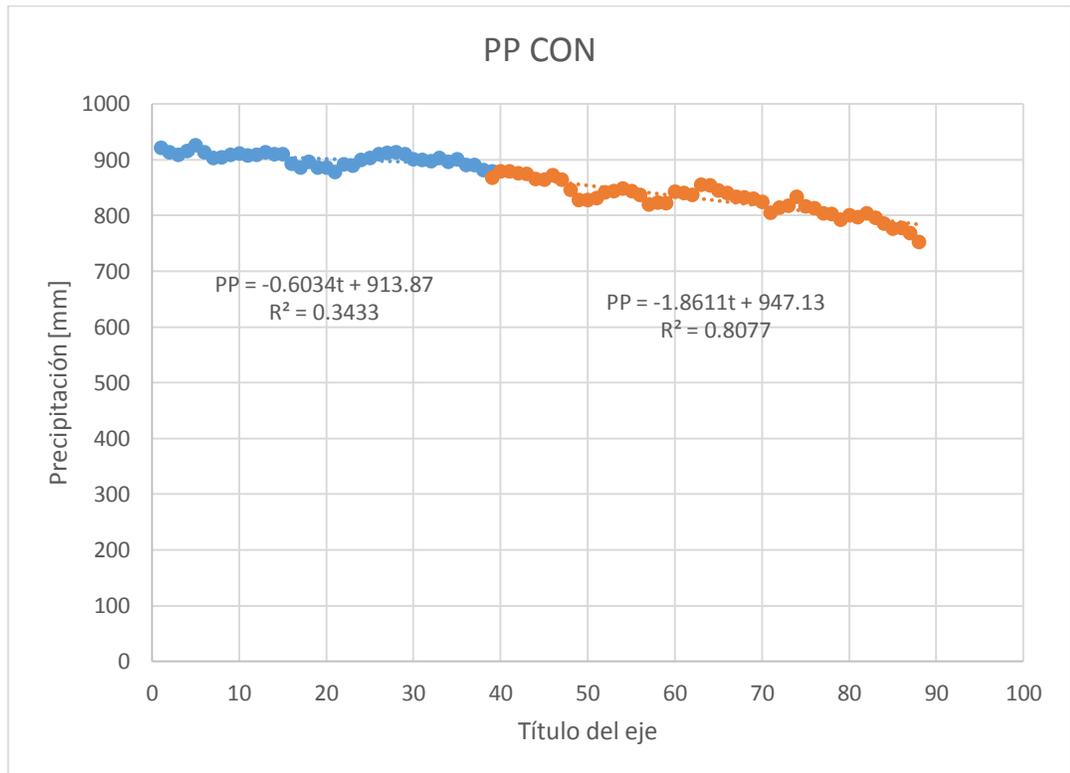


Figura 5.15: Línea de tendencia para precipitaciones simuladas en estación Concepción.

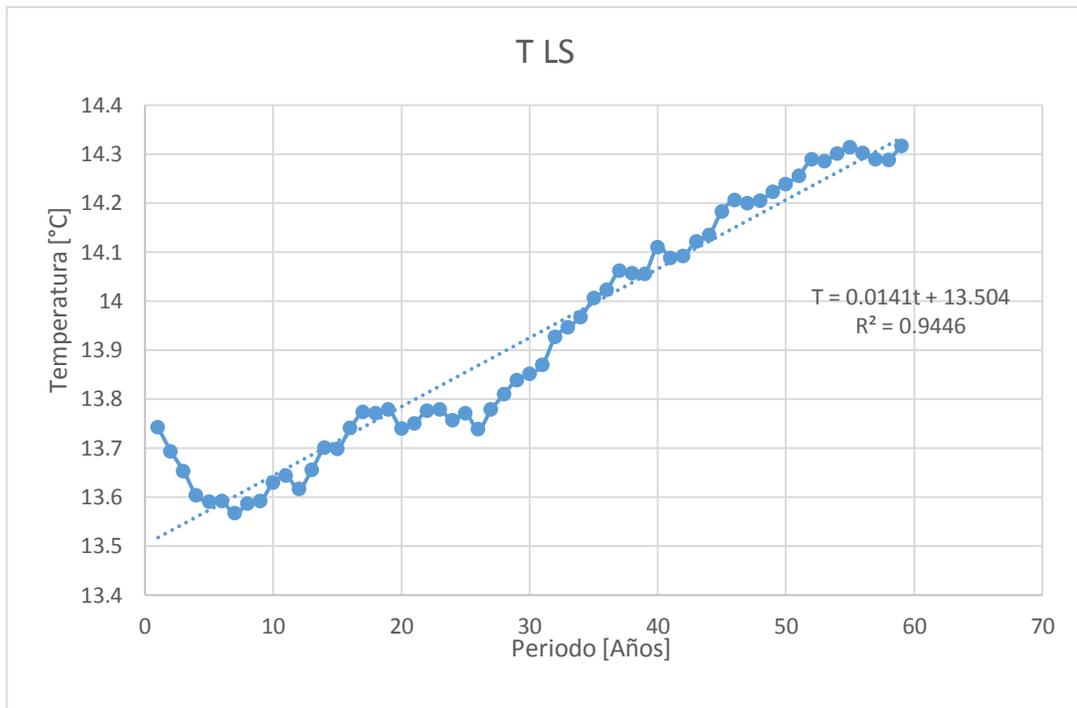


Figura 5.16: Línea de tendencia para temperaturas simuladas en estación La Serena.

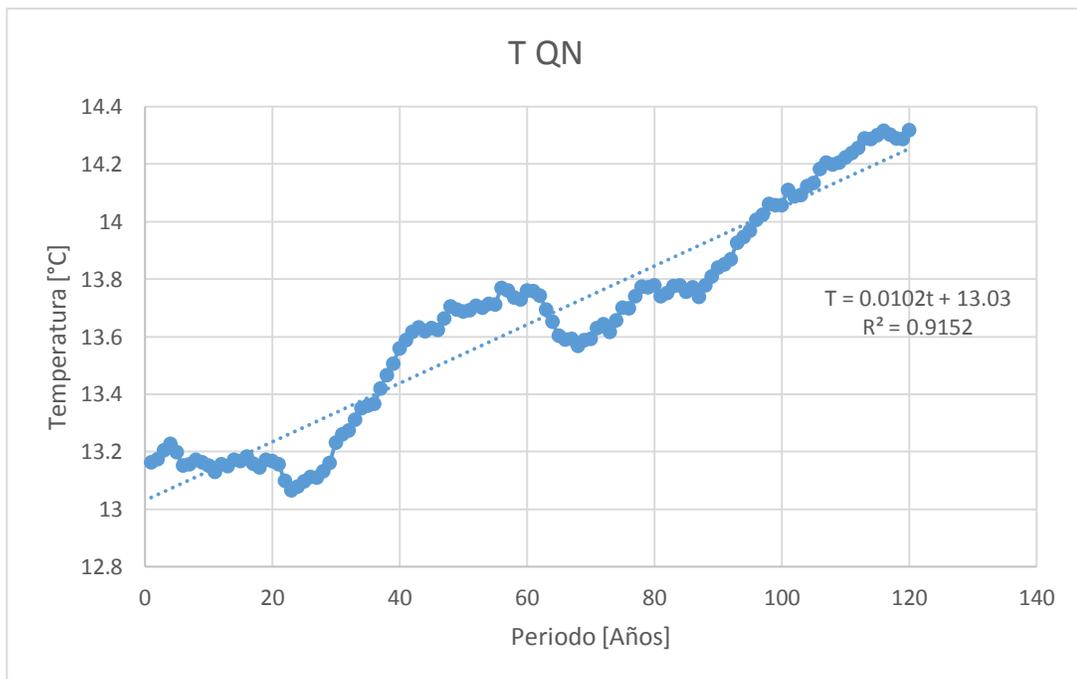


Figura 5.17: Línea de tendencia para temperaturas simuladas en estación La Serena.

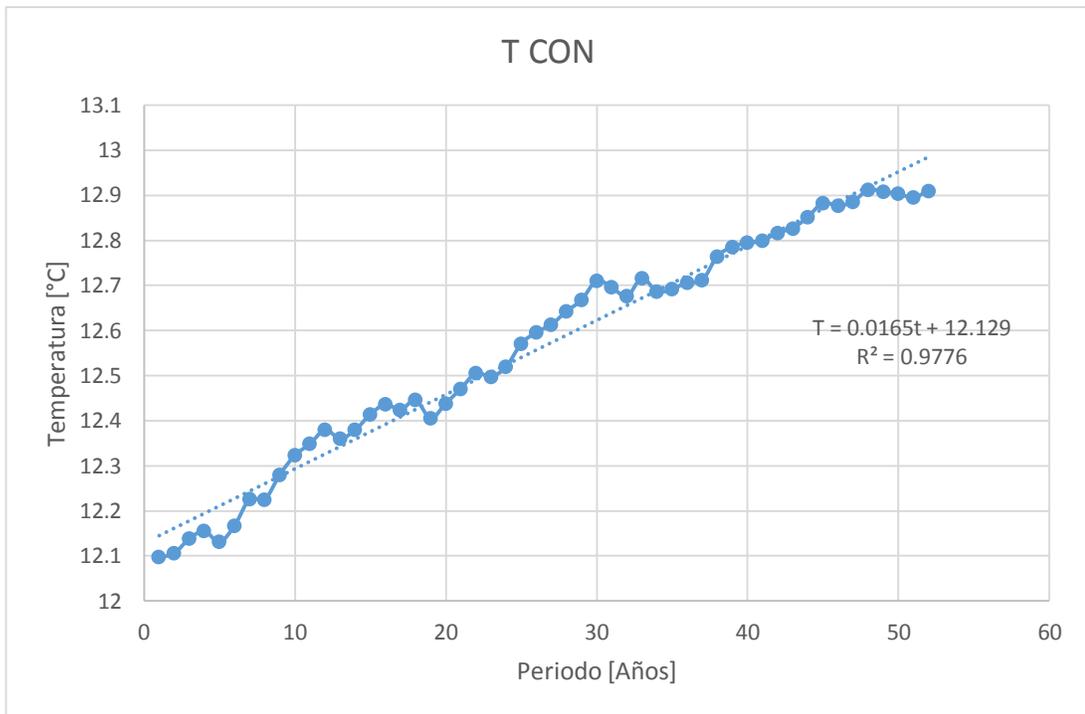


Figura 5.18: Línea de tendencia para temperaturas simuladas en estación La Serena.

5.3 Determinación de los periodos de calibración y validación para el método del cambio de variables

Es importante considerar en el análisis las posibles combinaciones de tendencias que se pueden dar en el futuro, razón por la cual se definen dos sub-periodos del periodo general de estudio. Se adoptan diferentes periodos de calibración y de validación, donde el periodo de calibración corresponde al periodo de línea base utilizado para elaborar las funciones de transferencia, y el periodo de validación corresponde al periodo en el que se desea realizar las proyecciones.

En base a esto se efectuaron algunos supuestos que se explicitan posteriormente, principalmente con el fin de evaluar que ocurre en climas donde se aprecia más de una tendencia en el periodo completo de estudio. Al analizar las tendencias que se tienen que para cada estación con su respectiva forzante meteorológica tanto para datos simulados como observados, se definen los siguientes periodos para cada estación:

- La Serena, Precipitación: Se analiza el caso de una tendencia única en todo el periodo de estudio, con lo cual la tendencia es la misma tanto en periodo de calibración como en el periodo de validación. Dicha tendencia es a la disminución de la precipitación tanto en datos simulados como observados, solo difieren la magnitud de la pendiente.
- Quinta Normal, Precipitación: Se reconocen tres periodos con tres tendencias, primer periodo con clara tendencia al aumento, segundo periodo con tendencia a la disminución y último periodo con tendencia al aumento. Se encuentran los mismos patrones en los datos simulados pero menos pronunciados, pues en el segundo periodo la tendencia es casi nula. Finalmente, se considera como periodo de calibración el tercer periodo, con lo que el periodo de validación corresponde a los dos primeros.
- Concepción, Precipitación: Se reconoce el primer periodo con tendencia casi nula tanto en datos simulados como observados, por lo que se supone periodo sin tendencia, y se consideró este como periodo de calibración, se realizó el escalamiento temporal de manera convencional en este periodo, aunque al aplicar la función de transferencia en el periodo de validación, se aplica el cambio de variables que considera tendencia, ya que el periodo de validación representa una clara tendencia en datos simulados y observados.
- La Serena, Temperatura: Se reconoce un primer periodo con tendencia a la disminución y un último periodo con aumento de tendencia en datos observados, pero los datos simulados solo presentan una tendencia al aumento por lo que, se considera como periodo de calibración el segundo. Los resultados de este análisis,

indican el error de suponer que el tipo de tendencia (al aumento o disminución) que presentan los datos de un MCG son consistentes con las series observadas, ya que claramente en esta estación el tipo de tendencia no coincide en el periodo de validación.

- Quinta Normal, Temperatura: Tanto en datos simulados como observados se observa una tendencia al aumento de la temperatura, con lo que se considera una única tendencia tanto para periodo de calibración como de validación.
- Concepción, Temperatura: Al igual que con la estación de La Serena en temperatura, se reconoce un primer periodo de tendencia a la disminución, y un segundo periodo de tendencia al aumento en los datos observados y una única tendencia en datos simulados. Con el fin de analizar la mayor cantidad de casos posibles, en este caso, se utiliza como periodo de calibración aquel donde existe tendencia a la disminución en los datos observados y tendencia al aumento en datos simulados. Esto permite cuantificar el error de utilizar las predicciones de MCG sabiendo que no se tiene el mismo tipo de tendencias (al aumento o disminución) que en datos observados.

Luego, el cuadro resumen de la Tabla 5.2, muestra las tendencias a utilizar en periodo de calibración y periodo de validación, para los datos observados en el periodo histórico.

Tabla 5.2: Periodos de calibración y validación para cada estación

Estación – FM*	Periodo de Calibración		Periodo de Validación	
	Duración del periodo	Tipo de Tendencia	Duración del periodo	Tipo de Tendencia
La Serena - PP	1869-1920	Disminución	1920-2005	Disminución
Quinta Normal - PP	1961-2005	Aumento	1866-1961	Aum-Dism
Concepción - PP	1892-1943	Sin Tendencia	1943-2005	Disminución
La Serena - T	1968-2005	Aumento	1922-1968	Disminución
Quinta Normal - T	1954-2005	Aumento	1861-1954	Aumento
Concepción - T	1929-1973	Disminución	1973-2005	Aumento

*Forzante Meteorológica

De esta forma, se pueden analizar múltiples casos según sea la situación, incluso se abarca un caso en el que no se tiene tendencia, lo que resulta atractivo tomando en cuenta lo que se ha realizado en los últimos estudios en Chile, ya que generalmente al realizar el escalamiento estadístico, se supone que el clima es estacionario.

CAPÍTULO VI: CORRECCIÓN DE SESGO.

En este capítulo, se busca principalmente elaborar la función transferencia, ya que al aplicar esta función al periodo de validación se podrá comprobar la efectividad de la metodología planteada en este estudio.

6.1 Método del cambio de variables:

Como se señaló anteriormente, este procedimiento considera el efecto de la no estacionariedad, para lo cual resulta necesario elaborar series sin tendencias, en función de las tendencias que presenta cada serie observada. El principio detrás de esto es esencialmente un cambio de variables. Para proceder es necesario determinar cuáles son las tendencias a utilizar para cada serie, estas se muestran en las Tablas 6.1 y 6.2.

Tabla 6.1: Líneas de tendencia, periodos de calibración y validación para cada estación de series observadas.

Estación – FM*	Periodo de Calibración	Periodo de Validación
La Serena - PP	$PP(t) = -0,7813t + 157,1$	$PP(t) = -0,7813t + -157,1$
Q. Normal - PP	$PP(t) = -1,9719t + 122,6$	$PP(t) = -4,7945t + -332,3$ $PP(t) = -1,2304t + -410,2$
Concepción - PP	<i>Sin Tendencia</i>	$PP(t) = -5,2837t + 1530,4$
La Serena - T	$T(t) = -0,0130t + 13,134$	$T(t) = -0,0407t + 14,722$
Q. Normal - T	$T(t) = -0,0069t + 13,755$	$T(t) = -0,0069t + 13,755$
Concepción - T	$T(t) = -0,0223t + 12,783$	$T(t) = -0,0255t + 11,284$

*Forzante Meteorológica

Tabla 6.2: Líneas de tendencia, periodos de calibración y validación para cada estación de series simuladas.

Estación – FM*	Periodo de Calibración	Periodo de Validación
La Serena - PP	$PP(t) = -0,2183t + 359,8$	$PP(t) = -0,2183t + -359,8$
Quinta Normal - PP	$PP(t) = -0,2893t + 286,2$	$PP(t) = -1,7977t + -304,5$ $PP(t) = -0,3105t + -353,7$
Concepción - PP	<i>Sin Tendencia</i>	$PP(t) = -1,8611t + -947,1$
La Serena - T	$T(t) = -0,0141t + 13,504$	$T(t) = -0,0141t + 13,504$
Quinta Normal - T	$T(t) = -0,0102t + 13,030$	$T(t) = -0,0102t + 13,030$
Concepción - T	$T(t) = -0,0165t + 12,129$	$T(t) = -0,0165t + 12,129$

*Forzante Meteorológica

Aplicando el cambio de variables indicado en la metodología, el cual consiste en sustraer la función de tendencia a las series, se obtienen las series sin tendencia, estas se muestran en las figuras 6.1 a 6.6.

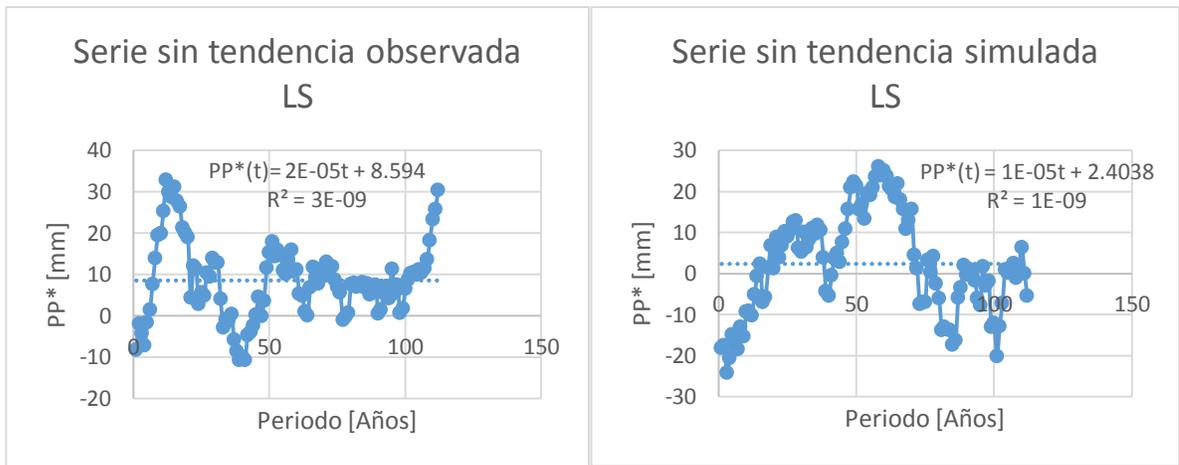


Figura 6.1: Series de precipitación sin tendencia en estación La Serena.

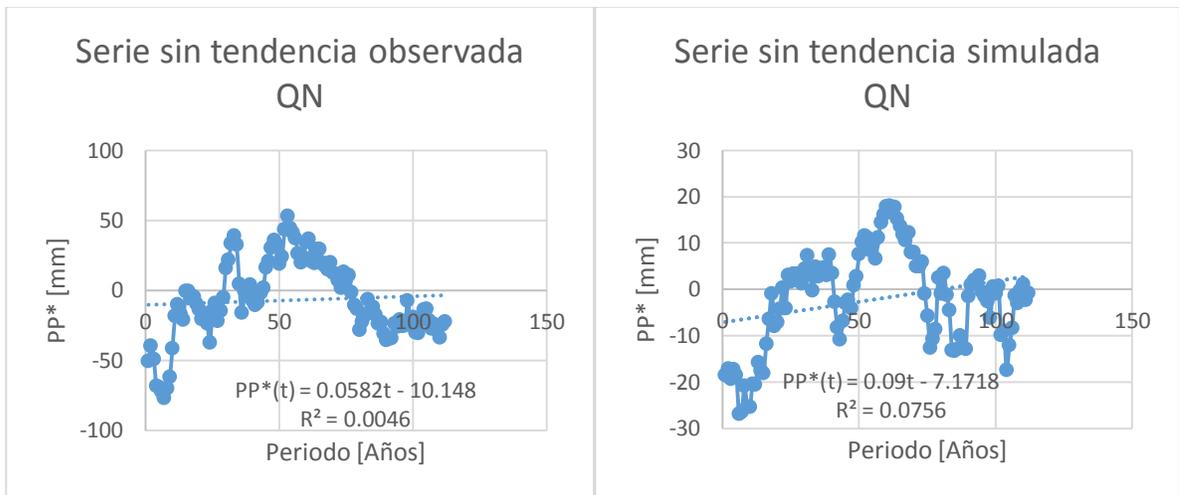


Figura 6.2: Series de precipitación sin tendencia en estación Quinta Normal.

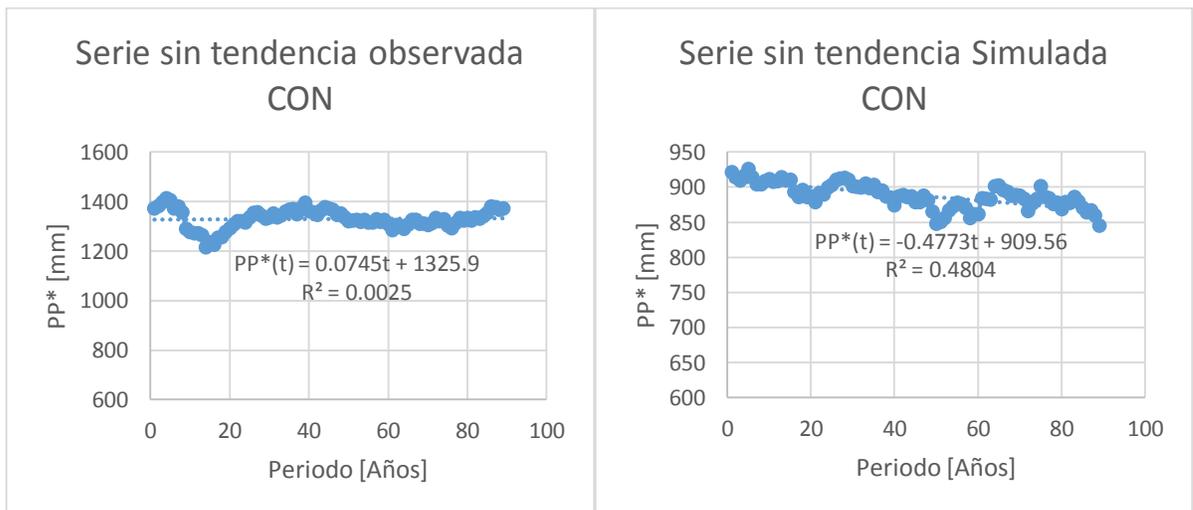


Figura 6.3: Series de precipitación sin tendencia en estación Concepción.

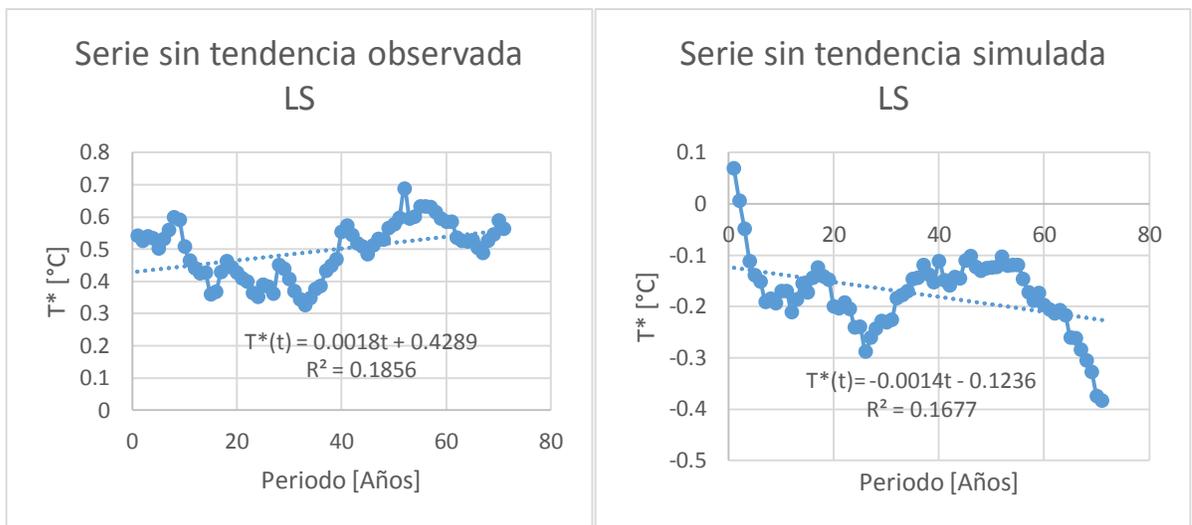


Figura 6.4: Series de temperatura sin tendencia en estación La Serena.

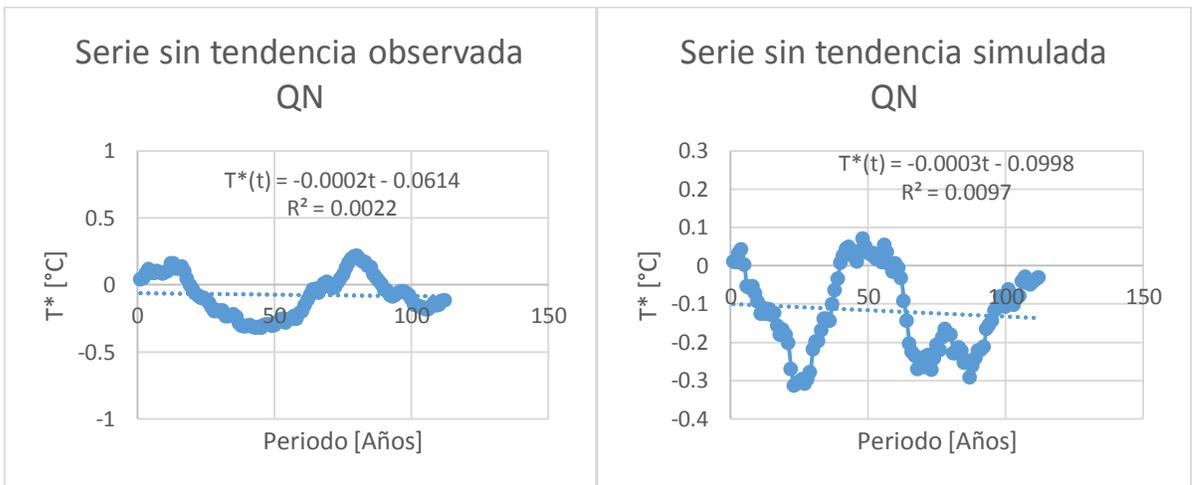


Figura 6.5: Series de temperatura sin tendencia en estación Quinta Normal.

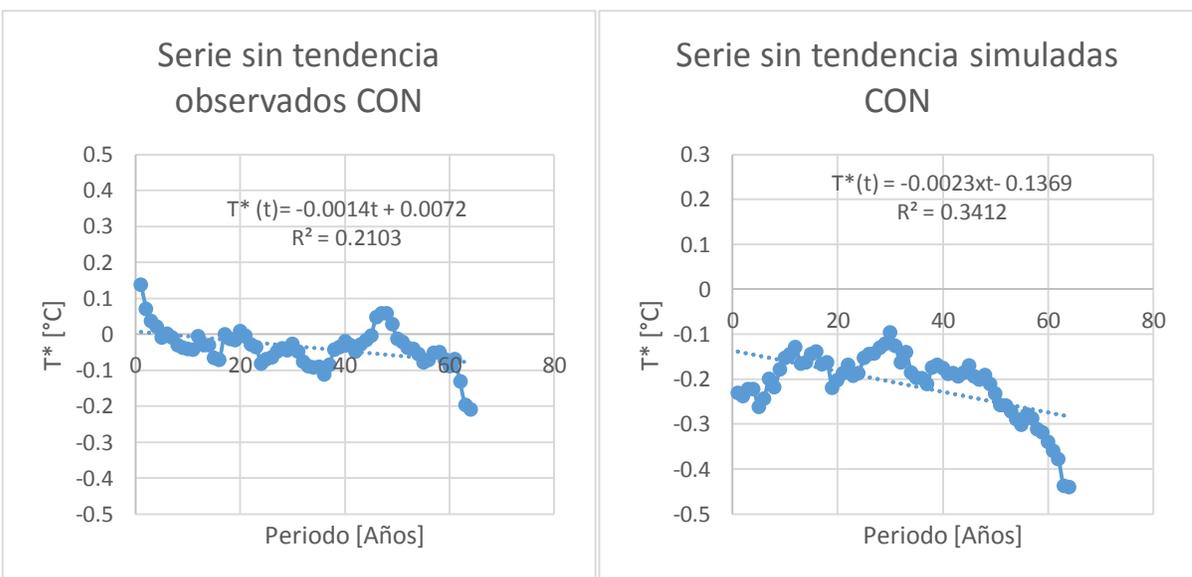


Figura 6.6: Series de temperatura sin tendencia en estación Concepción.

Como es posible observar, las series presentan una disminución de entre uno y dos órdenes de magnitud en la pendiente de las líneas de tendencia, con lo cual se puede trabajar bajo el supuesto de estacionariedad. Es relevante aclarar que en la ordenada se indica la variable con “*” debido a la transformación utilizada para eliminar la tendencia. Luego de aplicar la corrección de sesgo a las series, se obtuvieron las funciones transferencias para cada caso, las cuales se presentan en las figuras 6.7 a 6.12.

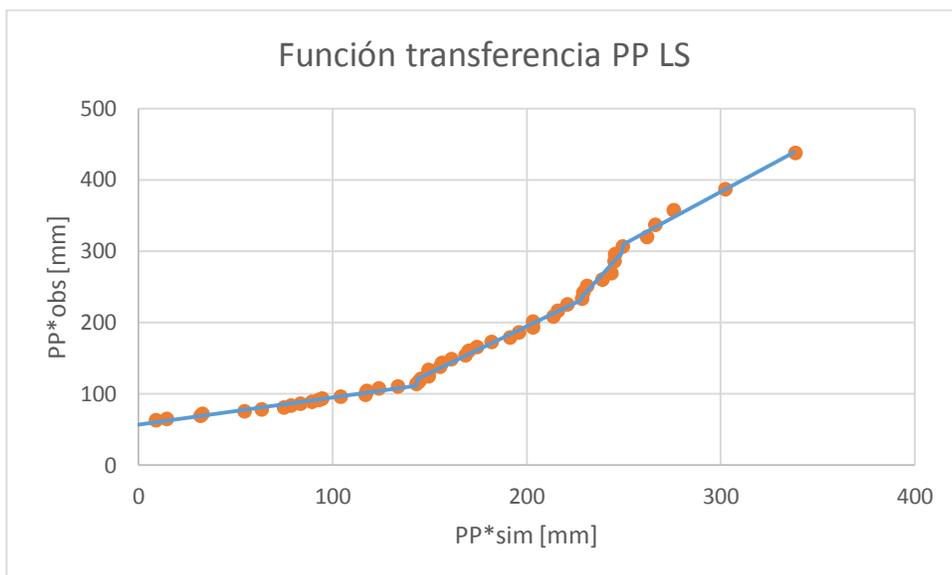


Figura 6.7: Función transferencia para serie de precipitación sin tendencia en estación La Serena.

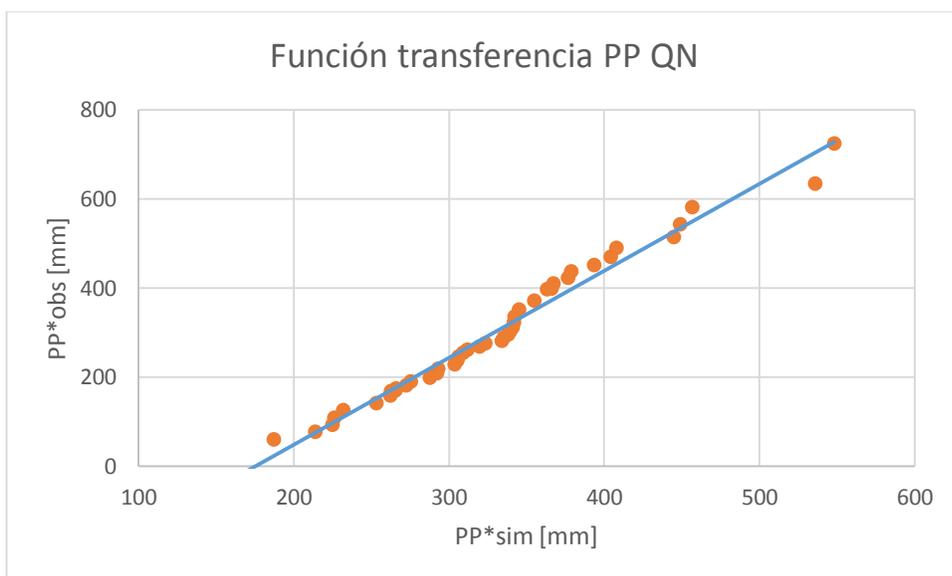


Figura 6.8: Función transferencia para serie de precipitación sin tendencia en estación Quinta Normal.

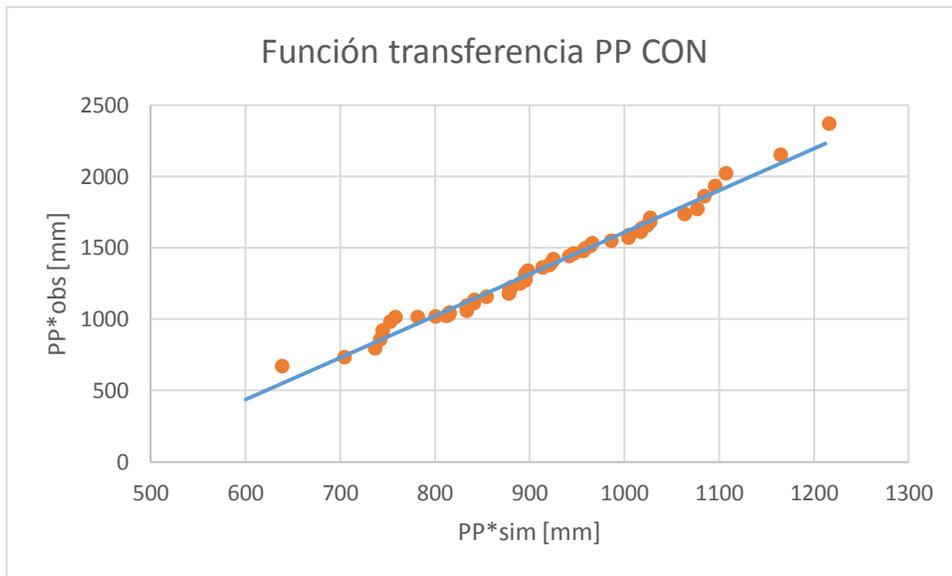


Figura 6.9: Función transferencia para serie de precipitación sin tendencia en estación Concepción.

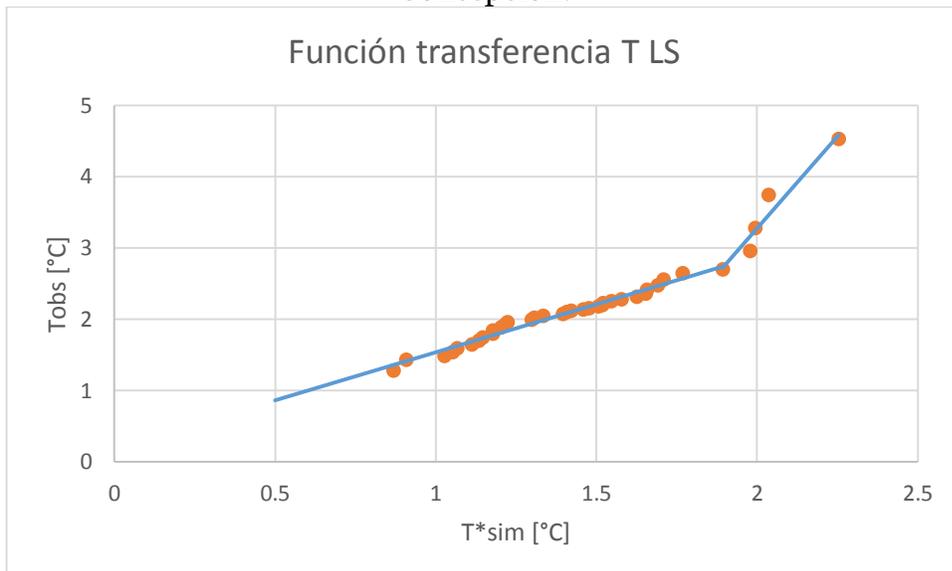


Figura 6.10: Función transferencia para serie de Temperatura sin tendencia en estación La Serena.

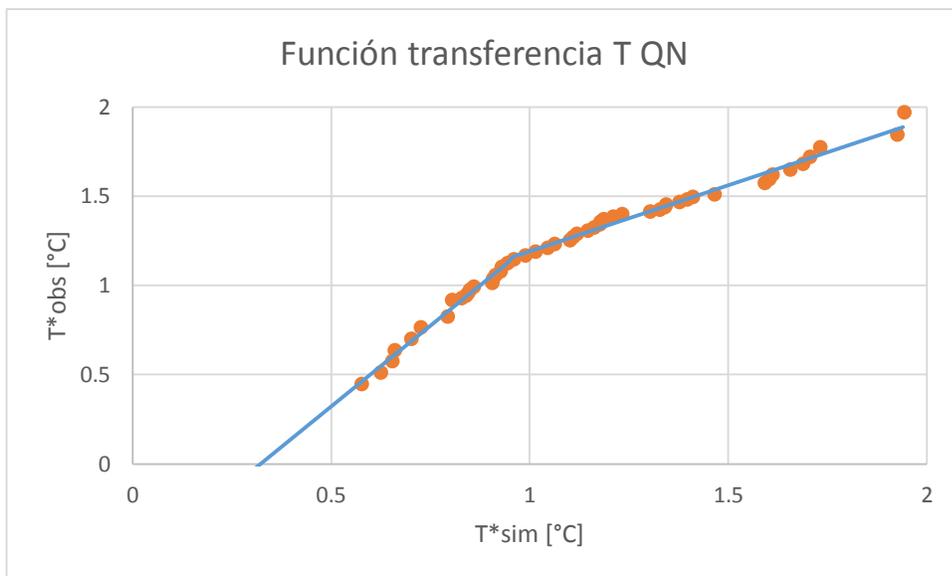


Figura 6.11: Función transferencia para serie de Temperatura sin tendencia en estación Quinta Normal.

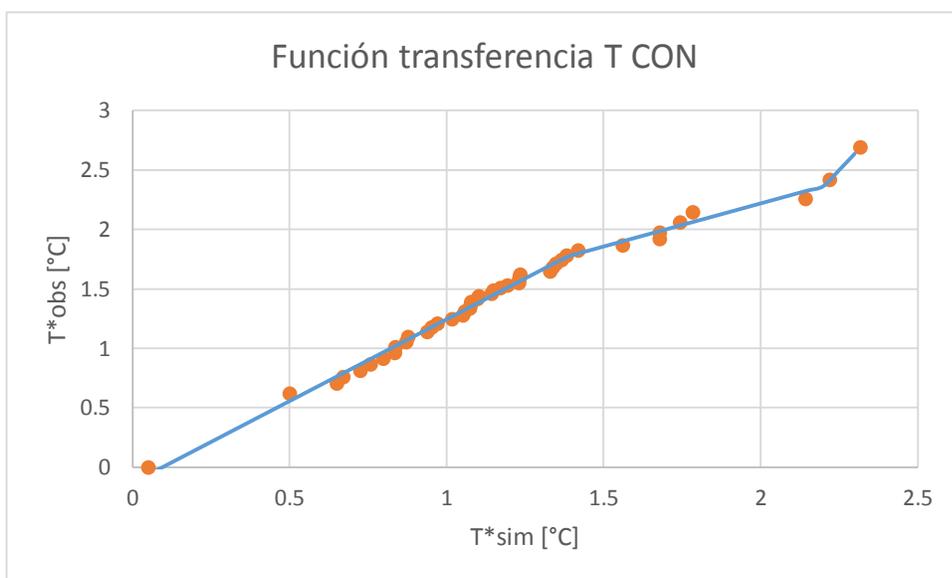


Figura 6.12: Función transferencia para serie de Temperatura sin tendencia en estación Concepción.

Una vez definida las funciones de transferencia, es posible extrapolar los valores simulados del periodo de calibración hacia el periodo de validación, donde es necesario deshacer el cambio de variables en función de las tendencias utilizadas en las tablas 6.1.1 y 6.1.2. Cabe aclarar que las funciones transferencia se ajustaron a funciones lineales por tramo.

6.2 Método de la medida de la incertidumbre:

Al aplicar este método se busca cuantificar el error que se comete al considerar la estacionareidad del clima, el procedimiento consiste en realizar la corrección de sesgo de forma regular a distintos sub-periodos del periodo de calibración, para este caso se consideran periodos de 50 años separados cada 10 años, lo que tiene como resultado un conjunto de funciones transferencia. Por otro lado se tomara en cuenta como periodo de validación un solo sub-periodo de 50 años, ya que para validar el método es necesario aplicar la función transferencia, en este caso el conjunto de funciones transferencia a dicho periodo.

La manera de proceder se distingue del otro método, ya que se requieren observaciones de larga data para obtener suficientes funciones transferencia a la hora de construir el conjunto de funciones transferencia. Por lo anterior, las estaciones de La Serena y Concepción no se analizaron para el caso de la temperatura, por otra parte, se necesitan periodos exactos de 50 o 30 años, con lo que quedan fuera aquellos años de información que no alcancen a abarcar una diferencia de 10 años de información entre un sub-periodo y otro. Los periodos de calibración y validación adoptados se presentan en la tabla 6.3

Tabla 6.3: Periodos de calibración y validación para cada estación.

Estación – FM*	Periodo de Calibración	Periodo de Validación
La Serena - PP	1875-1955	1955-2005
Quinta Normal - PP	1925-2005	1875-1925
Concepción - PP	1945-2005	1895-1945
Quinta Normal - T	1865-1955	1955-2005

*Forzante Meteorológica

La idea de contar con periodos de validación al principio y/o al final del periodo completo de análisis, permite identificar qué sub-periodos influyen más en el aumento de la incertidumbre. Además se cuenta con periodos de observaciones del mismo tamaño, solo difieren en la cantidad de sub-periodos, con lo que también se puede cuantificar el efecto de incorporar más sub-periodos al análisis.

Luego, al elaborar las funciones transferencias, se obtienen los conjuntos para cada estación, los resultados se muestran en las figuras 6.13 a 6.16.

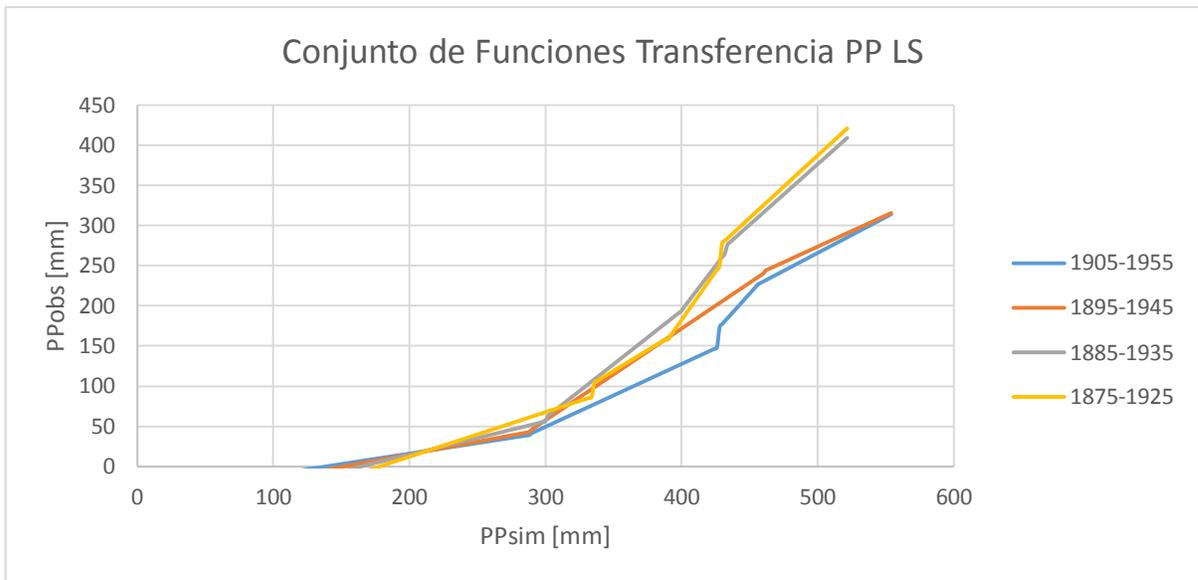


Figura 6.13: Conjunto de funciones transferencia para medida de la incertidumbre, precipitación estación en La Serena.

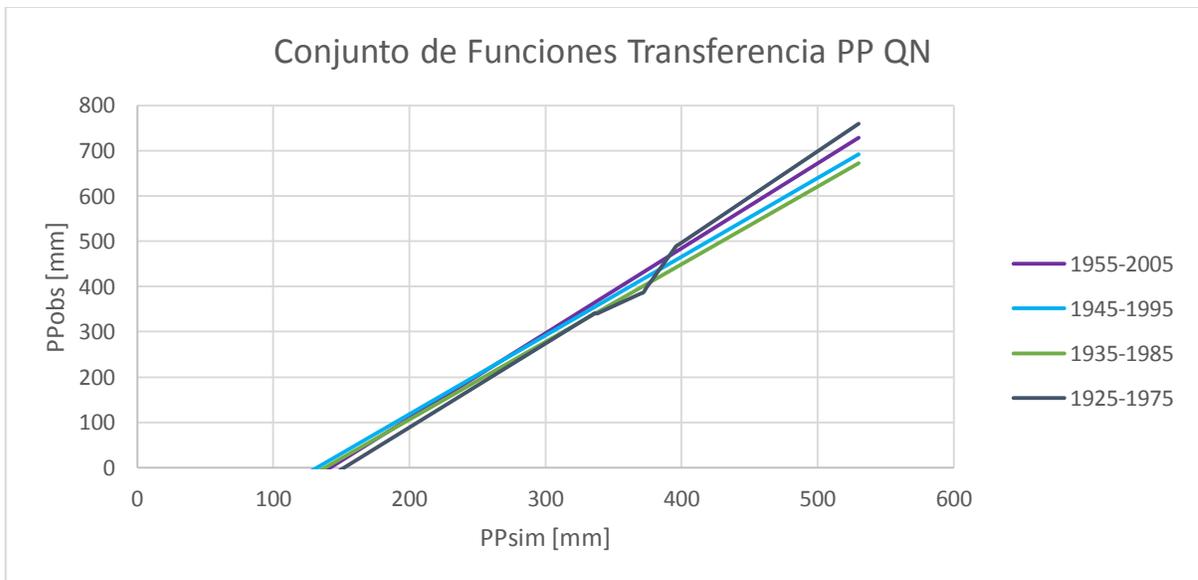


Figura 6.14: Conjunto de funciones transferencia para medida de la incertidumbre, precipitación en estación Quinta Normal.

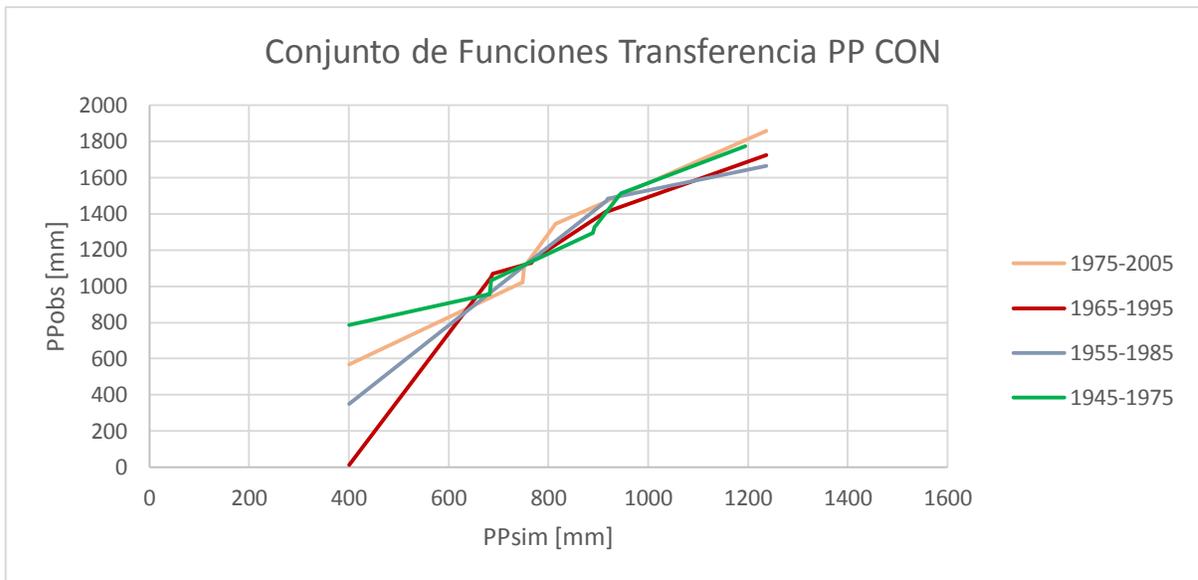


Figura 6.15: Conjunto de funciones transferencia para medida de la incertidumbre, precipitación en estación Concepción.

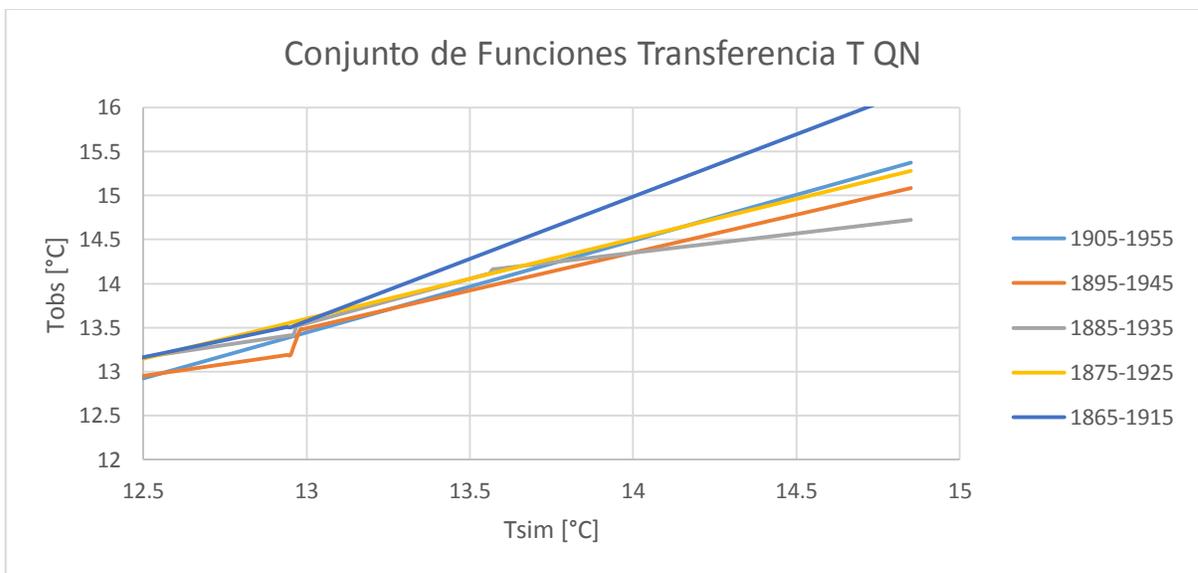


Figura 6.16: Conjunto de funciones transferencia para medida de la incertidumbre, temperatura en estación Quinta Normal.

Observando las funciones de transferencia que se obtienen al aplicar la corrección de sesgo, es posible inferir que a medida que se acercan a los valores extremos, aumenta la incertidumbre. Además, al extender el análisis e incorporar más sub-periodos, también se puede observar que aumenta la incertidumbre. Es relevante agregar que para el caso de la estación Concepción, no se cuenta con mucha información por lo que se utilizaron sub-periodos de 30 años. Finalmente, para completar el análisis, es necesario extender los resultados al periodo de validación.

CAPÍTULO VII: VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA.

Para finalizar el proceso planteado, es necesario validar los resultados obtenidos del escalamiento temporal, lo cual se realiza directamente comparando dichos resultados con las series observadas correspondientes al periodo de validación propuesto en el método del cambio de variables y el método de cuantificación de la incertidumbre. Principalmente se busca encontrar coherencia entre las simulaciones y las observaciones que a su vez consideren el efecto de la no estacionariedad.

7.1 Método del cambio de variables:

Al ya tener construidas las funciones transferencias, se aplica el cambio variables sobre las series simuladas correspondientes al periodo de validación, obteniéndose un nuevo set de datos sin tendencia sobre el cual se aplica la función transferencia. Además, se debe tener en cuenta que las series de datos simulados y observados pueden mostrar distintas tendencias, por lo que para validar resultados se trabajó bajo el supuesto de que las pendientes son proporcionales entre el modelo y los datos observados en ambos periodos, es decir:

$$\frac{m_{PO,obs}}{m_{PO,sim}} = \frac{m_{PV,obs}}{m_{PV,sim}}$$

Donde:

$m_{PO,obs}$: Es la pendiente de la línea de tendencia de la serie observada en periodo de calibración

$m_{PO,sim}$: Es la pendiente de la línea de tendencia de la serie simulada en periodo de calibración

$m_{PV,obs}$: Es la pendiente de la línea de tendencia de la serie observada en periodo de validación, es decir la pendiente con la que se desea deshacer el cambio de variables.

$m_{PV,sim}$: Es la pendiente de la línea de tendencia de la serie simulada en periodo de validación.

Por otra parte, una vez aplicada la función de transferencia sobre la serie simulada sin tendencia, es necesario deshacer el cambio de variables mediante la relación que supone que las pendientes de las tendencias tanto de datos simulados como observados son proporcionales tanto en el periodo de calibración como el periodo de simulación. Una vez restituidos los datos a su tendencia correspondiente según la pendiente indicada anteriormente, se grafican los casos con su respectiva serie observada, tal cual se muestra en las figuras 7. 1 a 7.6.

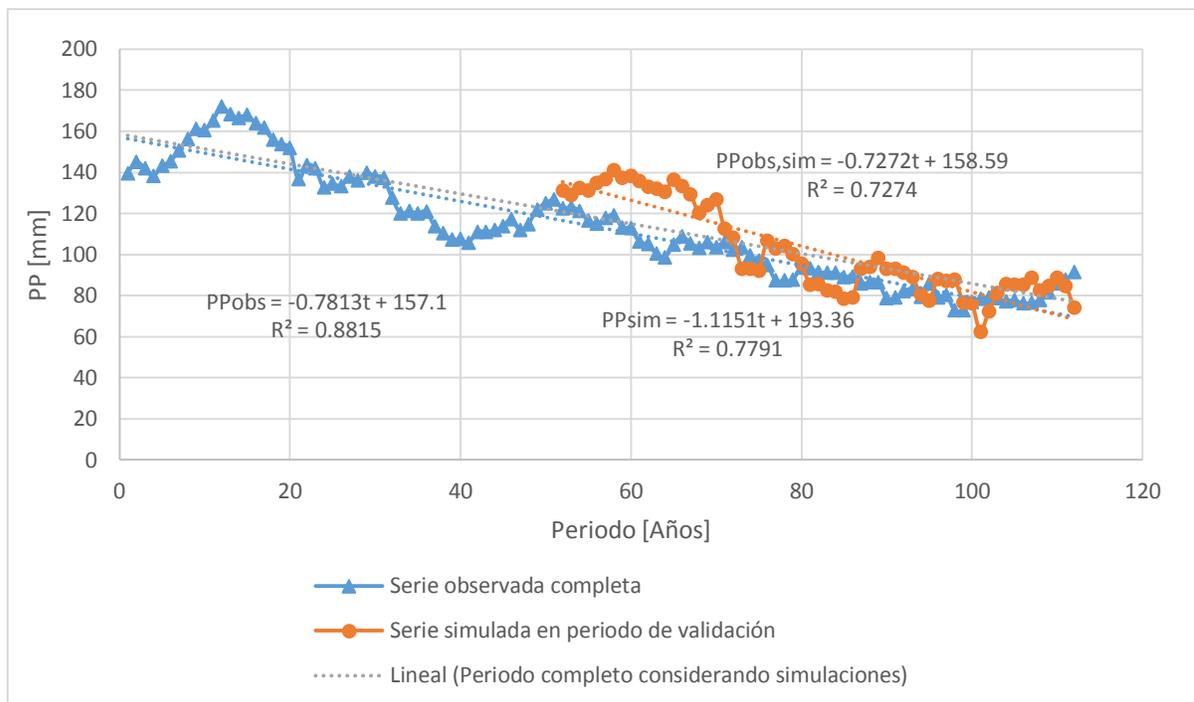


Figura 7.1: Comparación de serie simulada y observada de precipitaciones anuales para periodos de calibración y validación en estación La Serena.

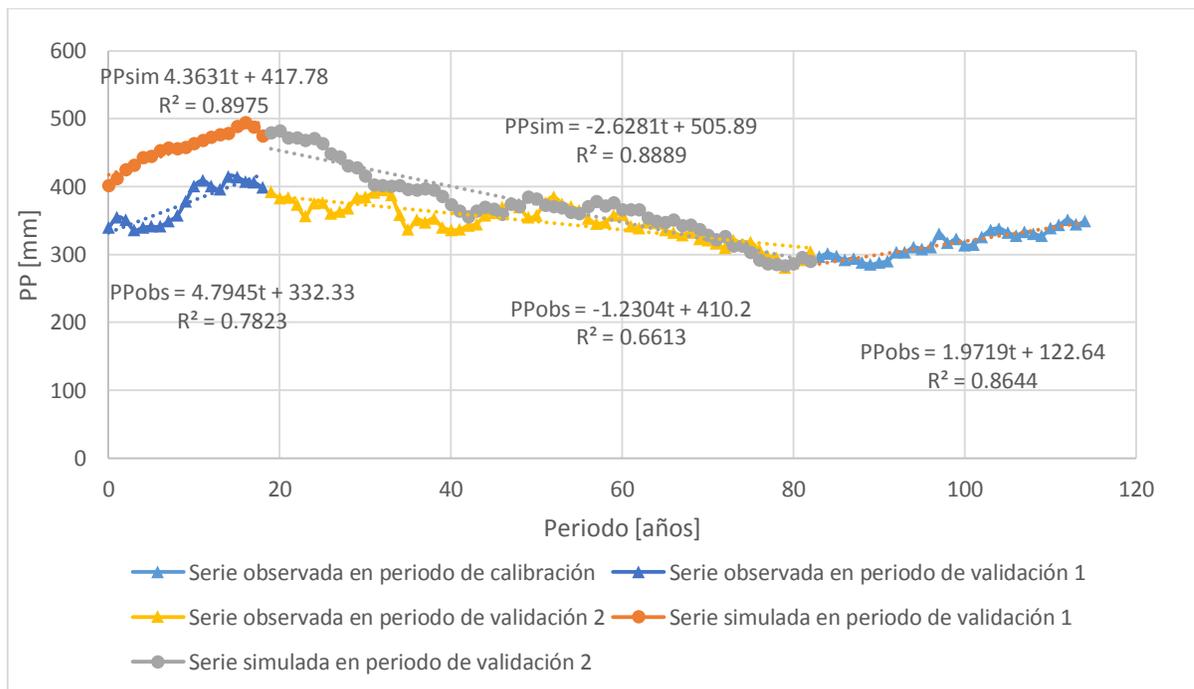


Figura 7.2: Comparación de serie simulada y observada de precipitaciones anuales para periodos de calibración y validación en estación Quinta Normal.

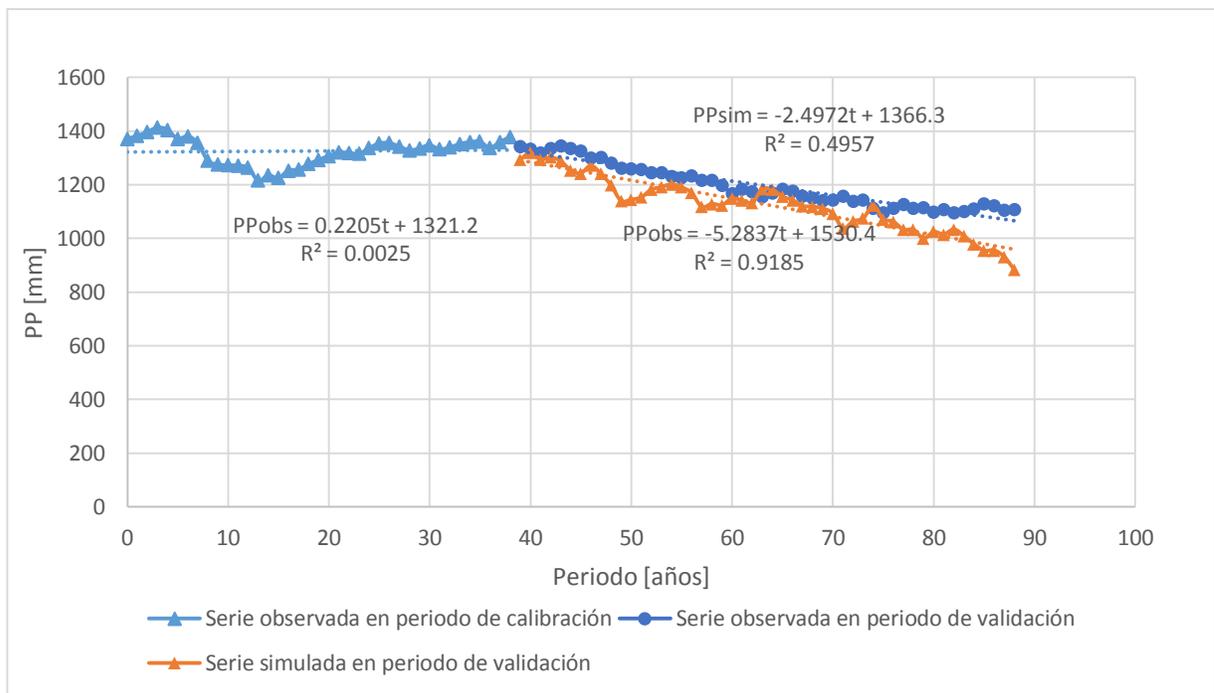


Figura 7.3: Comparación de serie simulada y observada de precipitaciones anuales para periodos de calibración y validación en estación Concepción.

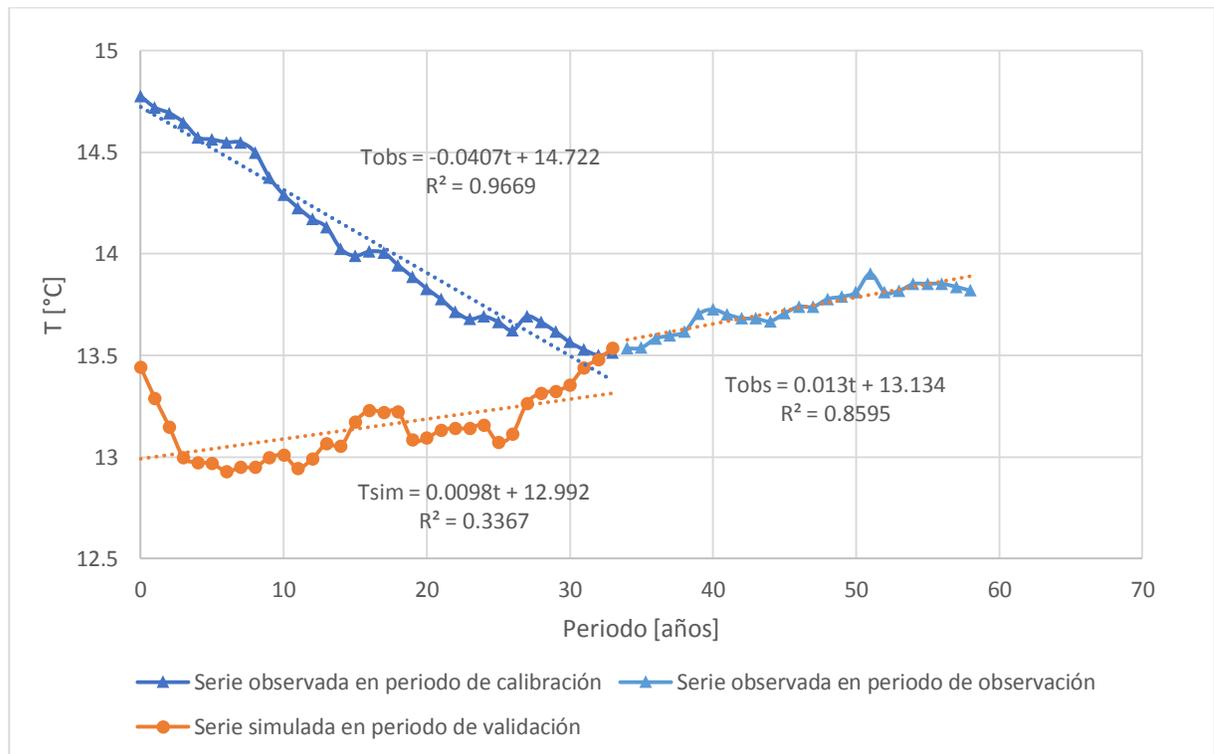


Figura 7.4: Comparación de serie simulada y observada de temperatura para periodos de calibración y validación en estación La Serena.

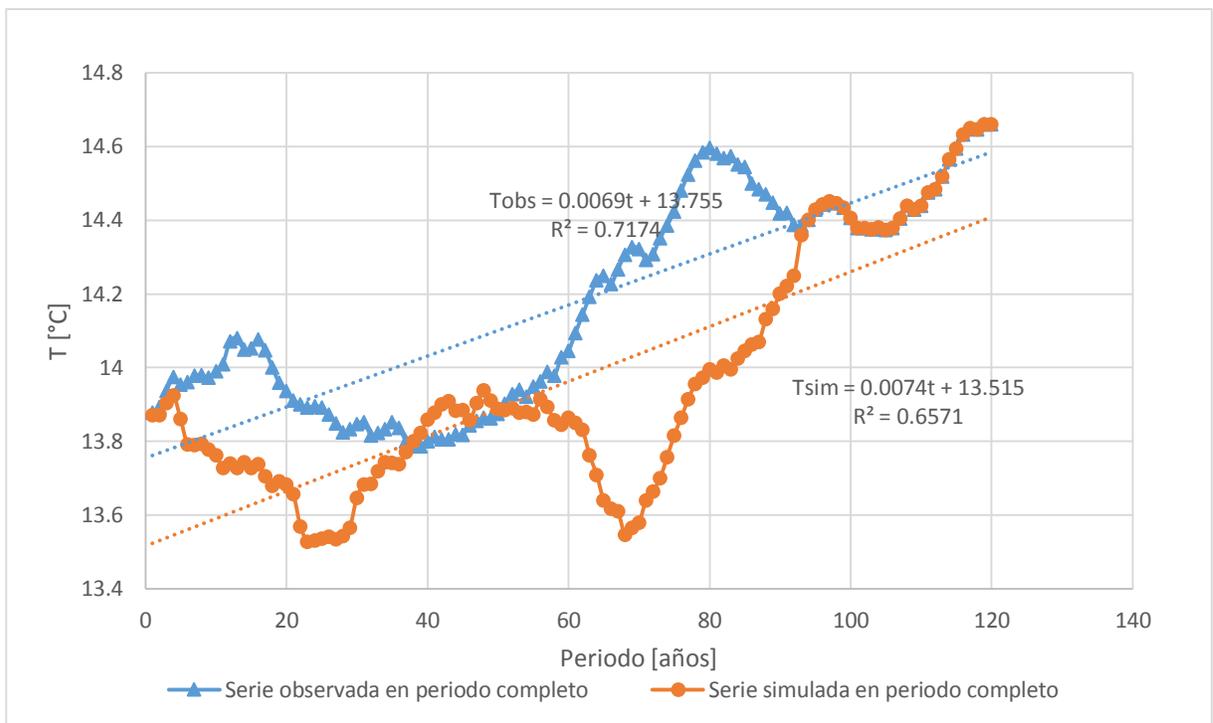


Figura 7.5: Comparación de serie simulada y observada de temperatura para periodos de calibración y validación en estación Quinta Normal.

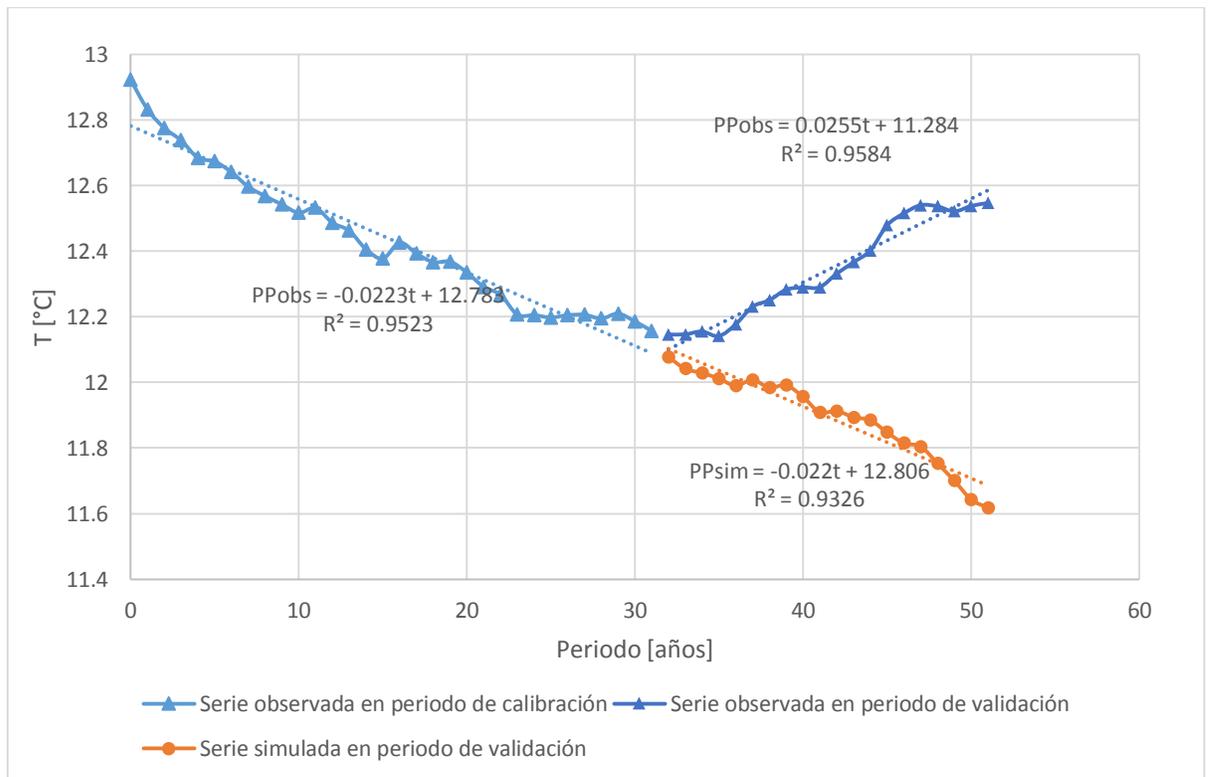


Figura 7.6: Comparación de serie simulada y observada de temperatura para periodos de calibración y validación en estación Concepción.

Como es posible distinguir, en aquellas series en que se tiene una sola tendencia tanto para el periodo de calibración como para el periodo de validación, la tendencia se analiza a nivel del periodo completo. Por otro lado para estaciones con distintas tendencias en periodo de validación y de calibración, las tendencias se analizan por separado.

Principalmente se tiene que para aquellas estaciones que representan tendencias similares tanto en las series observadas como simuladas, la metodología logra reproducir el efecto de la no estacionariedad en el escalamiento, no así para aquellas series en las que no existía coherencia entre lo observado y lo simulado. Además, los valores de las rectas asociadas a las líneas de tendencias de series simuladas y observadas en periodo de validación, presentan pequeñas incongruencias, las que se deben principalmente al hecho de que la simulación no es del todo certera, es decir para algunos casos se logra reproducir la pendiente casi a la perfección, pero el coeficiente de posición varía, en otros casos, las pendientes no son similares, pero si representan correctamente el tipo de tendencia, ya sea a la disminución o al aumento de la forzante meteorológica en el lugar de estudio. Las Tablas 7.1 y 7.2 muestran los parámetros importantes a evaluar para validar los resultados obtenidos, ya sea en el tipo de tendencia, calidad de la tendencia y la similitud que existe entre líneas de tendencia asociadas al periodo de validación de series simuladas y observadas, es decir si los valores de la pendiente y el coeficiente de posición de la línea de tendencia son consistentes entre series.

Tabla 7.1: Valor de parámetros asociados a líneas de tendencias para series simuladas.

Estación – FM*	Tipo de Tendencia			
	en periodo de validación	R²	m**	n
La Serena – PP	Disminución	0,73	0,727	158,6
Q. Normal – PP	Aumento-	0,90	4,363	417,8
	Disminución	0,89	2,628	505,9
Concepción – PP	Disminución	0,50	2,497	1366,3
La Serena – T	Aumento	0,34	0,010	13,13
Q. Normal – T	Aumento	0,66	0,007	13,52
Concepción - T	Disminución	0,93	0,022	12,81

*Forzante Meteorológica

**Se muestra en valor absoluto, ya que el tipo de tendencia indica su signo.

Tabla 7.2: Valor de parámetros asociados a líneas de tendencias para series observadas.

Estación – FM*	Tipo de Tendencia en periodo de calibración	Tipo de Tendencia en periodo de validación	m**	n
La Serena – PP	Disminución	Disminución	0,781	157,1
Q. Normal – PP	Aumento- Disminución	Aumento- Disminución	4,795 1,230	332,3 410,2
Concepción – PP	Sin tendencia	Disminución	5,284	1530,4
La Serena – T	Aumento	Disminución	0,041	14,72
Q. Normal – T	Aumento	Aumento	0,007	13,76
Concepción - T	Disminución	Aumento	0,026	11,28

*Forzante Meteorológica

**Se muestra en valor absoluto, ya que el tipo de tendencia indica su signo.

Con el fin de determinar la validez de la metodología planteada, es que se elabora una tabla que resume si se cumplieron los parámetros asociados a las series simuladas según lo esperado en base a las series observadas. También se muestra el porcentaje de acierto en el valor de la pendiente y el coeficiente de posición, lo que permite comparar las series simuladas con las reales observadas. Los resultados se muestran en la tabla 7.3.

Tabla 7.3: Comparación de parámetros asociados a líneas de tendencias de series simuladas y observadas.

Estación – FM	Mismo tipo de tendencia	R²>0,5	Δm%	Δn%
La Serena – PP	Si	Si	6,9%	0,9%
Q. Normal – PP	Si	Si	8,9%	25,7%
Concepción – PP	Si	Si	113,5%	23,3%
La Serena – T	No	No	52,7%	10,7%
Q. Normal – T	Si	Si	75,9%	10,8%
Concepción - T	No	Si	7,2%	1,7%
			13,7%	13,6%

*Forzante Meteorológica

La certeza estos resultados es evaluada en el capítulo de análisis de resultados, donde se explica su procedencia y la validez de la metodología misma. Como se definió en la metodología, se realizan los análisis considerando la pendiente de la línea de tendencia de la serie simulada en periodo de validación para deshacer el cambio de variables.

De forma adicional y con intención de analizar qué casos se adecuan de mejor manera a las series observadas del periodo de validación, también se analizará el caso en que la pendiente de los datos observados es equivalente a la pendiente de datos simulados en periodo de validación, es decir:

$$m_{PV,obs} = m_{PV,sim}$$

Cabe destacar que se tienen dos eventualidades especiales:

- Estación Concepción, precipitación: Debido a la estacionariedad en el periodo de calibración, el cálculo de la pendiente del análisis anterior, resulta ser la misma pendiente $m_{PV,obs} = m_{PV,sim}$, razón por la cual se realizará este análisis alternativo realizando el escalamiento temporal tradicional sin cambio de variables, esto aprovechando que la función transferencia es equivalente para ambos métodos debido a la estacionariedad en el periodo de calibración.
- Estación La Serena, temperatura: No se analiza un caso extra, ya que debido a la similitud de las tendencias de series simuladas y observadas en periodo de calibración, se estaría analizando el mismo caso.

Luego, el análisis se realiza para las estaciones Quinta Normal y Concepción, y solo para precipitación en la estación La Serena. Los resultados se presentan en las figuras 7.7 a 7.11.

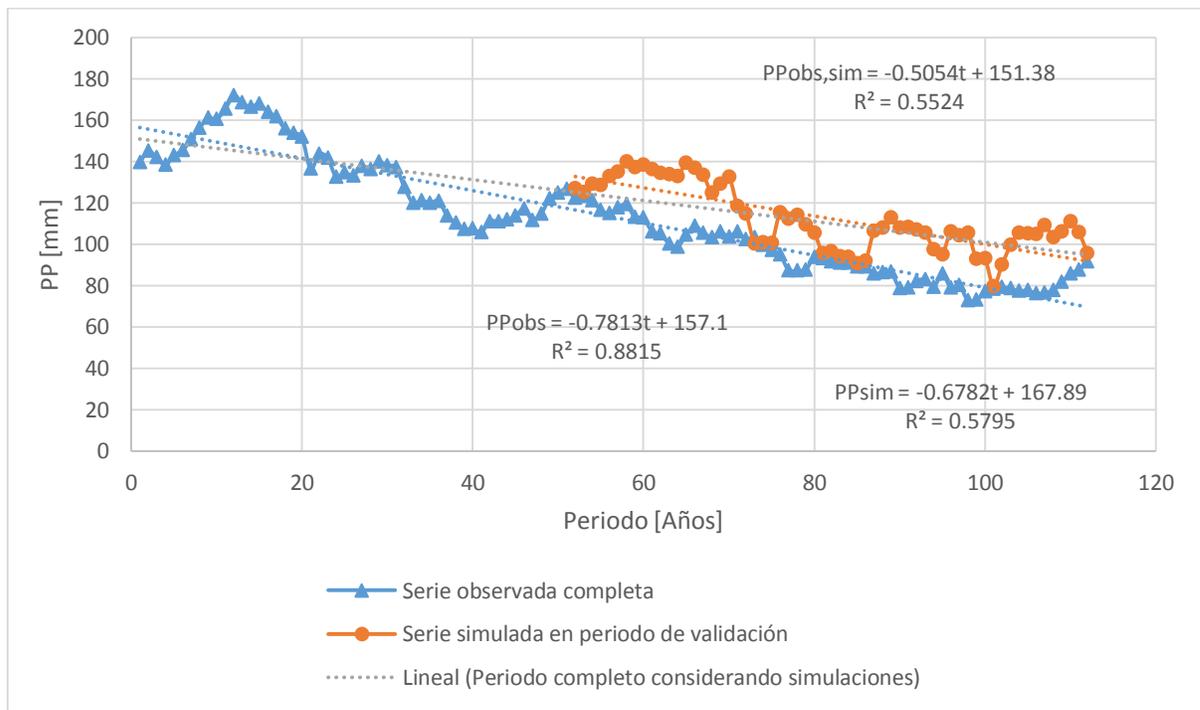


Figura 7.7: Comparación de serie simulada con pendiente alternativa serie y observada de precipitaciones anuales para periodos de calibración y validación en estación La Serena.

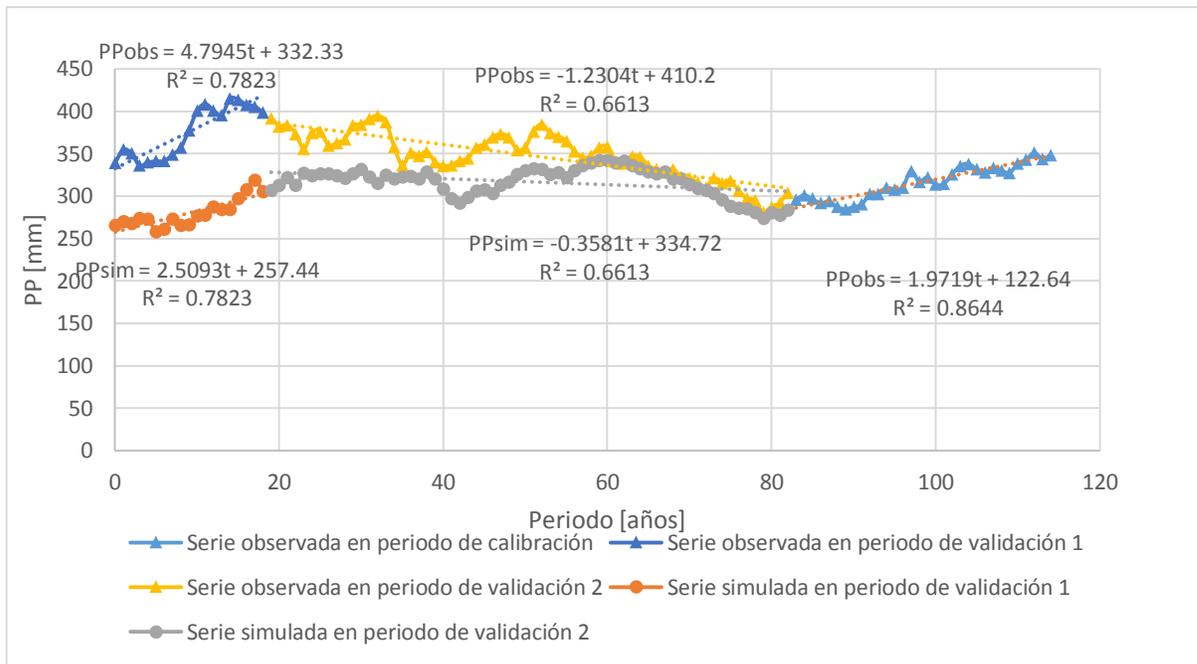


Figura 7.8: Comparación de serie simulada con pendiente alternativa y serie observada de precipitaciones anuales para periodos de calibración y validación en estación Quinta Normal.

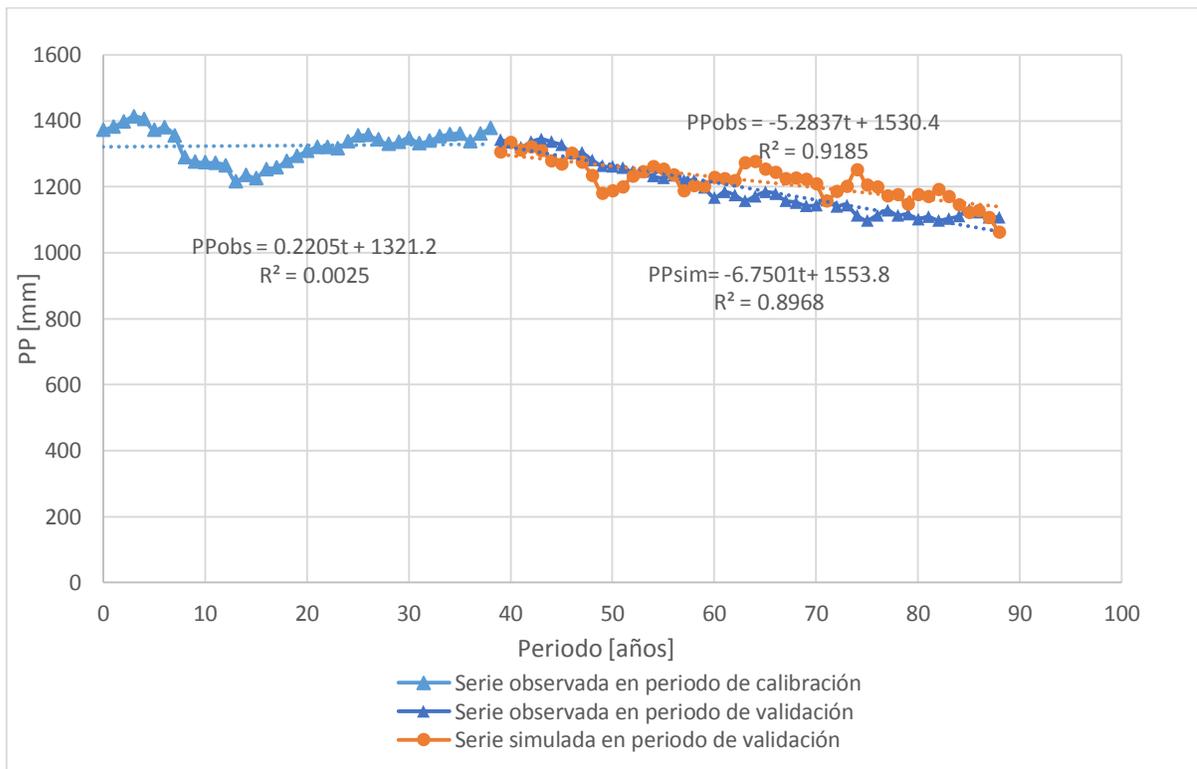


Figura 7.9: Comparación de serie simulada con pendiente alternativa y serie observada de precipitaciones anuales para periodos de calibración y validación en estación Concepción.

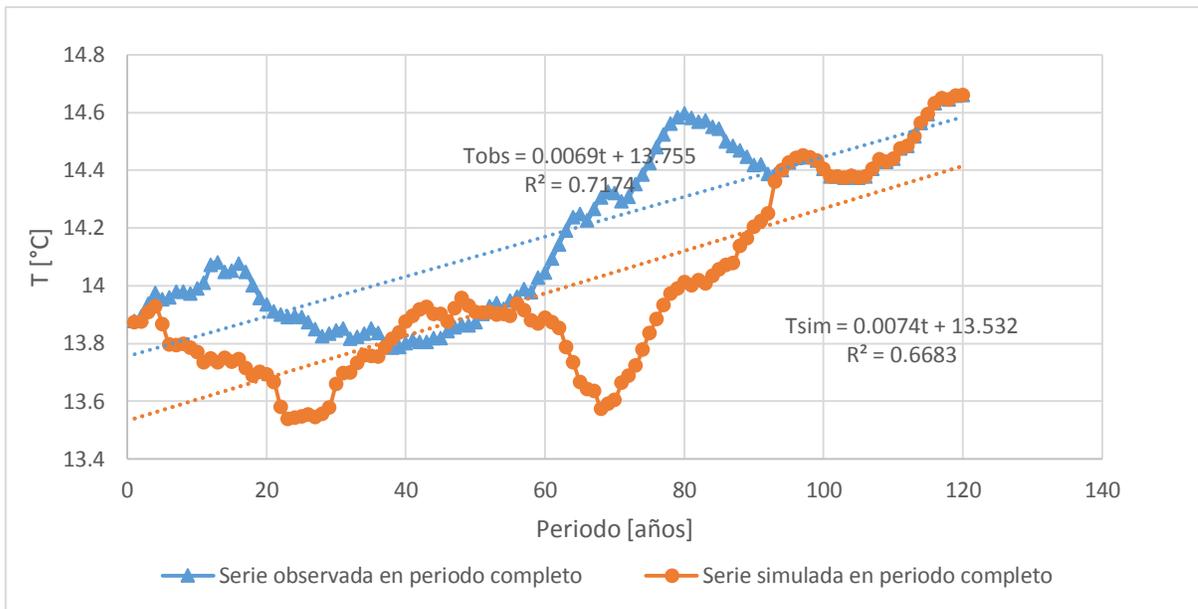


Figura 7.10: Comparación de serie simulada con pendiente alternativa y serie observada de temperatura para periodos de calibración y validación en estación Quinta Normal.

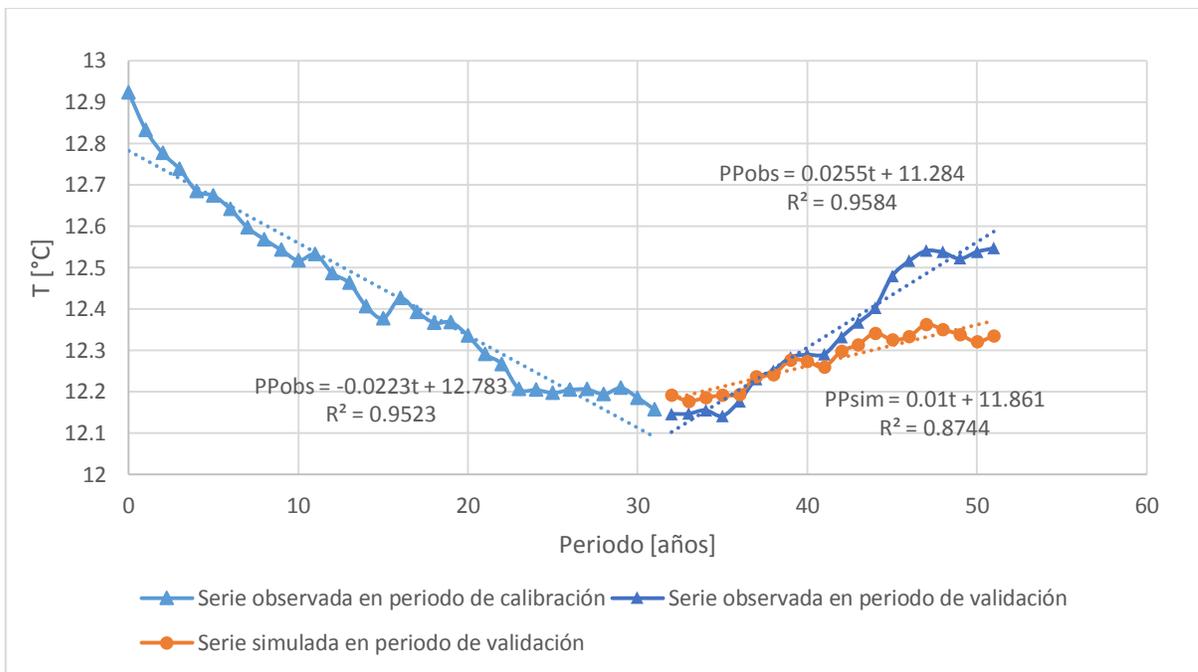


Figura 7.11: Comparación de serie simulada con pendiente alternativa y serie observada de temperatura para periodos de calibración y validación en estación Concepción.

Realizando el mismo análisis para el caso en que se deshace el cambio de variable con las pendientes proporcionales en periodos de calibración y validación para series simuladas y observadas, es que se comparan los parámetros asociados a las líneas de tendencia pero considerando las pendientes alternativas, los resultados asociados al valor de los parámetros se muestran en la Tabla 7.4.

Tabla 7.4: Valor de parámetros asociados a líneas de tendencias para series simuladas con pendiente alternativa.

Estación – FM*	Tipo de Tendencia en periodo de validación	R²	m**	n
La Serena – PP	Disminución	0,55	0,505	151,4
Q. Normal – PP	Aumento- Disminución	0,78	2,509	257,4
Concepción – PP	Disminución	0,66	0,358	334,7
Q. Normal – T	Aumento	0,90	6,750	1553,8
Concepción - T	Aumento	0,67	0,007	13,53
		0,87	0,010	11,86

*Forzante Meteorológica

Los resultados correspondientes a la comparación de los parámetros en base a las series observadas se muestran en la Tabla 7.5:

Tabla 7.5: Comparación de parámetros asociados a líneas de tendencias de series simuladas con pendiente alternativa y series observadas.

Estación – FM*	Mismo tipo de tendencia	R²>0,5	Δm%	Δn%
La Serena – PP	Si	Si	35,3%	3,6%
Q. Normal – PP	Si	Si	47,6%	22,5%
	Si	Si	70,8%	18,4%
Concepción – PP	Si	Si	27,7%	1,5%
Quinta Normal – T	Si	Si	7,2%	1,6%
Concepción - T	Si	Si	60,7%	5,1%

*Forzante Meteorológica

Definitivamente se puede aseverar que en algunos casos, las series obtenidas resultan más acertadas al utilizar la pendiente alternativa, en otros casos simplemente no existe relación alguna con ninguno de las dos pendientes, y en otros la línea de tendencia real pareciera ser que se asemeja en algunos parámetros a alguna de las dos soluciones. Por otro lado también es relevante el hecho de que las soluciones nunca son iguales si se utilizan distintas pendientes. Un estudio más exhaustivo se realiza en el capítulo de análisis de resultados.

7.2 Método de la medida de la incertidumbre:

Para cuantificar la incertidumbre se requiere elaborar el conjunto de funciones transferencia definido por las curvas de todos los sub-periodos del periodo de calibración. Para efectos prácticos, dicho conjunto se definió como conjunto transferencia (CT). La forma de escalar los datos simulados correspondientes al periodo de validación consiste básicamente en asignar un valor aleatorio con distribución de probabilidad uniforme, que esté comprendido en el intervalo descrito por el CT asociado a un único valor simulado.

Debido a la baja cantidad de información en algunas estaciones, no se realizó este procedimiento para dichas estaciones, de esta forma los CT obtenidos para las estaciones La Serena (precipitación), Quinta Normal (precipitación y temperatura) y Concepción (precipitación) se muestran en las figuras 7.12 a 7.15.

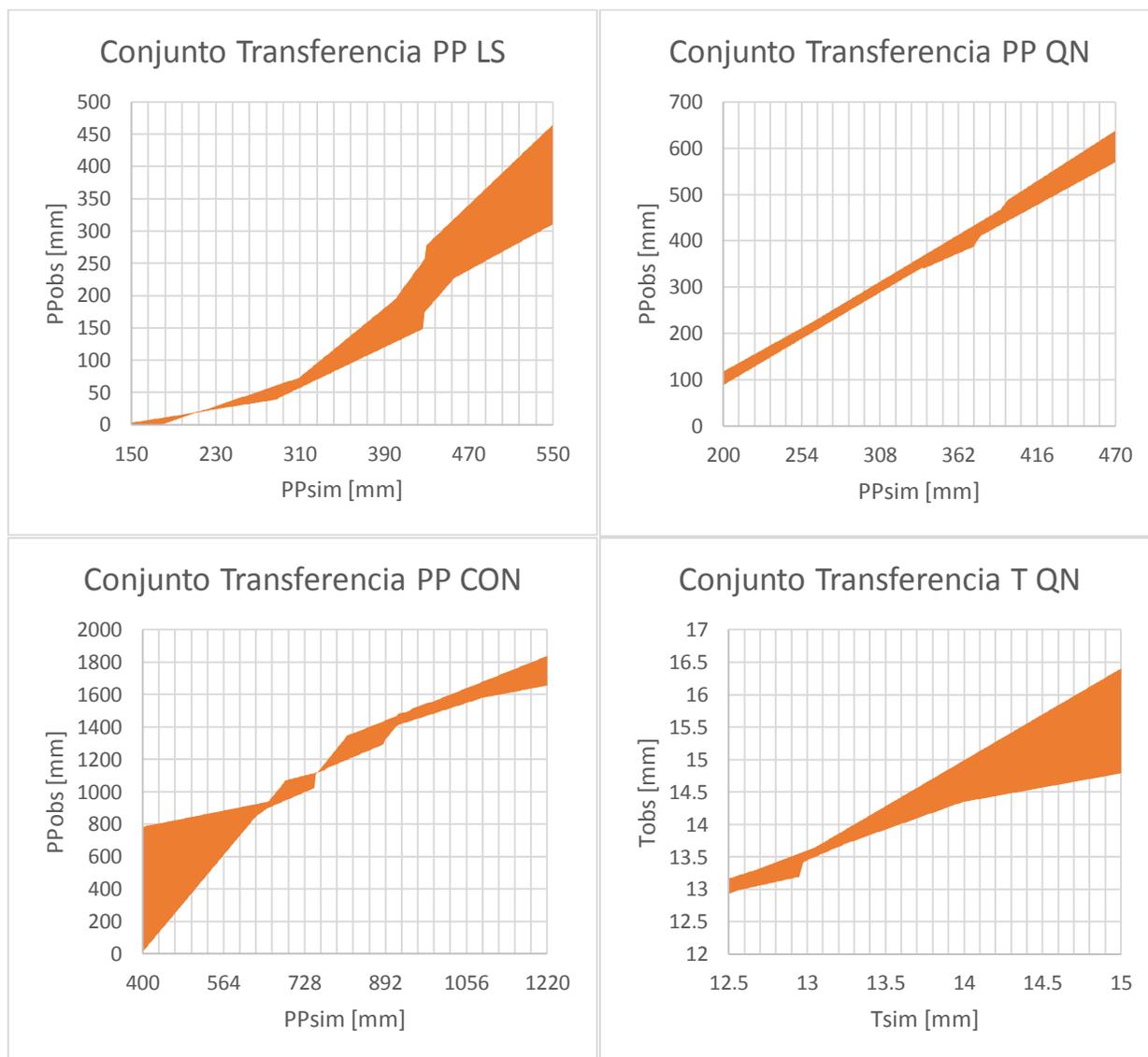


Figura 7.12: Conjunto Transferencia para cada estación y su respectiva variable.

Ya contruidos los CT, se procede a realizar las 100 simulaciones para cada caso, las cuales determinan un conjunto de posibles valores en los cual se encontrará la serie predictor, es decir, los valores máximos y mínimos de las 100 simulaciones para cada dato simulado, determinarán dicho rango. Se espera que este conjunto no esté tan alejado de los valores reales, los cuales se grafican en la misma figura con el fin de evaluar la precisión de la metodología. Los resultados se muestran en las figuras 7.16 a 7.19.

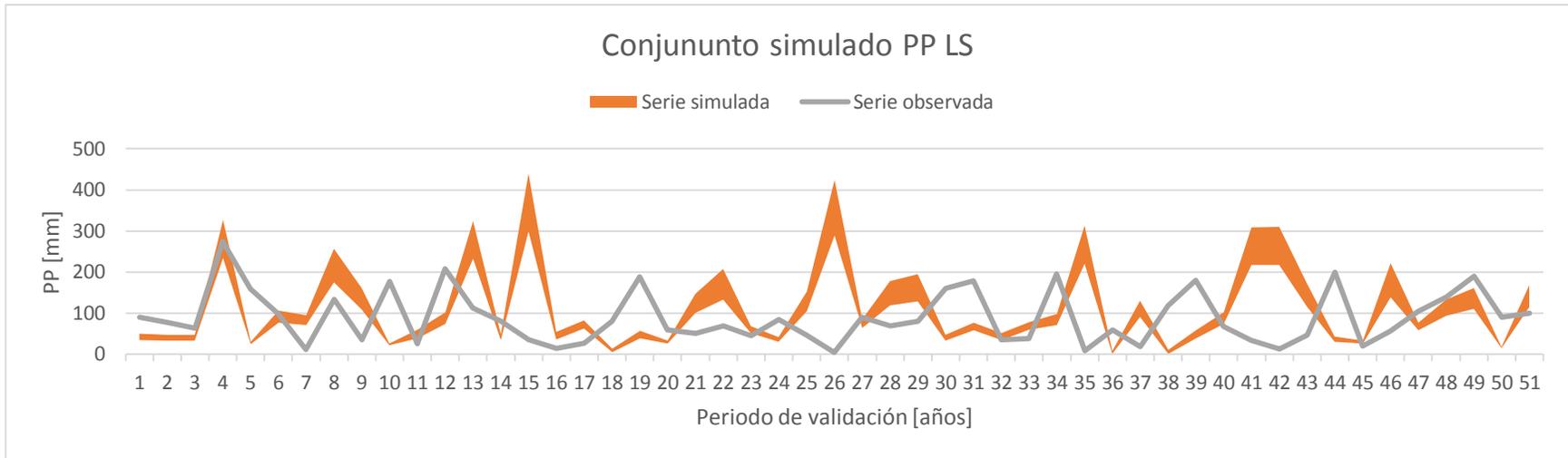


Figura 7.16: Conjunto de simulación obtenido del CT para precipitación en estación La Serena.

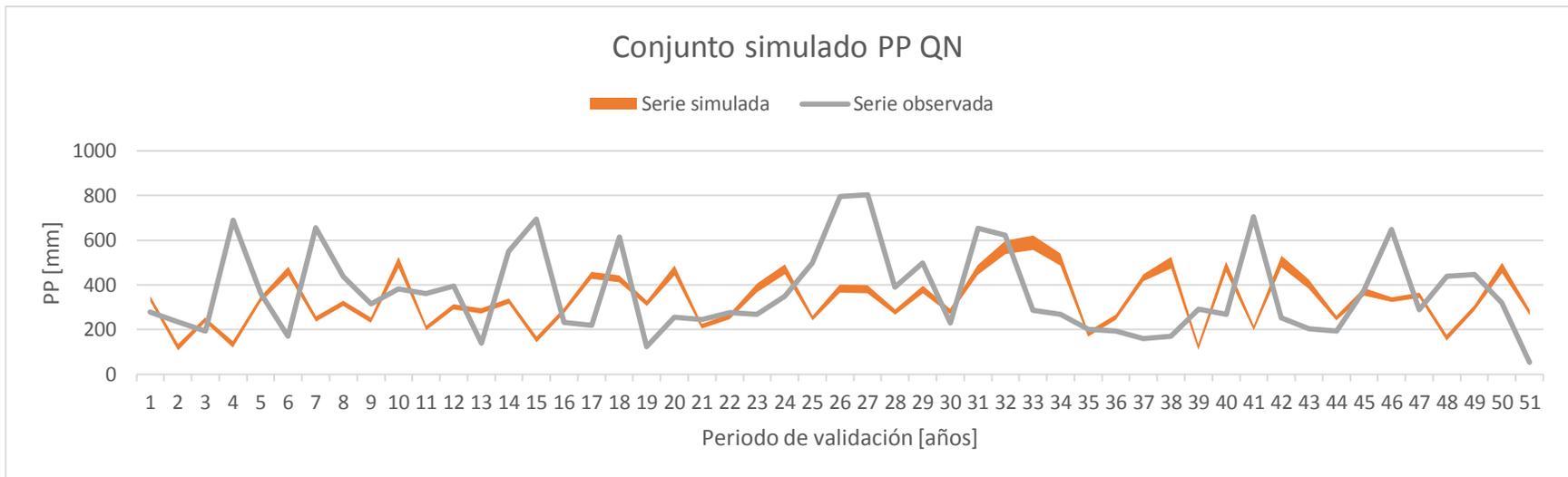


Figura 7.17: Conjunto de simulación obtenido del CT para precipitación en estación Quinta Normal.

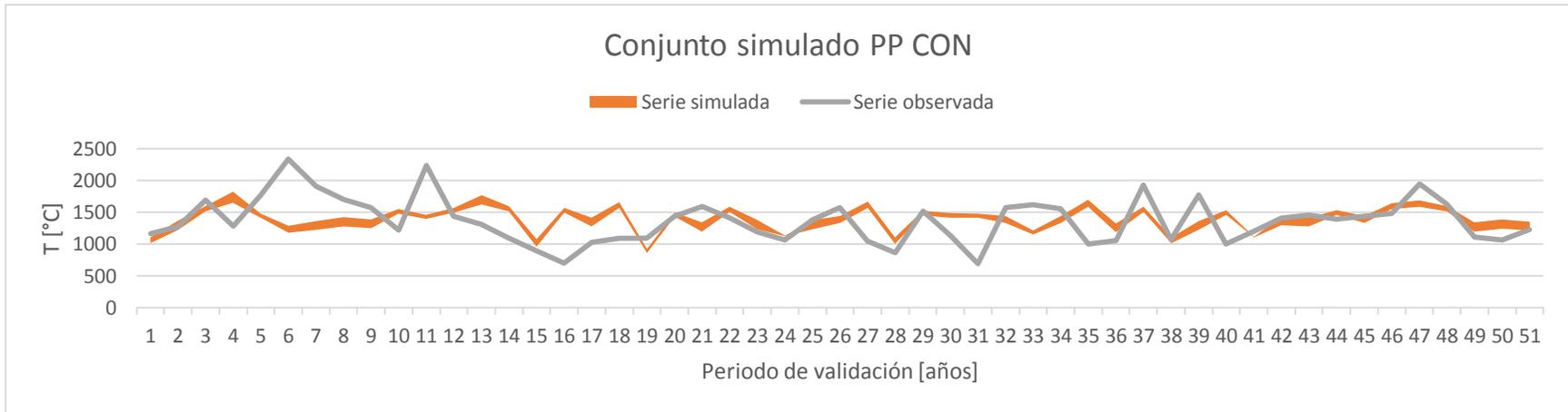


Figura 7.18: Conjunto de simulación obtenido del CT para precipitación en estación Concepción.

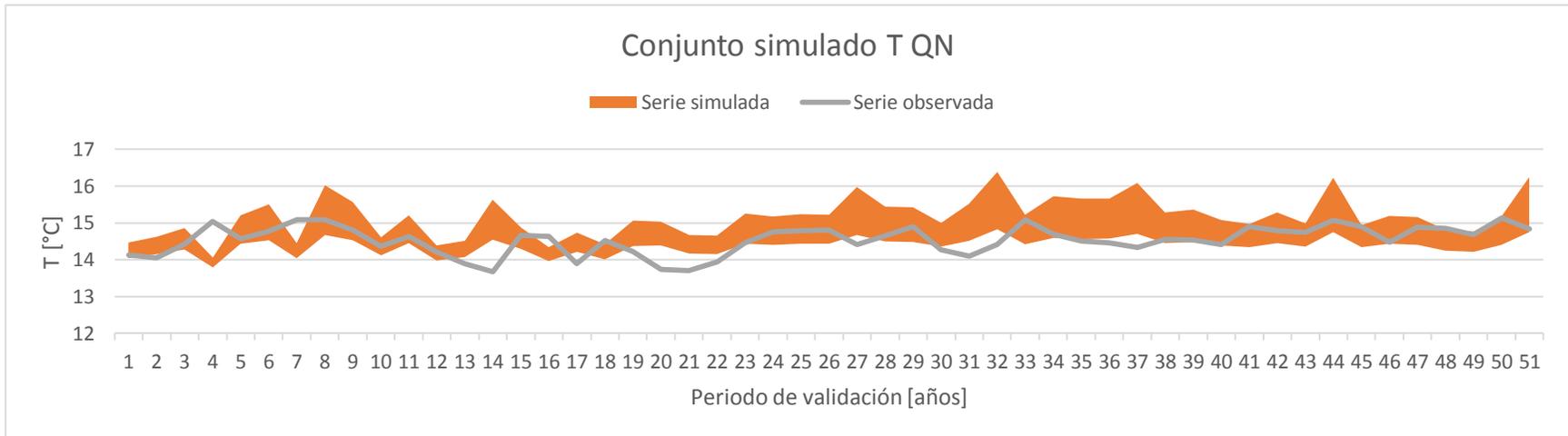


Figura 7.19: Conjunto de simulación obtenido del CT para temperatura en estación Quinta Normal.

Al observar las figuras, es posible deducir en general, que las series observadas no se encuentran dentro del rango delimitado por el conjunto simulado, por lo que se calculan las curvas de duración del rango delimitado por las series simuladas y los estadísticos de las series observadas y simuladas. Los resultados se muestran en la tabla 7.6 y las figuras 7.20 a 7.23.

Tabla 7.6: Estadísticos de series simuladas y observadas.

Estación – FM*	μ_{obs}	μ_{sim}	σ_{sim}
La Serena – PP	89 mm	108 mm	92 mm
Q. Normal – PP	366 mm	337 mm	120 mm
Concepción – PP	1367 mm	1385 mm	188 mm
Q. Normal - T	14,54°C	14,76°C	0,37°C

*Forzante Meteorológica

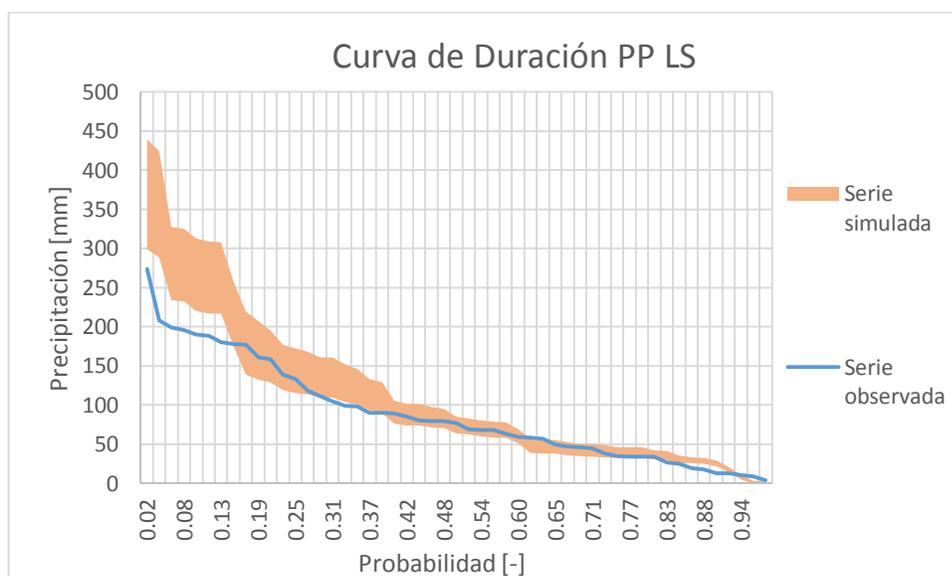


Figura 7.20: Curva de duración de datos observados y delimitada por rango de simulaciones, para precipitación en La Serena.

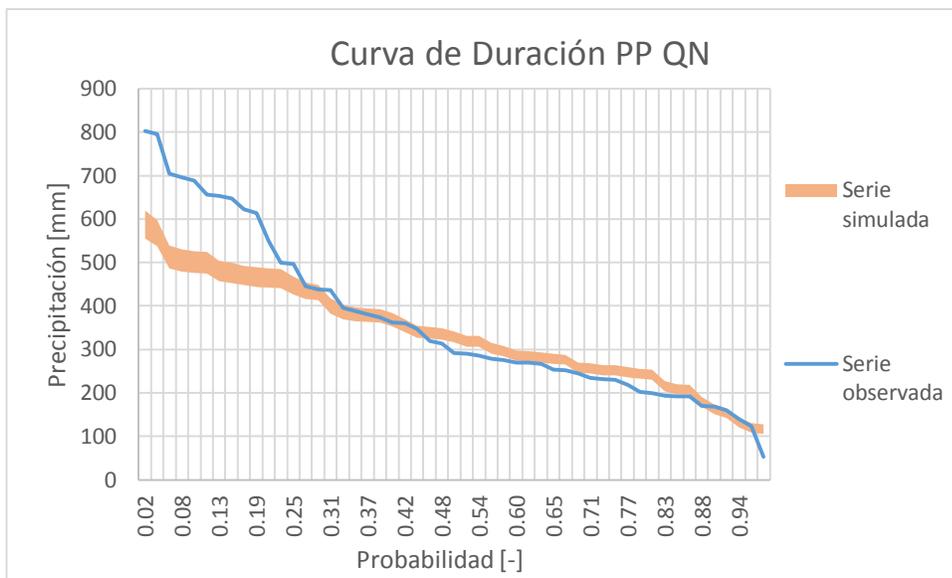


Figura 7.21: Curva de duración de datos observados y delimitada por rango de simulaciones, para precipitación en Quinta Normal.

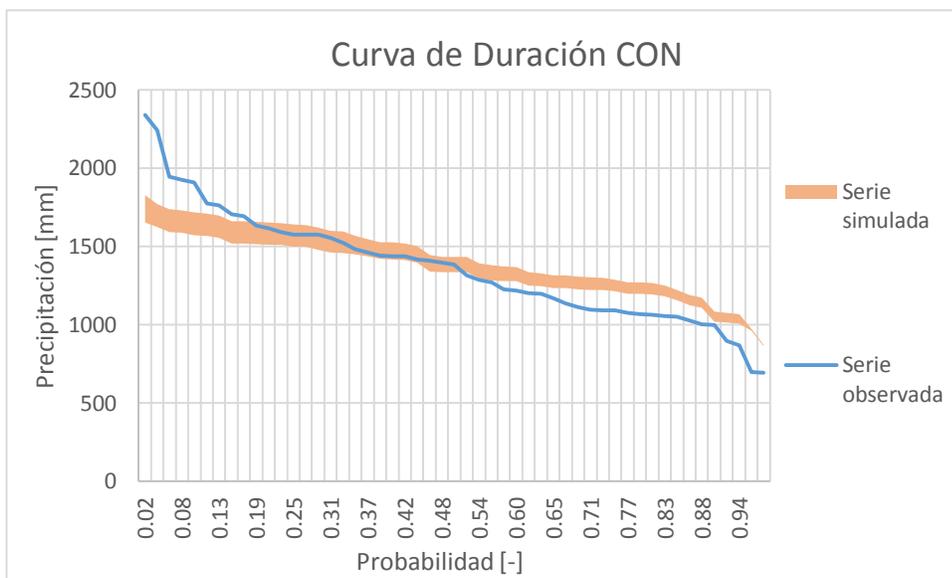


Figura 7.22: Curva de duración de datos observados y delimitada por rango de simulaciones, para precipitación en Concepción.

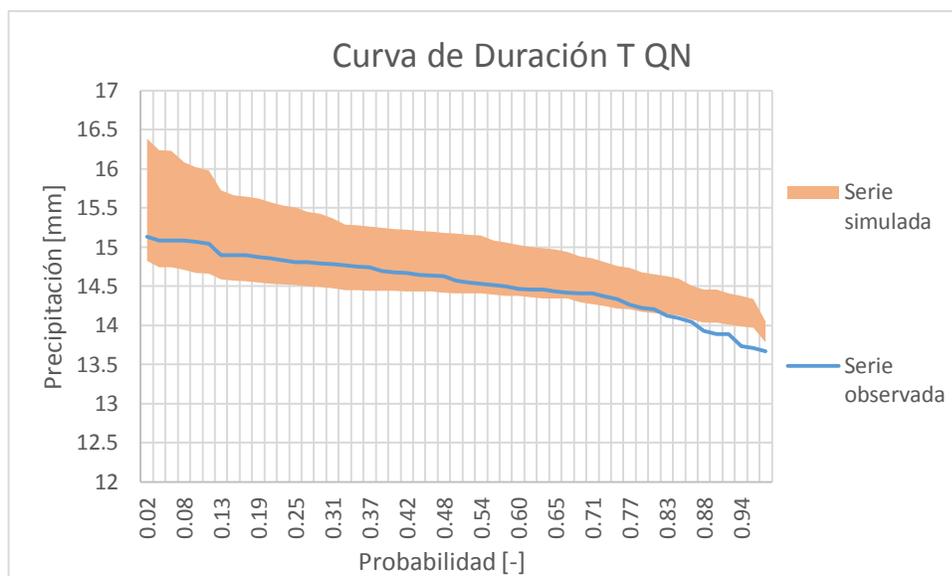


Figura 7.22: Curva de duración de datos observados y delimitada por rango de simulaciones, para temperatura en Quinta Normal.

Considerando que en general las series no coinciden en los máximos mínimos pero que si se encuentran dentro del mismo rango de variabilidad, es que se realiza un análisis extra para el cual se extraen los estadísticos de la muestra (100 simulaciones), verificando que se encuentra porcentaje aceptable de la muestra dentro del rango $\mu \pm \sigma$.

La tabla 7.7 muestra el porcentaje de acierto del análisis, y las figuras 7.24 a 7.27 muestran el desarrollo de las series dentro del rango propuesto, las cuales se elaboraron en base a los estadísticos mostrados en la tabla 7.6.

Tabla 7.7: Porcentajes de acierto de análisis extra de simulaciones.

Estación – FM*	Porcentaje de acierto [%]
La Serena – PP	86%
Quinta Normal – PP	53%
Concepción – PP	55%
Quinta Normal - T	73%

*Forzante Meteorológica

Completados los análisis, es posible aseverar que las series observada se encuentran por sobre el 50% de las veces dentro del rango generado por los estadísticos de la muestra, lo que valida en parte los datos, la discusión de este método de validación se revisará en el capítulo de análisis de resultados.

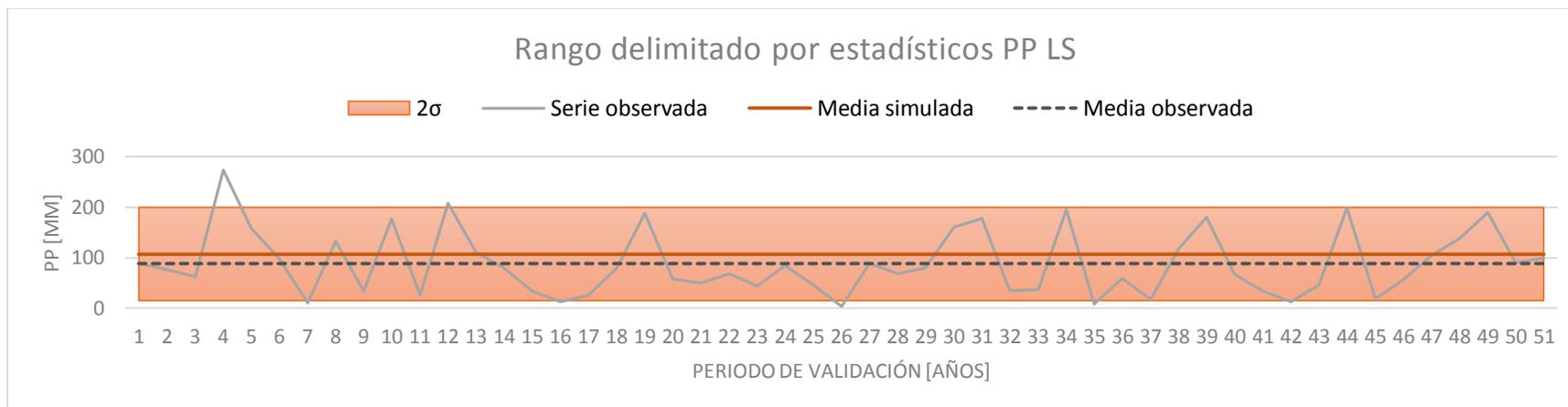


Figura 7.20: Rango delimitado por estadísticos ($\mu \pm \sigma$) de la muestra de simulaciones para precipitación en estación La Serena.

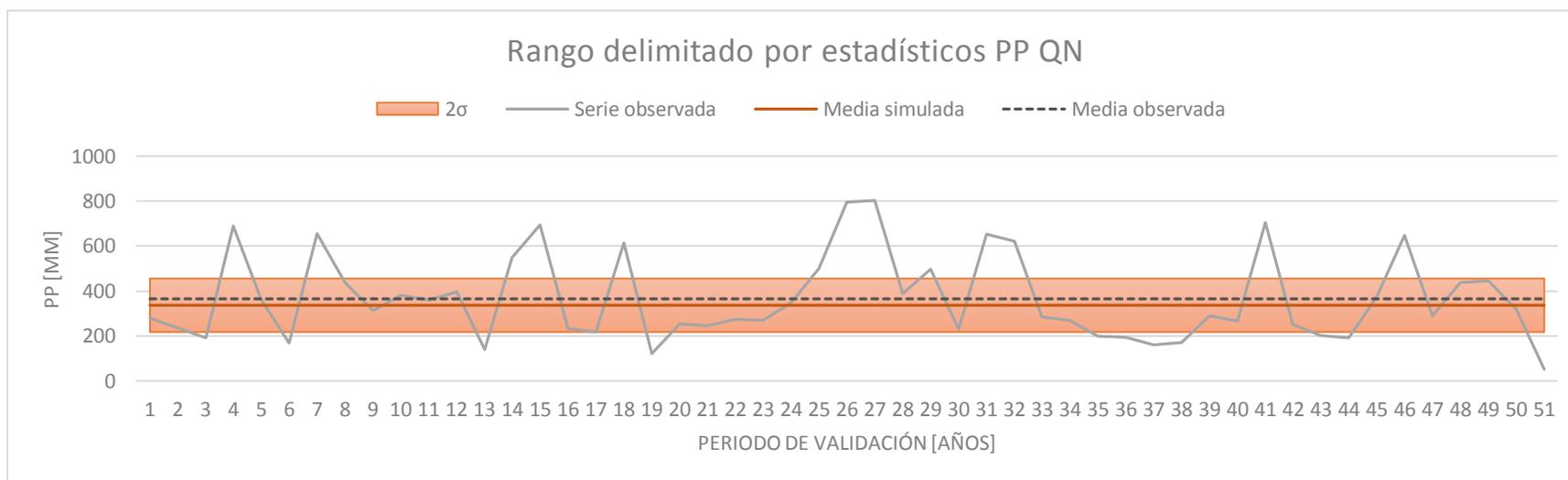


Figura 7.21: Rango delimitado por estadísticos ($\mu \pm \sigma$) de la muestra de simulaciones para precipitación en estación Quinta Normal.

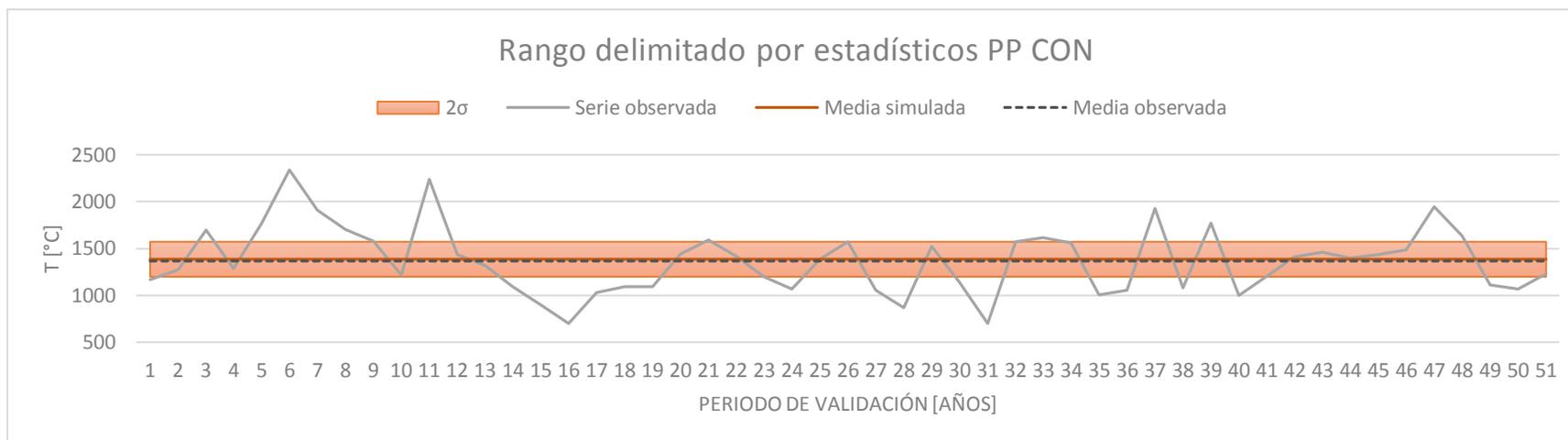


Figura 7.22: Rango delimitado por estadísticos ($\mu \pm \sigma$) de la muestra de simulaciones para precipitación en estación Concepción.

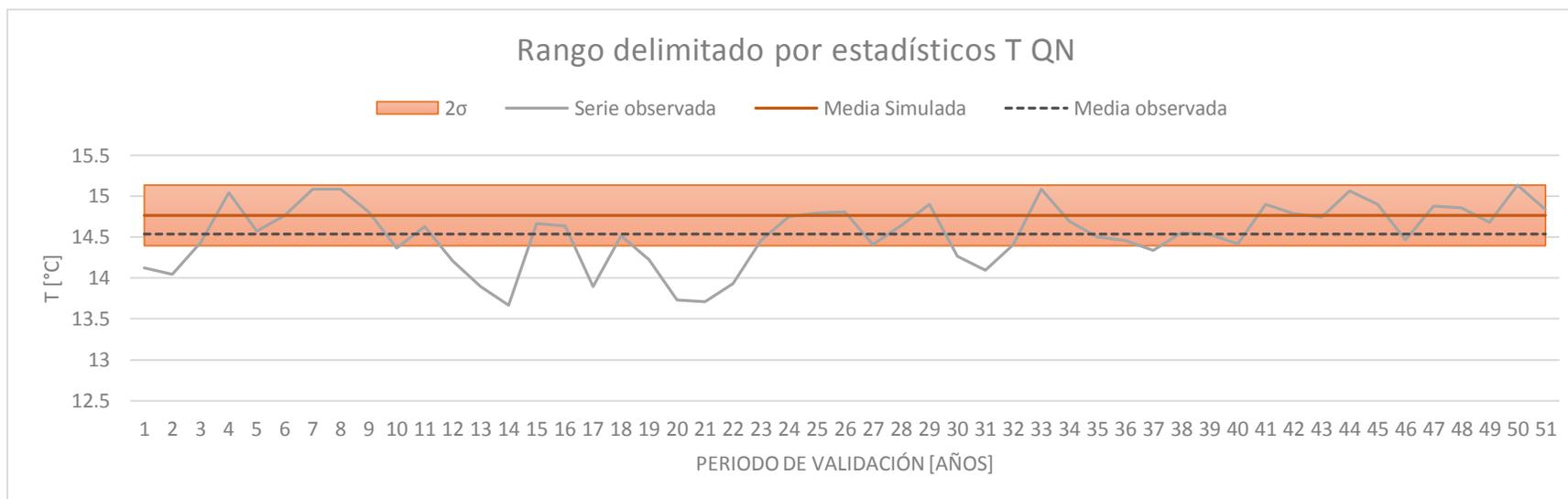


Figura 7.23: Rango delimitado por estadísticos ($\mu \pm \sigma$) de la muestra de simulaciones para temperatura en estación Quinta Normal.

CAPÍTULO VIII: ANÁLISIS DE RESULTADOS

El desarrollo de esta metodología reveló varias implicancias significativas, las cuales deben ser consideradas a la hora de interpretar los resultados. Básicamente se tiene en cuenta que se consideró más de una forma de proceder para desarrollar los procedimientos de escalamiento, ya sea en el método del cambio de variables o en el de medida de la incertidumbre.

8.1 Método del cambio de variables:

En primera instancia, para deshacer el cambio de variables existía cierta incertidumbre respecto de que pendiente debía gobernar la línea de tendencia de las proyecciones. En relación con esto y como punto de partida, se estableció que las pendientes debían guardar proporcionalidad para las líneas de tendencia de las series observadas como para las líneas de tendencia de las series simuladas. Esto tiene cierto sentido lógico, si se supone que el escalamiento temporal no es capaz de reproducir las tendencias en el periodo de proyecciones. Sin embargo, los resultados obtenidos muestran que al aplicar a este periodo la función transferencia, que fue elaborada con una línea base sin tendencia, es posible obtener una serie con tendencia. Esto es claramente reconocible en la estación Concepción para el caso de la precipitación, ya que el periodo de línea base no poseía tendencia, y al aplicar la función transferencia sobre el periodo de proyecciones, es posible observar que la tendencia aún existe. Tomando en cuenta lo anteriormente descrito es posible afirmar que el escalamiento temporal tiene como objetivo escalar la magnitud de los datos, pero de forma implícita este escalamiento de la magnitud de los datos afecta a la magnitud de la pendiente de la tendencia en la serie escalada. Por ello, la pendiente de la línea de tendencia de las series proyectadas, puede no ser correcta si se considera como correcto el uso de una pendiente que guarde la proporcionalidad entre series simuladas y observadas, ya que se puede estar cometiendo un error implícito asociado al efecto del escalamiento sobre las pendientes. Por otro lado, si se considera correcto que dicho efecto corrige las pendientes por sí solo, es decir deshaciendo el cambio de variables con las pendientes de las tendencias de las series simuladas, tampoco se obtiene el resultado esperado. En general, lo que se obtiene cuando los tipos de tendencia coinciden entre lo observado y lo simulado, es un margen de incertidumbre delimitado por las series obtenidas suponiendo proporcionalidad de pendientes y por aquella serie que supone que el efecto del escalamiento corrige la pendiente por sí solo. Esto se aprecia mejor en la figura 8.1, donde los resultados reales observados se encuentran comprendidos por las series simuladas antes descritas.

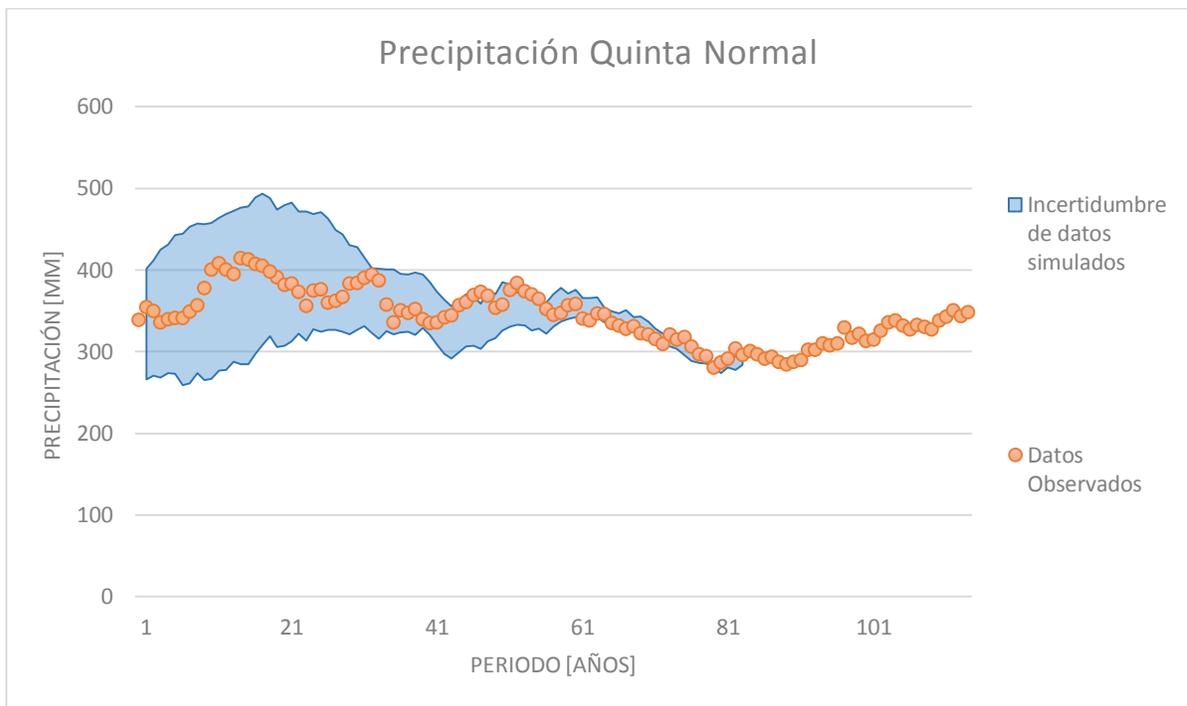


Figura 8.1: Observaciones comprendidas por datos simulados suponiendo proporcionalidad de pendientes simuladas y observadas, y datos simulados suponiendo corrección de pendiente por escalamiento, caso estación Quinta Normal.

En resumen, los valores obtenidos de suponer que los tipos de tendencia (disminución o aumento de la media de la forzante meteorológica en estudio) coinciden entre lo observado y simulado, son bastante cercanos a la realidad o al menos permiten tener un margen de incertidumbre de donde se encuentra lo correcto.

Por otro lado, cuando estos tipos de tendencia no coinciden entre lo simulado y lo observado, como el caso de la temperatura en las estaciones de La Serena y Concepción, el resultado es peculiar, ya que la función de transferencia no reconoce las tendencias, pues en el análisis probabilístico, se pierde el concepto de tendencia en la serie. Por lo que pierde importancia suponer si el tipo de tendencia es el mismo para la serie observada y simulada en el periodo de línea base. Así mismo, resulta mucho más importante que el tipo de línea de tendencia entre lo observado y lo simulado si sea el mismo en el periodo de proyecciones, ya que al deshacer el cambio de variables, se manifiesta el efecto de la tendencia sobre la serie proyectada. Esto es claramente observable en el caso de la temperatura en La Serena, donde en el periodo de línea base si coincide el tipo de tendencia (al aumento de la media en la temperatura), pero los resultados deshaciendo el cambio de variables con las dos pendientes propuestas, no expresa en absoluto los valores reales. Por otro lado, en la estación Concepción que básicamente poseía la misma particularidad de la estación la Serena, se procedió de manera inversa, es decir que el tipo de tendencia no coincidiera en línea base, pero si en el periodo de proyecciones. Los resultados demuestran, que al deshacer el cambio de variables suponiendo correcta la pendiente simulada (que no considera proporcionalidad de pendientes entre series simuladas y observadas), los resultados se acercan a la realidad, lo cual se puede apreciar

en la figura 7.1.11. Por último es importante acotar que usar pendientes proporcionales en este caso carece de sentido, ya que al no coincidir el tipo de tendencia en el periodo de línea base, el signo de las pendientes implicaría utilizar una pendiente opuesta a la utilizada en la etapa de proyecciones que es lo que se puede ver en la figura 7.1.6.

Finalmente, con respecto a este método, es posible aseverar también que en aquellas estaciones que se presenta una única tendencia en la media de la forzante meteorológica en el periodo total de estudio, y esta además coinciden en el tipo de tendencia entre lo observado y simulado, los resultados obtenidos se acercan bastante a la realidad, como el caso de La Serena en precipitación y Quinta Normal en temperatura, tal como se establece en las figuras 7.1.1 y 7.1.5.

8.2 Método de la medida de la incertidumbre:

El objetivo de este método radica en saber que se está cometiendo un error al suponer que las series de tiempo son estacionarias, y cuantificar dicho error. Básicamente se basa en utilizar distintos periodos de línea base y se construye un conjunto de funciones transferencia. Mediante simulaciones se pretende conocer los distintos escenarios que se pueden reproducir a partir de utilizar distintas funciones transferencias que pertenezcan al conjuntos antes mencionado. Dicho conjunto de funciones de transferencia es apreciable en la franja naranja de las figuras 7.2.1 a 7.2.4. Una vez realizadas las simulaciones se obtiene como resultado una franja en las series proyectadas, las cuales al compararlas con las series observadas no guardan relación, es decir se esperaba que la serie observada se encontrara en mayor parte por dentro de la franja descrita por las simulaciones de las series proyectadas. Esto podría tomarse como un fracaso, si lo que se desea es conocer el detalle de un posible escenario en el futuro, pero la explicación a esto descansa sobre el hecho de que las simulaciones obedecen a un principio estadístico, es decir, son incapaces de reproducir cuando se tienen exactamente años húmedos o secos, o en su defecto años fríos o cálidos, en otras palabras se puede atribuir al hecho de que es difícil predecir con certeza dichos eventos, pero también es posible observar en las figuras 7.2.9, a 7.2.12, que la variabilidad de los eventos observados en general, se encuentran dentro de la franja definida por la media y la desviación estándar de los eventos simulados.

Es importante también recalcar que la franja definida por las simulaciones es bastante acotada, por lo que la incertidumbre con la que se trabaja no es comparable al error que se comete al no predecir correctamente los años extremos.

En relación a la cantidad de información disponible para elaborar el conjunto de funciones de transferencia, es posible concluir que a medida que aumenta la información, se ensancha el conjunto de funciones transferencia, aumentando la incertidumbre. A su vez es más probable que las observaciones se encuentren dentro del rango esperado; esto se debe que a medida que uno toma más periodos de información de línea base, comienzan aparecer eventos asociados a mayores periodos de retornos, lo cual tiene sentido, ya que también se están considerando periodos más extensos. Luego se deduce que este método

funciona mejor si se tienen periodos extensos de información disponibles en el periodo de línea base.

También se puede percibir la diferencia entre realizar el análisis considerando un periodo de línea base que preceda cronológicamente al periodo de proyecciones y viceversa, esto tiene consigo una implicancia, tales como:

- Periodo de línea base precede al periodo de proyecciones: El conjunto de funciones de transferencia se muestra más acotado, lo que disminuye la incertidumbre en los resultados obtenidos de las simulaciones que utilizan el conjunto de funciones de transferencia como partida. Producto de esto se tiene también una franja más acotada en las series simuladas, y con esto existe una menor probabilidad de acertar las observaciones reales.
- Periodo de línea base sucede al periodo de proyecciones: El conjunto de funciones de transferencia comienza a ensancharse a medida que se consideran periodos más antiguos, esto debido a la aparición de años extremos a los que se le atribuye una función de transferencia más exagerada. Producto de esto se tiene una franja más ancha en las series simuladas, acercándose un poco más a las observaciones reales.

Además, de los resultados es posible inferir que es más probable acertar cuando se simulan datos de temperatura que datos de precipitación, principalmente debido a la variabilidad que presentan las forzantes meteorológicas, es decir, las diferencias observables entre un año seco y un año húmedo son mucho más notorias que las diferencias entre un año frío y un año cálido. La baja variabilidad observada en la temperatura hace que las series observadas tengan mayor probabilidad de encontrarse dentro de la franja elaborada por series simuladas.

CAPÍTULO IX: CONCLUSIONES

Con el fin de clasificar las fortalezas y los desafíos de este estudio, es que este capítulo se organizará tomando en cuenta la naturaleza de los hallazgos, ya sean medidas importantes a considerar en la etapa de metodología, afirmaciones sobre los resultados obtenidos, y conclusiones respecto de los objetivos planteados al inicio del estudio.

9.1 Consideraciones generales de la metodología

Para facilitar el análisis a los futuros estudios que continúen con la misma línea de investigación planteada en esta memoria, se han enunciado ciertas premisas que deben considerarse si se desea realizar una metodología de proyecciones futuras que considere la no estacionariedad de un clima.

Una de estas premisas radica en la relevancia de la selección de un MCG adecuado, como ya ha sido mencionado en el informe. Lo usual en Chile es realizar un análisis en el periodo de línea base que considere la representatividad de la estacionalidad, la variabilidad temporal y el cambio en escenarios futuros de cada MCG. Si bien estas consideraciones permiten aumentar el nivel de precisión que se puede obtener a través del escalamiento espacial y temporal, siguen basándose en la hipótesis básica del escalamiento estadístico, la cual enuncia que las series de tiempo de las forzantes meteorológicas son estacionarias.

De acuerdo a esto, la selección del MCG permite obtener valores más precisos para las proyecciones, el problema reside en que el supuesto base no se está cumpliendo, ya que si se analizan las tendencias en el periodo de línea base, se puede encontrar que estas no necesariamente representan el comportamiento de la estación de estudio, es más, no solo pueden verse mal representadas en el periodo de línea base, sino que también pueden no coincidir en el periodo en el cual se desea proyectar el comportamiento del clima, lo cual conlleva a distintas inconsistencias en el estudio.

Debido a lo anteriormente manifestado, se plantea que si se desea realizar un escalamiento estadístico que considere la no estacionariedad del clima, se debe realizar un análisis de tendencia para cada uno de los MCG, que garantice un comportamiento coherente al observado, y de acuerdo a los modelos que si representen las tendencias de forma correcta, filtrar considerando las consideraciones antes propuestas.

En principio, esto se puede interpretar como una pérdida de precisión en las proyecciones debido a que se le resta importancia a las consideraciones típicas, pero se evitan las incongruencias de las líneas de tendencia.

Es importante mencionar, que lo anterior también aplica al procesos de escalamiento espacial, el cual se realiza paralelo a la selección del GCM en el periodo de línea base, es decir el tipo de escalamiento espacial que se debe seleccionar, además de tener las consideraciones típicas, debe representar de la manera más fidedigna posible, la representación de las tendencias.

El sustento del argumento se basa en los resultados obtenidos, ya que según lo que se puede deducir del capítulo de validación, se observa claramente como el método del cambio de variables falla cuando las tendencias de las series simuladas no coinciden con las tendencias de las series observadas.

Luego, el escalamiento temporal se ve restringido por la selección del MCG y el escalamiento espacial, donde se puede afirmar también según los resultados, que de seleccionar tendencias que no son contraproducentes entre series simuladas y observadas, se obtienen escalamientos aceptables y no menos precisos, ya que el escalamiento temporal corrige las magnitudes simuladas.

También es relevante el hecho de haber trabajado tres estaciones ubicadas en distintos lugares, donde ninguna de ellas coincidían en la totalidad de sus nodos adyacentes del modelo, por lo cual se arrastra cierta discrepancia respecto de la mejor selección del MCG, ya que se escogió un solo modelo capaz de representar de buena manera las tres estaciones. En base a esto es que se propone que la selección del MCG, sea distinta para cada estación si no coinciden en la grilla de 4 nodos dadas por el MCG. No solo porque exista uno de estos modelos que represente de mejor manera lo observado, sino porque se agregó una consideración extra asociada a las tendencias, lo cual hace que sea más difícil representar tres estaciones distintas con un mismo modelo.

9.2 Cumplimiento de objetivos y conclusiones generales

En función de lo establecido al inicio de este estudio, se tenía una serie de objetivos específicos y generales, los cuales consistían en los hitos que se lograrían a medida que se avanzara con el desarrollo de la metodología para lograr el objetivo final.

Una de las primeras premisas para realizar este trabajo, fue asegurarse de trabajar bajo los supuestos correctos, es decir evidenciar la existencia de no estacionareidad en las estaciones de estudio, lo cual se pudo evidenciar en el capítulo V: Modelación de la no estacionareidad. Básicamente todas las estaciones muestran al menos una porción del periodo completo de estudio, en la cual la media de la forzante meteorológica no se mantiene constante; esto indica que la función que describe el cambio de la media de las forzantes meteorológicas en el tiempo, se puede interpretar como una función lineal por tramos. Esto abre la interrogante de si es necesario o no, considerar cambios en las líneas de tendencia entre un periodo y otro. Principalmente, esto se abordó desde una perspectiva integral, tratando de captar la mayor cantidad de escenarios posibles, y

analizar que ocurre cuando se tienen distintos supuestos, obteniendo resultados satisfactorios si los supuestos bajo los cuales se trabajan están correctos.

También se propuso un modelo capaz de considerar el efecto de la no estacionareidad en la media. De acuerdo la investigación previa a la metodología y la revisión bibliográfica, se evaluó el trabajar bajo un supuesto simple; suponer una variación lineal en la media de las forzantes meteorológicas y una desviación estándar constante. Lo cual no es del todo correcto, pero se adecúa bien a la situación de las estaciones seleccionadas, las cuales presentaron líneas de tendencia lineales por tramos en la media.

De manera paralela, se buscaba reconocer las consecuencias de no considerar el efecto la no estacionareidad en el escalamiento. Para esto se trabajó considerando distintos periodos de línea base. Los resultados revelan que la incertidumbre producida de trabajar con un conjunto de funciones de transferencia en lugar de una sola función de transferencia, es baja en comparación con la variación que hay entre un año seco y uno húmedo o entre un año cálido y uno helado. Esto también se puede complementar con el hecho de que las curvas de duración muestran que la variabilidad, es decir años extremos, no queda en general bien representada, y queda fuera del rango delimitado por la incertidumbre.

Lo anterior se puede explicar, entendiendo que el escalamiento es incapaz de reproducir la totalidad de los eventos ocurridos en las series de tiempo, lo cual se debe a que al ser un análisis estadístico, no se tiene como objetivo determinar la ocurrencia de años extremos, más bien se intenta representar el comportamiento general de las curvas descritas por las series de tiempo observadas, y que se encuentren dentro de un rango razonable, lo cual se logró.

Por otra parte, el escalamiento temporal se muestra como una alternativa certera para proyectar la magnitud de los eventos futuros y al incluir el efecto de la no estacionareidad también proyectar las tendencias que muestran las forzantes meteorológicas.

Por último, la ventaja de trabajar con simulaciones que permiten reconstruir el pasado, radica en la capacidad de validar una metodología, comparando las observaciones en estaciones de medición con las simulaciones de un MCG. Al agregar a esto, la utilización de estaciones con información de larga data, es posible dividir el pasado en sub-periodos, permitiendo así analizar distintas combinaciones de sub-periodos de línea base o validación; y en base a esto verificar que procedimiento es más adecuado para la metodología.

BIBLIOGRAFÍA

Arias Reyes C. S. (2011) .Análisis de los Efectos de Distintos Escenarios de Registro Histórico en la Estimación de Caudales de Crecida. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería civil, Universidad de Chile.

Arnell, N. (1999) Climate change and global water resources, Universidad de Southampton, Reino Unido.

Ayala A., McPhee J., Meza R., Rubio E. y X. Vargas (2009). Sensibilidad de los recursos hídricos futuros al procedimiento de escalamiento de variables meteorológicas. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, XIX Congreso Chileno de Hidráulica, 2009.

Cambio Climático Global. (2016). Modelo de Clima Global (MCG) – Cambio Climático Global. Recuperado de: <http://cambioclimaticoglobal.com/modelo-de-clima-global-mcg/> (Revisado el 20 de Junio de 2016).

D’Arcangeli Rojas, V. R (1997). Variación Temporal de Algunos Factores Meteorológicos en Chile. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería civil, Universidad de Chile.

Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación. (2012) Antecedentes para la aplicación de metodología de evaluación de cambio climático. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas.

Gómez T., Morales B. y X. Vargas (2013). Evaluación de impactos hidrológicos del cambio climático e incertidumbre asociada en dos cuencas andinas. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, XXI Congreso Chileno de Hidráulica, 2013.

Lazcano, L. (2016). Climatología. Dirección Meteorológica de Chile. Recuperado de: <http://164.77.222.61/climatologia/> (Revisado el 9 de Mayo de 2016).

Hamlet, A. F., Salathé, E. P., & Carrasco, P. (2010). Statistical downscaling techniques for global climate model simulations of temperature and precipitation with application to water resources planning studies. The Columbia Basin Climate Change Scenarios Project (CBCCSP) report.

Kannan, S., Ghosh, S., Mishra, V., & Salvi, K. (2014). Uncertainty resulting from multiple data usage in statistical downscaling. *Geophysical Research Letters*, 41(11), 4013-4019.

Knutti, R., Sedlacek, J. (2012) Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections, Institute for Atmospheric and Climate Change, Zurich, Suiza.

Lagos Zúñiga M., Bobadilla M.P., Vargas Mesa X., Cepeda Abad J.A., Silva V., Uribe F. y N. Vásquez (2015). Proyecciones de crecidas en cuencas andinas bajo distintos modelos de circulación general. XXII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica. Sociedad chilena de Ingeniería Hidráulica, Santiago, Chile.

Lagos M. y X. Vargas (2009). Vulnerabilidad futura de los recursos hídricos afluentes al embalse El Yeso. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, XIX Congreso Chileno de Hidráulica, 2009.

Lagos M. y X. Vargas (2012). Variación De Precipitación Y Área Pluvial Aportante Afluente Al Embalse Puclaro, Chile. Proyecciones Al Período 2045-2065. XXV Congreso latinoamericano de Hidráulica, San José, Costa Rica, 2012.

McPhee J., Rubio E., Meza R., Ayala A. y X. Vargas (2009). Proyecciones de impacto del cambio climático sobre cuencas andinas de Chile Central: aplicación a cuencas de Maule Alto y Laja. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, XIX Congreso Chileno de Hidráulica, 2009.

Molina Flores, S. E. (2007). Análisis de los Efectos de los Cambios Climáticos Globales Sobre los Regímenes de Caudales en las Cuencas Andinas de Chile Central. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería civil, Universidad de Chile.

Moss, R., Edmonds, J., Hibbard, K., Manning, K., Rose, S., Van Vuuren, R., Carter, T., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G., Mitchell, J., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S., Stouffer, R., Thomson, A., Weyant, J. & Wilbanks, T. (2010) The next generation of scenarios for climate change research and assessment, Nature 463.

Pachauri, R. K., & Resinger, A. (2008). IPCC 2007 Cambio climático: Informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, Suiza: IPCC.

Pcmdi.llnl.gov. (2016). CMIP5 Data Search - CMIP5 - ESGF-CoG. Recuperado de: <https://pcmdi.llnl.gov/search/cmip5/> (Revisado el 20 de Septiembre de 2016).

Salvi, K., Ghosh, S., & Ganguly, A. R. (2015). Credibility of statistical downscaling under nonstationary climate. Climate Dynamics, 1-33.

Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2009). A summary of the CMIP5 experiment design. PCDMI Rep, 33.

Vargas X., Gómez T., Ahumada F., Rubio E., Cartes M. & M. Gibbs (2013) Water availability in a mountainous Andean watershed under CMIP5 climate change scenarios. Cold and Mountain Region Hydrological Systems Under Climate Change: Towards Improved Projections Proceedings of H02, IAHS-IAPSO-IASPEI Assembly, Gothenburg, Sweden, July 2013 (IAHS Publ. 360, 2013).

Vargas X., Lagos M., Cepeda J., Vásquez N., Bobadilla M.P., Uribe F. & V. Silva (2015). Analysis of projections of precipitation and temperatures regimes in Chilean Basins for RCP8.5. AGU 2015, San Francisco, USA.

Vaze, J., Post, D. A., Chiew, F. H. S., Perraud, J. M., Viney, N. R., & Teng, J. (2010). Climate non-stationarity–validity of calibrated rainfall–runoff models for use in climate change studies. *Journal of Hydrology*, 394(3), 447-457.

Wilby, R. L., Dawson, C. W., & Barrow, E. M. (2007). SDSM user manual-a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts.

Wilby, R. L., Hassan, H., & Hanaki, K. (1998). Statistical downscaling of hydrometeorological variables using general circulation model output. *Journal of Hydrology*, 205(1), 1-19.