Universidad de Concepción Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Departamento de Geofísica



Análisis de desempeño de un Modelo Climático Regional para las variables precipitación y temperatura en Fuego-Patagonia.

Katherine Gaete Beltrán

Habilitación Profesional para optar por el Título de Geofísico

 ${\rm Marzo}~2018$ 

Universidad de Concepción Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Departamento de Geofísica

# Análisis de desempeño de un Modelo Climático Regional para las variables precipitación y temperatura en Fuego-Patagonia.

Katherine Gaete Beltrán

Habilitación Profesional para optar por el Título de Geofísico

> Guía: Dr. Andrés Sepúlveda Co-guía: Dr. Ricardo Jaña

Comisión: Dr. Juan Carlos Inzunza Dr.(c) Osvaldo Artal



Marzo 2018

Dedicado a mis padres, Gilda y Luis, por su incondicional apoyo e inmenso amor.

# Agradecimientos

Al finalizar esta etapa quisiera agradecer a todos quienes fueron parte de este proceso de crecimiento y aprendizaje. En primer lugar agradezco a mis padres Gilda y Luis y a mi hermano Cristian, por acompañarme y apoyarme en cada uno de los desafíos que me he planteado; su amor incondicional es un gran pilar que me ha permitido ser firme y alcanzar mis objetivos.

Gracias a todo el grupo humano del Departamento de Geofísica, académicos y administrativos, por su gran cercanía y cordialidad. De manera especial quiero agradecer a mi profesor guía, Andrés Sepúlveda, por su disposición, motivación y ayuda en la realización de este trabajo. Gracias a Juan Inzunza y Osvaldo Artal por aceptar ser parte de la comisión.

A mis compañeros y amigos que fueron parte importante de esta etapa universitaria haciéndola grata y llevadera. Gracias por su colaboración y ayuda, por darme ánimos y consejos, por su infinita paciencia y por esos momentos de entretención y risas.

Al Programa de Transferencia Científica y Tecnológica FNDR/GORE-Magallanes que ha apoyado la iniciativa "Modelamiento Climático Magallanes (MoCliM)", código BIP 30462410-0, dentro del que se desarrolla este trabajo. De manera especial agradezco al director del Programa, Dr. Ricardo Jaña del Instituto Antártico Chileno, y a Andrés Castillo por su colaboración en el contexto de su práctica profesional realizada en el Programa MoCliM. Al mismo tiempo agradecer a Ricardo Alcafuz y Rodrigo Delgado, de la Dirección Meteorológica de Chile, por facilitarnos los resultados y datos del Convenio de Alta Dirección Pública.

Agradezco, hoy y siempre, a Dios por ser mi fortaleza y guía en cada paso que doy en la vida y por darme la fe necesaria para alcanzar mis sueños.

# Resumen

La modelación numérica de la atmósfera da la posibilidad de conocer la evolución del clima presente y futuro, estudiando eventos de alto impacto, dado el interés de comprender cómo afectarán al sistema Tierra los actuales cambios en el clima. La baja resolución de los Modelos Climáticos Globales los hace inadecuados para el caso específico de Chile, un país largo y delgado de topografía compleja, por lo que es necesario realizar una reducción de escala anidando un Modelo Climático Regional que utilice una mayor resolución horizontal.

A la fecha en Chile se han publicado dos estudios principales acerca de la variabilidad climática futura. El primero fue realizado en 2006 por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, mientras que el segundo estudio lo realizó el año 2015 la Dirección Meteorológica de Chile (DMC). Si bien en ambos estudios se observa un aumento de las temperaturas, para la zona de Fuego-Patagonia este incremento no es tan significativo por efectos de menor altitud de la cordillera, la influencia oceánica y de la circulación de los vientos del oeste. Para el caso de las precipitaciones las tendencias futuras sugieren un aumento en la zona austral, contraria a la disminución que se observaría en la zona centro y sur del país.

A través de datos provenientes de estaciones meteorológicas, fue posible validar parte del período base del estudio de la DMC, con el objetivo de estudiar la habilidad del modelo en simular el clima local en Fuego-Patagonia. Se concluye que para la variable temperatura, existe un error de 2-3 [°C] para todas las estaciones analizadas, mientras que en el caso de la precipitación acumulada, se tiene un error entre 65-200 [mm] y un marcado sesgo húmedo, cuyos valores fluctúan entre 50-200 [mm] aproximadamente.

# Índice general

1.	Intro	oducción	1
	1.1.	Motivación y contexto	1
	1.2.	Zona de estudio	4
		1.2.1. Región de Magallanes	4
		1.2.2. Área y periodo de estudio	7
	1.3.	Modelación numérica de la atmósfera	8
	1.4.	Antecedentes generales	9
		1.4.1. Simulaciones climáticas para Chile	9
		1.4.2. Variabilidad climática histórica en Magallanes	10
2.	Hipe	ótesis y Objetivos	12
	2.1.	Hipótesis	12
	2.2.	Objetivos	12
3.	Met	odología	13
	3.1.	Simulación Climática	13
	3.2.	Datos observados	16
	3.3.	Validación	18
		3.3.1. Distribución	18
		3.3.2. Series de tiempo	20
		3.3.3. Proyectiones	22
4.	Res	ıltados	23
	4.1.	Ciclo anual y ciclo estacional	23
	4.2.	Distribución	27
	4.3.	Análisis de series de tiempo	39
	4.4.	Proyecciones	58
5.	Disc	usión	59

6. Conclusiones	<b>62</b>
Anexo	65
A. Modelo MIROC5	66
B. Modelo WRF	68
C. Distribución temporal de los datos	73
D. Participación en Conferencia y Workshop	76

# Índice de figuras

1.1.	Comparación del cambio climático observado y simulado en relación a	
	promedios globales (Stocker et al., 2013)	3
1.2.	Cambio en la temperatura media en superficie (1986-2005 a 2081-2100)	
	y cambio en la precipitación media (1986-2005 a 2081-2100), bajo esce	
	narios de emisiones RCP2.6 y RCP 8.5 (Pachauri et al., 2014). $\ldots$ .	3
1.3.	Descripción geográfica zona sur de Chile. Fuente: Guía Climática Prácti-	
	ca, Dirección Meteorológica de Chile (Cruz y Calderón, 2008)	5
1.4.	Clasificación climática zona sur. Fuente: Adaptado de Guía Climática	
	Práctica, Dirección Meteorológica de Chile (Cruz y Calderón, 2008)	6
1.5.	Mapa del área de estudio. Los puntos amarillos representan la localiza-	
	ción de las estaciones meteorológicas seleccionadas para este trabajo y	
	las estrellas rojas indican puntos de referencia general. $\ldots$	7
1.6.	Precipitación anual acumulada en la ciudad de Punta Arenas entre los	
	años 1900-2014 (González et al., 2017)	10
1.7.	Promedio de la temperatura mensual en Punta Arenas entre los años	
	1888-2007 (Santana et al., 2009)	11
3.8.	Esquema que muestra el procedimiento para realizar las simulaciones del	
	hindcast. Los datos de MIROC5 son ingresados al modelo de alta reso-	
	lución WRF, donde son procesados por los diferentes módulos del pro-	
	grama. El resultado final es el hindcast en el período 1970-1999. Fuente:	
	Modificado de Alcafuz et al., 2015	14
3.9.	Cobertura geográfica de los dominios utilizados en la simnulación climáti-	
	ca de la DMC. Fuente: Alcafuz et al., 2015	14
3.10	. Dominio principal en el presente estudio.	15
3.11	. Localización de las estaciones meteorológicas utilizadas para la validación.	17
4.12	. Ciclo anual de precipitación acumulada mensual $(1)$ y temperatura media	
	(2), para el periodo 1988-1999. En azul la serie observada, en rojo la	
	simulada y en negro la diferencia entre ambas.	24

- 4.14. Visualización de la distribución de los datos a través de la combinación de histograma, estimación de la densidad de Kernel (KDE), boxplot y función de distribución acumulada (CDF). El set de figuras corresponde a la distribución en la estación Torres del Paine, siendo las figuras superiores (1 y 2) obtenidas a partir de los datos de precipitación acumulada, mientras que las de la parte inferior (3 y 4) son producto de las temperaturas. Se tiene que el color azul representa lo observado y el color rojo lo simulado. El análisis contempla datos para el periodo 1988-1999.
- 4.15. Visualización de la distribución de los datos a través de la combinación de histograma, estimación de la densidad de Kernel (KDE), boxplot y función de distribución acumulada (CDF). El set de figuras corresponde a la distribución en la estación Puerto Natales, siendo las figuras superiores (1 y 2) obtenidas a partir de los datos de precipitación acumulada, mientras que las de la parte inferior (3 y 4) son producto de las temperaturas. Se tiene que el color azul representa lo observado y el color rojo lo simulado. El análisis contempla datos para el periodo 1988-1999.
- 4.16. Visualización de la distribución de los datos a través de la combinación de histograma, estimación de la densidad de Kernel (KDE), boxplot y función de distribución acumulada (CDF). El set de figuras corresponde a la distribución en la estación Bahía San Felipe, siendo las figuras superiores (1 y 2) obtenidas a partir de los datos de precipitación acumulada, mientras que las de la parte inferior (3 y 4) son producto de las temperatura. Se tiene que el color azul representa lo observado y el color rojo lo simulado. El análisis contempla datos para el periodo 1988-1999.
- 4.17. Visualización de la distribución de los datos a través de la combinación de histograma, estimación de la densidad de Kernel (KDE), boxplot y función de distribución acumulada (CDF). El set de figuras corresponde a la distribución en la estación Punta Arenas DMC, siendo las figuras superiores (1 y 2) obtenidas a partir de los datos de precipitación acumulada, mientras que las de la parte inferior (3 y 4) son producto de las temperaturas. Se tiene que el color azul representa lo observado y el color rojo lo simulado. El análisis contempla datos para el periodo 1988-1999.

IX

25

28

30

32

- 4.18. Visualización de la distribución de los datos a través de la combinación de histograma, estimación de la densidad de Kernel (KDE), boxplot y función de distribución acumulada (CDF). El set de figuras corresponde a la distribución en la estación Punta Arenas DGA, siendo las figuras superiores (1 y 2) obtenidas a partir de los datos de precipitación acumulada, mientras que las de la parte inferior (3 y 4) son producto de las temperaturas. Se tiene que el color azul representa lo observado y el color rojo lo simulado. El análisis contempla datos para el periodo 1988-1999.
- 4.19. Visualización de la distribución de los datos a través de la combinación de histograma, estimación de la densidad de Kernel (KDE), boxplot y función de distribución acumulada (CDF). El set de figuras corresponde a la distribución en la estación Porvenir, siendo las figuras superiores (1 y 2) obtenidas a partir de los datos de precipitación acumulada, mientras que las de la parte inferior (3 y 4) son producto de las temperaturas. Se tiene que el color azul representa lo observado y el color rojo lo simulado. El análisis contempla datos para el periodo 1988-1999.

X

36

38

4.23. Validación de precipitación acumulada en estación Punta Arenas DMC, para el periodo 1988-1999. Las gráficas corresponden a la visualización de los datos mediante: (1) series de tiempo, (2) gráfico cuantil-cuantil (qqplot), (3) diagrama de dispersión, (4) histograma de las diferencias y (5) diagrama de Taylor. El color azul representa lo observado, el color rojo lo simulado y la recta verde corresponde a la línea 1 es a 1. . . . 434.24. Validación de precipitación acumulada en estación Punta Arenas DGA, para el periodo 1988-1999. Las gráficas corresponden a la visualización de los datos mediante: (1) series de tiempo, (2) gráfico cuantil-cuantil (qqplot), (3) diagrama de dispersión, (4) histograma de las diferencias y (5) diagrama de Taylor. El color azul representa lo observado, el color rojo lo simulado y la recta verde corresponde a la línea 1 es a 1. . . . 444.25. Validación de precipitación acumulada en estación Porvenir, para el periodo 1988-1999. Las gráficas corresponden a la visualización de los datos mediante: (1) series de tiempo, (2) gráfico cuantil-cuantil (qqplot), (3) diagrama de dispersión, (4) histograma de las diferencias y (5) diagrama de Taylor. El color azul representa lo observado, el color rojo lo simulado 454.26. Validación de temperatura media en estación Torres del Paine, para el periodo 1988-1999. Las gráficas corresponden a la visualización de los datos mediante: (1) series de tiempo, (2) gráfico cuantil-cuantil (qqplot), (3) diagrama de dispersión, (4) histograma de las diferencias y (5) diagrama de Taylor. El color azul representa lo observado, el color rojo lo simulado y la recta verde corresponde a la línea 1 es a 1. . . . . . . . 494.27. Validación de temperatura media en estación Puerto Natales, para el periodo 1988-1999. Las gráficas corresponden a la visualización de los datos mediante: (1) series de tiempo, (2) gráfico cuantil-cuantil (qqplot), (3) diagrama de dispersión, (4) histograma de las diferencias y (5) diagrama de Taylor. El color azul representa lo observado, el color rojo lo simulado y la recta verde corresponde a la línea 1 es a 1.... 504.28. Validación de temperatura media en estación Bahía San Felipe, para el periodo 1988-1999. Las gráficas corresponden a la visualización de los datos mediante: (1) series de tiempo, (2) gráfico cuantil-cuantil (qqplot), (3) diagrama de dispersión, (4) histograma de las diferencias y (5) diagrama de Taylor. El color azul representa lo observado, el color rojo lo simulado y la recta verde corresponde a la línea 1 es a 1. . . . . . . . 51

4.29.	Validación de temperatura media en estación Punta Arenas DMC, para el periodo 1988-1999. Las gráficas corresponden a la visualización de los datos mediante: (1) series de tiempo, (2) gráfico cuantil-cuantil (qqplot), (3) diagrama de dispersión, (4) histograma de las diferencias y (5) dia- grama da Taylor. El color azul representa la observada, el color reio la	
4.30.	simulado y la recta verde corresponde a la línea 1 es a 1 Validación de temperatura media en estación Punta Arenas DGA, para	52
	el periodo 1988-1999. Las gráficas corresponden a la visualización de los datos mediante: (1) series de tiempo, (2) gráfico cuantil-cuantil (qqplot), (3) diagrama de dispersión, (4) histograma de las diferencias y (5) dia- grama de Taylor. El color azul representa lo observado, el color rojo lo	
4.31.	simulado y la recta verde corresponde a la línea 1 es a 1 Validación de temperatura media en estación Porvenir, para el perio- do 1988-1999. Las gráficas corresponden a la visualización de los datos mediante: (1) series de tiempo, (2) gráfico cuantil-cuantil (qqplot), (3) diagrama de dispersión, (4) histograma de las diferencias y (5) diagrama de Taylor. El color azul representa lo observado, el color roio lo simulado	53
4.32.	y la recta verde corresponde a la línea 1 es a 1	54
B.1.	cada 6 h para el periodo 1988-1999. La zona sombreada es no significativa Grilla Arakawa-C utilizada al desarrollar las ecuaciones que gobiernan la atmósfera, se tiene la grilla horizontal (izquierda) y grilla vertical (derecha), correspondientes a las respectivas velocidades. (Skamarock y	58
B.2. B.3.	Klemp, 2008)	69 70 71
C.1.	Distribución temporal de datos observados de precipitación acumulada, para el periodo 1988-2017.	74
C.2.	Distribución temporal de datos observados de temperatura media, para el periodo 1988-2017	75

# Índice de Tablas

3.1.	Parametrizaciones físicas escogidas para el modelo DMC (Fuente: Alca-	
	fuz et al., 2015)	15
3.2.	Información de estaciones meteorológicas utilizadas para la validación	17
4.3.	Resultados de estadísticos de validación para variable precipitación acu-	
	mulada entregada por el modelo a partir de los datos observados por	
	las estaciones. Análisis realizado para el periodo 1988-1999. Se mues-	
	tran valores de correlación, error de sesgo, cociente entre las desviaciones	
	estándar y raíz del error cuadrático medio (RMSE)	48
4.4.	Resultados de estadísticos de validación para variable temperatura media	
	entregada por el modelo a partir de los datos observados por las esta-	
	ciones. Análisis realizado para el periodo 1988-1999. Se muestran valores	
	de correlación, error de sesgo, cociente entre las desviaciones estándar y	
	raíz del error cuadrático medio (RMSE)	57

# 1. Introducción

## 1.1. Motivación y contexto

La región de Magallanes y la Antártica Chilena es considerada un laboratorio natural en donde se generan condiciones favorables para analizar el impacto y perspectivas de la investigación en el ámbito climático (Jaña y Mansilla, 2009). Es importante difundir los conocimientos e ideas, que explican desde distintas perspectivas, los antecedentes y consideraciones relacionados con los fenómenos climáticos en la región y su vinculación con el resto del planeta.

El presente trabajo surge en el marco del *Programa de Transferencia Científica y Tecnológica para la planificación regional de Magallanes.* Dicho programa tiene como objetivo principal el "Transferir tecnología y conocimiento científico que permita adaptar modelos climáticos a la región para ser utilizados como un factor en la planificación regional, incluyendo evolución y proyecciones de la cobertura nival". En este contexto, esta tesis nos permitirá cuantificar los efectos de los cambios ocurridos en el clima durante los últimos doce años en la región de Magallanes.

El conocimiento del impacto que el cambio y la variabilidad climática pueden provocar, se plantea como una necesidad que debe ser analizada en perspectiva de largo plazo a modo de optimizar el uso de recursos y la toma de decisiones en el proceso de planificación regional, con base en antecedentes ciertos y proyecciones confiables sobre el clima de Magallanes. Se estima necesario realizar estas proyecciones a través de las múltiples herramientas que proporciona la modelación numérica de la atmósfera.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC), señala que el calentamiento en el sistema climático es inequívoco (Stocker et al., 2013). En base a estudios, se confirma que los cambios observados desde la década de 1950 no se corresponden a las pequeñas fluctuaciones que han existido en los últimos decenios a milenios, sino que por el contrario, se evidencia un creciente y sostenido aumento en la temperatura durante los últimos años (Fig. 1.1) En consecuencia, las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) han aumentado y a la vez la atmósfera y el océano se han calentado, siendo uno de los principales factores la influencia antropegénica. Por otra parte, los componentes criosféricos han disminuido su volumen y el nivel medio del mar se ha elevado.

De acuerdo al IPCC, cada uno de los tres últimos decenios ha sido sucesivamente más cálido en la superficie de la Tierra que cualquier decenio anterior desde 1850. Los principales factores físicos que indican cambios en el clima del planeta corresponden a la temperatura en superficie, la temperatura en la baja tropósfera, variación del nivel medio del mar y extensión de cubierta de hielo y nieve.

El IPCC desarrolló múltiples escenarios de emisiones, los que corresponden a imágenes alternativas de lo que podría acontecer en el futuro y constituyen un instrumento apropiado para analizar de qué manera influirán las fuerzas determinantes en las emisiones futuras, evaluando el margen de incertidumbre de dicho análisis. Los escenarios son de utilidad para el estudio del cambio climático, principalmente mediante la creación de modelos que permiten proyectar el clima. Estos consideran factores que van desde la demografía hasta la evolución tecnológica y económica. Ninguno de los escenarios desarrollados tiene políticas futuras que aborden de manera explícita el cambio climático, sin embargo todos los escenarios abarcan necesariamente diversas políticas de otros tipos.

Los cambios observados en el sistema físico terrestre, atribuibles al cambio climático, son en gran parte debido a la influencia humana, principalmente por incremento en la emisión de GEI, a partir de mediados del siglo XX. La influencia humana en el sistema climático es clara. La Figura 1.1 muestra una comparación entre distintos modelos climáticos, agrupados entre aquellos que sólo consideran forzamientos naturales y aquellos que consideran tanto forzamientos naturales como antropogénicos. Se tiene que estos últimos son los que mejor representan las variaciones observadas; sin el forzante antropogénico existiría solo un leve enfriamiento de la temperatura superficial.



Figura 1.1: Comparación del cambio climático observado y simulado en relación a promedios globales (Stocker et al., 2013).

A continuación se presentan mapas de resultados medios de modelos múltiples de la quinta fase del Proyecto de Comparación de Modelos Acoplados (CMIP5) de los escenarios RCP2.6 y RCP8.5 (RCPs: Representative Concentration Pathways), correspondientes al período 2081-2100 (Fig. 1.2). En la parte superior se observa el cambio anual en la temperatura media en superficie y en la inferior el cambio de la media porcentual de la precipitación media anual.



Figura 1.2: Cambio en la temperatura media en superficie (1986-2005 a 2081-2100) y cambio en la precipitación media (1986-2005 a 2081-2100), bajo escenarios de emisiones RCP2.6 y RCP 8.5 (Pachauri et al., 2014).

El Programa de Modelamiento Climático (MoCliM) busca adaptar modelos climáticos para comprender como ha sido la evolución del clima durante los últimos años en la región de Magallanes y también busca proyectar escenarios futuros, a modo de comprender cómo el evidente cambio en el sistema climático afectará el clima local de Magallanes, con la finalidad de asesorar el proceso de planificación regional y la toma de decisiones.

## 1.2. Zona de estudio

#### 1.2.1. Región de Magallanes

La región de Magallanes y la Antártica Chilena  $(53^{\circ} 09' 45" \text{ S}, 70^{\circ} 55' 21" \text{ O})$  posee una particular ubicación que la convierte en un escenario único para comprender el comportamiento climático del hemisferio austral, además es considerada un laboratorio natural para el estudio de nieves, por lo que se considera de gran importancia hídrica. Tiene una superficie es de 132.297,2 kilómetros cuadrados para la parte americana, es decir, la mayor superficie del país (17,5 % del territorio de Chile continental).

Por las características del relieve propias de la región, el desarrollo de grandes cuencas o sistemas hidrográficos no es posible. Desde Puerto Natales hacia el sur, la cordillera de los Andes desaparece como tal; solo queda representada en la cordillera de Sarmiento y en los archipiélagos ubicados al sur del Estrecho de Magallanes y de Tierra del Fuego. La última cumbre de los Andes sumergida es la isla Hornos, situada casi a los 56° S. Dentro de las alturas más importantes se encuentran cerros Murallón (3.600 msnm), Bertrand (3.270 msnm) y el monte Fitz Roy (3.406 msnm), el volcán Lautaro (3.380 msnm) y las Torres del Paine (3.050 msnm). Las planicies al este de Puerto Natales, llamadas pampas o estepas de Magallanes, son una prolongación de la meseta patagónica transandina. En la Figura 1.3 se observan las alturas en metros correspondiente al área de estudio, en el extremo sur de Chile.



Figura 1.3: Descripción geográfica zona sur de Chile. Fuente: Guía Climática Práctica, Dirección Meteorológica de Chile (Cruz y Calderón, 2008).

El área de estudio presenta cuatro climas principales (Fig. 1.4):

- Templado frío de costa occidental con máximo invernal de lluvias: La característica principal es la abundante cantidad de precipitaciones que ocurren todo el año. Las mayores cantidades se presentan en invierno, aunque algunos sectores muestran los máximos en otoño. La influencia oceánica junto a los intensos vientos, impiden temperaturas demasiado bajas, las que disminuyen de acuerdo a la latitud, definiendo valores promedios de 4-5 [°C] en la región austral.
- Clima de tundra: Esta zona está influenciada por el océano Pacífico en sus sectores oeste y suroeste. Las precipitaciones son abundantes, superiores a 1.000 [mm] como total anual, siendo más abundante en verano, dado que en invierno la precipitación se presenta en forma de nieve. Las temperaturas medias son del orden de 5 [°C] a 7 [°C], pero por la influencia oceánica y los vientos, hay una pequeña variabilidad térmica anual, determinando una diferencia de sólo 4 [°C] entre el mes más cálido y el más frío.
- Continental Trasandino con degeneración estepárica: Este clima abarca la península de Brunswick y la parte sur de Tierra del Fuego. Aquí las precipitaciones disminuyen, por situarse en una región transandina, donde las masas de aire llegan

con escasa humedad después de haber remontado la zona cordillerana y haber generado las precipitaciones más importantes en las laderas de barlovento.

Clima de estepa fría: Las precipitaciones disminuyen a medida que la zona se aleja de la cordillera patagónica, generándose fluctuaciones entre 250–500 [mm], cuyos menores montos se encuentran en el sector oriental del estrecho de Magallanes y en la parte norte de Tierra del Fuego. Las precipitaciones se distribuyen homogéneamente durante el año, con máximos que ocurren en verano y otoño, además en invierno se tiene precipitación nival. Con respecto a la temperatura media, se tiene que entre diciembre y marzo supera los 10 [°C] y en los meses de invierno sólo es del orden de 2 [°C].



Figura 1.4: Clasificación climática zona sur. Fuente: Adaptado de Guía Climática Práctica, Dirección Meteorológica de Chile (Cruz y Calderón, 2008).

Según registros de la Dirección Meteorológica de Chile para la capital regional, Punta Arenas, se tiene que el valor normal anual de precipitaciones es de 408,8 [mm]. Las precipitaciones mayores no se concentran en el invierno, sino que alcanzan su mayor valor acumulado de 41,6 [mm] en el mes de mayo. Se tiene que la amplitud térmica es máxima en los meses de verano, cercana a los 10 [°C], atenuada por la cercanía con el océano. En invierno, el régimen térmico se hace más homogéneo y la diferencia entre las temperaturas extremas se reduce a 5 [°C]. Se tiene que la temperatura máxima en verano alcanza un valor de 14,7 [°C] y la mínima promedio desciende a 6,5 [°C]. Mientras que en el invierno la temperatura máxima promedio alcanza un valor de 3,7 [°C] y la mínima llega a -1,1 [°C].

En la época estival se observan en mayor medida días parcialmente nublados y no es frecuente que se registren eventos de altas temperaturas. Durante los meses de invierno predominan los días nublados, los días con precipitación disminuyen levemente y se registran también la mitad de los días del mes con heladas (Cruz y Calderón, 2008).

### 1.2.2. Área y periodo de estudio

El área escogida para este estudio está comprendida entre 61° 23′ 24" O y 79° 44′ 24" O y 46° 17′ 60" S y 57° 02′ 60" S (Fig. 1.5), dominio que contiene el territorio continental de la región de Magallanes. El periodo de estudio abarca un total de doce años, desde 1988-1999, correspondiente al periodo tanto de la simulación climática utilizada, como a los datos observados provenientes de seis estaciones meteorológicas.



Figura 1.5: Mapa del área de estudio. Los puntos amarillos representan la localización de las estaciones meteorológicas seleccionadas para este trabajo y las estrellas rojas indican puntos de referencia general.

## 1.3. Modelación numérica de la atmósfera

Los procesos que actúan en el sistema climático se pueden representar mediante términos matemáticos, pero la complejidad del sistema implica que los cálculos sean mucho más eficientes gracias a computadores, en los cuales la formulación matemática se realiza a través de modelos. Estos modelos deben contener suficientes elementos de los componentes del sistema climático para efectuar simulaciones del clima de forma óptima. La modelación numérica es una herramienta computacional basada en el cálculo numérico que asume diversas suposiciones físicas y que da la posibilidad de conocer el pasado o pronosticar el futuro y ha sido de gran utilidad en los últimos años dado el interés de comprender como afectará al sistema Tierra las fluctuaciones en el clima.

Cuando se desea hacer una proyección futura del clima, los Modelos Climáticos Globales (o GCMs) son una muy buena herramienta (Huebener et al., 2007). El desarrollo de los GCMs tiene una historia de varias décadas y proporcionan una forma única de modelar físicamente el clima global y su variabilidad (Meehl et al., 2007; Reichler y Kim, 2008). A medida que el cambio climático inducido por el hombre ha atraído una mayor atención social, los GCMs se han convertido en herramientas muy importantes (Solomon et al., 2007). Los GCMs operan a resoluciones espaciales cercanas a los 200 [km], lo que provoca que pierdan precisión a mayor resolución espacial para las diferentes variables que son influenciadas por la dinámica y topografía local, tales como la precipitación, el viento en superficie y la temperatura. Para resolver este desajuste, se han desarrollado diferentes estrategias que permiten inferir información de alta resolución a partir de las variables de baja resolución, es decir, proyectar de forma precisa la información disponible a gran escala sobre la escala regional (Von Storch et al., 1993). Lo anteriormente descrito se conoce como técnicas de downscaling o de regionalización.

Existen dos clasificaciones para realizar un downscaling: dinámico y estadístico. En el denominado downscaling dinámico (Giorgi y Francisco, 2000; Christensen et al., 2007), los campos de alta resolución se obtienen anidando un modelo climático regional (RCM) dentro del GCM (Giorgi et al., 1994; Jones et al., 1997). En el downscaling estadístico (Wilby et al., 2004; Imbert y Benestad, 2005), las variables de superficie de alta resolución se obtienen aplicando relaciones previamente identificadas en el clima observado entre las variables y campos de gran escala a las salidas de los GCMs. La capacidad de los RCMs para proyectar cambios climáticos regionales ha sido reconocida como una necesidad urgente en el IPCC (Solomon et al., 2007). Los RCMs han sido utilizados para simulaciones climáticas regionales en distintas partes del mundo.

### **1.4.** Antecedentes generales

#### 1.4.1. Simulaciones climáticas para Chile

Para Chile se han publicado dos estudios principales que dan cuenta de la variabilidad climática futura. En el año 2006, el Departamento de Geofísica (DGF) de la Universidad de Chile, llevó a cabo el proyecto *Estudio de Variabilidad Climática en Chile para el Siglo XXI*, realizando una estimación de escenarios climáticos para diferentes regiones de Chile durante el siglo XXI a través del modelo regional PRECIS, cubriendo todo el territorio nacional con una resolución espacial de 25 [km]. El otro estudio, fue desarrollado por la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) el año 2015, en donde se trabajó con el modelo regional WRF, a una resolución de 25 [km] para todo el territorio nacional. En ambos estudios, fue necesario simular el clima actual (periodo base o hindcast), a modo de poder comparar las salidas de las simulaciones futuras con un periodo de referencia sustentado en observaciones.

En las simulaciones realizadas por el DGF se simula el clima actual entre 1960-1990, además escenarios posibles en el futuro entre los años 2070-2100. Estas proyecciones se hacen bajo un escenario representativo de emisiones de GEI, llamado A2, que corresponde al escenario más severo. Este estudio proyecta, para el caso de las temperaturas, un incremento generalizado a lo largo de Chile continental, evidenciándose un mayor aumento sobre la cordillera de los Andes. Para el caso de la precipitación se observa una disminución considerable en la precipitación acumulada anual para la zona centro-sur de Chile, caso contrario a lo que ocurre en la zona austral del territorio nacional, donde se aprecia un aumento en esta variable (Garreaud, 2011).

Por otra parte, en las simulaciones llevadas a cabo por la DMC se simula el clima actual (hindcast) entre los años 1970-1999. Las proyecciones futuras se realizan entre los años 2030-2050 y bajo dos escenarios de emisiones: RCP 2.6 y RCP 8.5, correspondientes a un escenario moderado y a otro severo respectivamente, esto con la finalidad de hacer una comparación entre ambos. En la comparación de resultados, para la precipitación se tiene que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los escenarios, a pesar de que se corrobora que la cantidad futura de precipitación variará; se espera un descenso en las precipitaciones anuales en la zona centro-sur del país y un aumento en la zona austral. Para el caso de la temperatura se observan diferencias entre los distintos escenarios, existiendo un incremento en esta variable para todo el territorio (Alcafuz et al., 2015).

#### 1.4.2. Variabilidad climática histórica en Magallanes

Estudios han abordado el análisis de la variabilidad tanto de precipitación como de temperatura para la región de Magallanes. Para el caso de la precipitación, en la región existen estudios que se han enfocado en determinar patrones espacio temporales a lo largo de Patagonia, a modo de establecer una relación con forzantes climáticos de escala global (Thompson y Wallace, 2000; Schneider y Gies, 2004; Aravena y Luckman, 2009), además se han evaluado cambios temporales en la precipitación a escala regional (Aravena y Luckman, 2009). Recientemente, se llevó a cabo una evaluación de las tendencias de la precipitación de Punta Arenas a escala anual y estacional a lo largo de todo el siglo XX (Fig. 1.6) (González et al., 2017).



Figura 1.6: Precipitación anual acumulada en la ciudad de Punta Arenas entre los años 1900-2014 (González et al., 2017).

González (2017) concluye que desde el año 1900 la precipitación anual acumulada en Punta Arenas muestra una tendencia negativa y significativa. Además, se observó durante todo el siglo XX e inicios del siglo XXI, una fuerte fluctuación temporal a escala decadal a multidecadal. Con respecto al análisis estacional, la precipitación durante los meses de invierno muestra un aumento significativo desde el año 1990 a la fecha. Durante la primavera y verano se aprecia una disminución significativa en esta variable, acentuada entre los años 1990-2014.

Santana (2009) presentó y analizó una serie de temperaturas históricas para Punta Arenas, correspondientes a 120 años. Algunos de estos datos fueron deducidos y otros obtenidas instrumentalmente, para el periodo 1888-2007. A través del análisis de las variaciones en esta variable, se obtuvo que la temperatura media muestra una tendencia casi estable con una leve inclinación al enfriamiento, mientras que las máximas tienden a incrementar y las mínimas a decrecer. En general, se observa que han ocurrido periodos de alta y de bajas temperaturas en torno al valor medio, durante distintos periodos, fluctuaciones que evidencian la variabilidad existente (Fig. 1.7).



Figura 1.7: Promedio de la temperatura mensual en Punta Arenas entre los años 1888-2007 (Santana et al., 2009).

# 2. Hipótesis y Objetivos

## 2.1. Hipótesis

El modelo realizado por la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), utilizando el modelo global MIROC5 acoplado con el modelo regional WRF, es capaz de reconstruir el clima local en Fuego-Patagonia y representar su variabilidad, con un nivel de precisión en el error de la precipitación entre 300-600 [mm] y de 2-3 [°C] para la temperatura media.

# 2.2. Objetivos

#### **Objetivo General**

 Realizar un análisis comparativo entre el período base (hindcast) del modelo de reducción de escala (downscaling) de MIROC5 acoplado con WRF y datos de estaciones meteorológicas.

#### **Objetivos Específicos**

- 1. Observar la distribución empírica de las series observadas, así como también la distribución de las series simuladas.
- 2. Describir la tendencia en precipitación y temperatura, a partir de estudios previamente realizados y mediciones, enfocado en Fuego-Patagonia.
- 3. Verificar la habilidad del modelo downscaling en simular el clima de Fuego-Patagonia, a través de la compilación de series temporales de datos climáticos.

# 3. Metodología

# 3.1. Simulación Climática

Se tienen salidas de simulaciones climáticas llevadas a cabo por la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), para un periodo base o hindcast, entre los años 1970-1999 (Alcafuz et al., 2015). De estas se extrajo una zona de interés, generándose así un nuevo dominio.

WRF (Weather Research and Forecasting) es un modelo de mesoescala desarrollado por NCAR (National Center for Atmospheric Research) y sobre el que trabaja activamente gran parte de la comunidad científica internacional en temas relacionados con la atmósfera (Anexo A).En la investigación de la DMC se usa el modelo regional WRF (Skamarock et al., 2005) para anidarlo dentro del modelo japonés MIROC5 (Model for Interdisciplinary Research on Climate 5) (Watanabe et al., 2010), el que pertenece al Proyecto CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) (Taylor et al., 2012) (Anexo B). Se simuló la climatología reciente de Chile, con el fin de comparar los resultados con las observaciones que se encuentran disponibles para el territorio nacional, a modo de generar una idea de los posibles errores del modelo climático global y del modelo de alta resolución. La Figura 3.8 muestra un esquema de procedimiento realizado.



Figura 3.8: Esquema que muestra el procedimiento para realizar las simulaciones del hindcast. Los datos de MIROC5 son ingresados al modelo de alta resolución WRF, donde son procesados por los diferentes módulos del programa. El resultado final es el hindcast en el período 1970-1999. Fuente: Modificado de Alcafuz et al., 2015.

Para realizar el estudio, la DMC simuló un dominio principal y un dominio anidado, con una resolución espacial de 75 [km] y 25 [km] respectivamente (Fig. 3.9), con el objetivo de producir una transición más suave desde las condiciones de borde laterales suministradas por MIROC5. Los resultados de la DMC se obtuvieron a través de la evaluación del segundo dominio, el que consta de 70 puntos de grilla en la dirección oeste-este y de 193 en la dirección norte-sur, con una resolución vertical definida por 45 niveles sigma y el tope de la atmósfera se fija en 50 [hPa].



Figura 3.9: Cobertura geográfica de los dominios utilizados en la simnulación climática de la DMC. Fuente: Alcafuz et al., 2015.

La tabla 3.1 muestra las parametrizaciones físicas utilizadas para llevar a cabo las simulaciones de la DMC.

Tabla 3.1:	Parametrizaciones	físicas escog	gidas para el	modelo DMC	(Fuente:	Alcafuz et
al., 2015).						

Opciones Físicas - Modelo WRF DMC					
	Esquema	Opción			
mp_physics	WRF Single–moment 3–class and 5–class Schemes	3			
ra_lw_physics	RRTM Longwave Scheme				
ra_sw_physics	Dudhia Shortwave Scheme				
sf_sfclay_physics	MM5 Similarity Scheme				
sf_surface_physics	Unified Noah Land Surface Model				
bl_pbl_physics	Yonsei University Scheme (YSU)				
cu_physics	Moisture–advection–based Trigger for Kain–Fritsch Cu-				
	mulus Scheme				

A partir de las salidas climáticas obtenidas por la DMC se generó un nuevo dominio de interés; a través de comandos bash se realizó un recorte del dominio anteriormente mostrado en la Figura 3.9. El dominio final para realizar este trabajo se muestra en la Figura 3.10.



Figura 3.10: Dominio principal en el presente estudio.

### 3.2. Datos observados

Para el territorio que comprende la región de Magallanes, existen múltiples instituciones u organismos que se encargan de recolectar y mantener bases de datos, obtenidos mediante estaciones meteorológicas propias. Entre estas instituciones se encuentra la oficina regional de la Dirección General de Aguas (DGA), la oficina regional de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), el Servicio Meteorológico de la Armada de Chile, sede Punta Arenas y el Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA).

Hay disponibles catálogos de datos en internet para libre disposición de los usuarios. Muy útil, fácil de manejar y/o visualizar es el Explorador Climático del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2) de la Universidad de Chile, fuente utilizada para este trabajo, al cual se puede acceder mediante el siguiente enlace: http://explorador.cr2.cl/. El CR2 permite acceder a bases de datos de relevancia climática que contienen datos de la DGA y de la DMC, los que se utilizan para analizar tendencias, estudiar fenómenos específicos y validar simulaciones numéricas. Para la región de Magallanes, los datos corresponden a series de tiempo registradas a través de instrumentos in situ o remotos para un total de 80 estaciones (Anexo C). Para el presente trabajo se accedió a las siguientes bases de datos:

- Archivos con valores mensuales de precipitación en estaciones nacionales, desde enero 1900 a diciembre 2017.
- Datos nacionales observados de temperatura media mensual medidos desde enero 1900 a diciembre 2017.

A partir de las bases de datos, se generó un filtro desde 50 ° de latitud hacia el sur y otro filtro para el rango que comprende el periodo de interés, es decir, 1988-1999. Luego, para un total de 80 estaciones localizadas en la región, se procedio a seleccionar las que serían de utilidad para realizar la validación del modelo. El criterio de selección fue el siguiente:

- En primer lugar se generaron tablas para observar la distribución temporal de los datos, tanto para la variable precipitación acumulada como para temperatura media (Anexo C).
- Estas tablas permitieron hacer una inspección visual y conocer qué estaciones presentaban un mayor registro de datos válidos para el periodo y variables de interés, lo que redujo el número de estaciones a un total de 14.

 El rango de años debía coincidir para ambas variables, filtro que redujo el número de estaciones a 6, cantidad con las que finalmente se trabajó. La localización de estas se muestra en la Figura 3.11.

Se tiene que dos estaciones se ubican en la provincia de Última Esperanza (Torres del Paine y Puerto Natales), otras dos en la provincia de Tierra del Fuego (Bahía San Felipe y Porvenir) y las dos últimas en la provincia de Magallanes (Punta Arenas DMC y Punta Arenas DGA).



Figura 3.11: Localización de las estaciones meteorológicas utilizadas para la validación.

Estaciones meteorológicas						
Estación	Fuente	Latitud	Longitud	Altitud		
Torres del Paine	DGA	$51,1842^{\circ}S$	72,9669° <i>O</i>	25 msnm		
Puerto Natales	DGA	$51,7336^{\circ}S$	72,4781° $O$	45 msnm		
Bahía San Felipe	DGA	$52,\!8697^{\circ}S$	$69,9319^{\circ}O$	10 msnm		
Punta Arenas	DMC	$53,\!0033^{\circ}S$	$70,845^{\circ}O$	38 msnm		
Punta Arenas	DGA	$53,\!1233^{\circ}S$	$70,8772^{\circ}O$	5 msnm		
Porvenir	DMC	$53,\!1875^{\circ}S$	$70,3203^{\circ}O$	27 msnm		

Tabla 3.2: Información de estaciones meteorológicas utilizadas para la validación.

# 3.3. Validación

La validación es un aspecto relevante cuando se lleva a cabo una modelación. Los métodos de verificación tienen como principal objetivo evaluar la calidad de una simulación o predicción. Consiste en hacer una comparación entre resultados observados y aquellos que se obtienen mediante el modelo. Si las soluciones del modelo están bien correspondidas en lugares donde existen observaciones disponibles, entonces habrá un mayor grado de confiabilidad.

En algunos casos se podrían obtener resultados no esperados, como por ejemplo, observar una sobreestimación o una subestimación de la realidad. A través de la validación se descubre y observa si hay deficiencias en las parametrizaciones físicas utilizadas, permitiendo incluso concluir si el modelo es o no apropiado para representar lo que se desea investigar. La validación de modelos numéricos es importante para poder verificar la veracidad de los resultados y analizar si el estudio es coherente y representativo.

En primer lugar, con el objeto de conocer el comportamiento anual y estacional medio de cada una de las variables de interés, se procedió a calcular la climatología de las series de datos utilizadas. Luego se realizaron análisis de distribución y de series de tiempo, los que se detallan a continuación.

#### 3.3.1. Distribución

Con el objetivo de realizar una evaluación del desempeño del modelo, se compara las salidas de este con datos observados de precipitación acumulada y temperatura media. El primer análisis se realiza mediante figuras que combinan cuatro estadísticos, las que tienen como finalidad generar una visualización de la distribución de los datos. Los estadísticos utilizados son: histograma, estimación de la densidad de Kernel (KDE), diagrama de caja o boxplot y función de distribución acumulada (CDF). Lo anterior se realiza para las seis estaciones, para las dos variables de interés, tanto para los serie observada como simulada, en el período comprendido entre 1988-1999. A continuación una descripción de los estadísticos:

#### Histograma:

Es una gráfica de la distribución de un conjunto de datos, que muestra la acumulación o tendencia, la variabilidad o dispersión y su respectiva forma de distribución, es decir, gracias a este, es posible mostrar gráficamente la distribución de una variable cuantitativa o numérica. Los datos se agrupan en intervalos de igual tamaño, llamados clases. En términos matemáticos, puede ser definida como una función inyectiva que acumula (cuenta) las observaciones que pertenecen a cada subintervalo de una partición. En este caso, se agruparon los datos contenidos en el periodo 1988-1999, para las variables precipitación acumulada mensual y temperatura media mensual. Los histogramas de frecuencia permiten diagnosticar qué rangos de datos son los más frecuentes en las estaciones evaluadas y en los datos simulados.

#### • Estimación de la densidad de Kernel (KDE):

La estimación de densidad de Kernel o KDE es una forma no paramétrica para estimar la función de densidad de probabilidad (PDF) de una variable aleatoria, con una muestra finita de datos y está estrechamente relacionada con el histograma. Dada la muestra de n observaciones reales  $X_1,...,X_n$  se define la estimación de densidad de Kernel de la siguiente manera:

$$KDE = \hat{f}_n(x) = \frac{1}{nh_n} \sum_{i=1}^N K\left(\frac{x - X_i}{h}\right)$$

donde:

- K(x) es la función de Kernel, una función simétrica (pero no necesariamente positiva) que integra a uno.

-  $h_n$  denominado normalmente ancho de ventana, es un valor que representa el área de influencia que se le pretende dar a cada valor muestral y corresponde a una secuencia de constantes positivas.

#### Boxplot:

El diagrama de caja o boxplot es una presentación visual que describe al mismo tiempo varias características importantes de un conjunto de datos, entre ellas: la mediana de los datos, la dispersión de los datos, la simetría o asimetría. Además permite observar los datos extremos o atípicos. El boxplot representa los tres cuartiles y los valores mínimo y máximo de los datos, permitiendo visualizar la distribución de un conjunto de datos.

#### • Función de distribución acumulada (CDF):

La función de distribución acumulada o CDF es una función de la variable aleatoria X, dada por la integral de la función densidad de probabilidad (PDF) hasta un valor particular de x. Por lo tanto, la CDF especifica probabilidades de que la cantidad aleatoria X no exceda ciertos valores particulares (Wilks, 2011). Convencionalmente, los CDF se denotan como sigue:

$$CDF = F(x) = Pr\{X \le x\} = \int_{X \le x} f(x) \, dx$$
 (3.1)

Donde la integración se realiza desde el valor mínimo permitido de X hasta el valor particular x, que corresponde al argumento de la función. Se tiene que los valores de F(x) son probabilidades, tales que  $0 \le F(x) \le 1$  (Wilks, 2011).

A través de curvas de probabilidades acumuladas es posible estimar la posibilidad de excedencia de algún valor por sobre cierto umbral predeterminado que sea de interés (Alcafuz et al., 2015). Es importante comparar las curvas de probabilidades con el objetivo de saber el grado de acuerdo entre ambas.

#### 3.3.2. Series de tiempo

Se generaron series de tiempo que contienen datos que contemplan el periodo 1988-1999. Se generó una representación de los promedios anuales, para la variable precipitación acumulada y temperatura, tanto para los datos provenientes de estaciones meterológicas, como para la data entregada por el modelo. Para las seis estaciones, se graficaron ambas series (observada y simulada). Además, se graficó los qqplot o gráficos cuantil-cuantil, los que permiten comparar la distribución de dos conjuntos de datos y para apoyar esta representación se obtuvo los diagramas de dispersión. Adicionalmente, se realizó el respectivo diagrama de Taylor y se graficó el histograma de las diferencias. Posteriormente, se realizó una validación mediante los siguientes estadísticos:

• Error de Sesgo: Corresponde a un indicador de un error sistemático que está ocurriendo de igual modo en todos los valores simulados de una variable respecto de la serie de control. Permite identificar si la variable simulada se encuentra sobrestimada o subestimada según su valor sea positivo o negativo respectivamente. Su valor se obtiene del promedio de la resta de las observaciones  $(Y_k)$  a los valores

simulados  $(X_k)$ , con N número total de datos.

$$SESGO_{yx} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N} \left( Y_k - X_k \right)$$

#### Coeficiente de correlación de Pearson:

Medida que indica como covarían los resultados simulados en relación con los observados, permitiendo identificar el desfase de las series. Se define como el cociente entre las covarianzas de Y y X y el producto de las desviacoines estándar  $(s_y y s_x)$  de cada cada variable.

$$r_{yx} = \frac{cov_{yx}}{s_y s_x} = \frac{\sum_{k=1}^{N} (Y_k - \bar{Y})(X_k - \bar{X})}{\sum_{k=1}^{N} (Y_k - \bar{Y}) \sum_{k=1}^{N} (X_k - \bar{X})}$$

Los valores que toma la correlación varían entre -1 y 1, pudiendose presentar los siguientes casos:

-  $r_{xy} = 1$ , la correlación existe, siendo positiva y perfecta, es decir, si la varible observada aumenta, la simulada tambien lo hace y viceversa.

- 0 <  $r_{xy}$  < 1, la correlación existe, sin embargo, no es perfecta. Mientras más cercano a 1 sea su valor, la correlación será mejor.

-  $r_{xy} = 0$ , no exite una correlación entre la variable simulada y la observada.

-  $-1 < r_{xy} < 0$ , la correlación existe, pero en contrafase. Mientras más cercano a -1 sea su valor, mayór será su correlación.

-  $r_{xy} = -1$ , existe una correlación negativa perfecta, es decir, las variables en cuestión varían en contrafase.

#### Cociente entre las desviaciones estándar:

Indice que permite resolver si el modelo se encuentra subestimando o sobrestimando la amplitud de los datos. Si el valor es mayor a 1, entonces hay una sobrestimación, mientras que si presenta valores entre 0 y 1, existe una subestimación. Entre más cercano a 1 sea su valor, la amplitud de los datos simulados será aun más similar.

$$COCIENTE_{s_y s_x} = \frac{s_y}{s_x} = \frac{\sum_{k=1}^{N} (Y_k - \bar{Y})}{\sum_{k=1}^{N} (X_k - \bar{X})}$$

#### • Raíz del error cuadrático medio (RMSE):

Este indicador entrega el error total de la modelación en base a la simulación. Los tres términos dentro de la raíz correspongen al sesgo del promedio, al sesgo de la desviación estándar y al error de dispersión, respectivamente.

$$RMSE_{yx} = \sqrt{(\bar{Y} - \bar{X}) + (s_y - s_x) + 2s_y s_x (1 - r_{xy})}$$

### 3.3.3. Proyectiones

Se obtuvo las tendencias con su respectiva significancia a partir de salidas del modelo cada 6 h para el periodo 1988-1999. Para determinar la significancia estadística de las tendencias entre lo simulado y lo observado, se utilizó el test de Monte Carlo, el cual consiste en remuestrear el conjunto de datos originales, utilizados para obtener el estadístico de interés, para luego estimar la distribución nula y comparar el estadístico usando los datos originales (Wilks, 2011). Se empleó un nivel del confianza del 95 %, lo que significa que el estadístico de prueba será considerado significativo solo si su valor es menor al 2.5 % o mayor al 97.5 % de los valores obtenidos mediante el conjunto de datos artificiales.

# 4. Resultados

En esta sección se exponen los resultados obtenidos en la etapa de evaluación de series de datos de precipitación acumulada y temperatura media, provenientes tanto de estaciones meteorológicas, como de salidas de modelo, para el periodo 1988-1999.

Para los 12 años en estudio y para cada una de las estaciones de interés, se presenta el ciclo anual y el ciclo estacional. En seguida se realiza una inspección de las series de datos, a través de un análisis de distribución. Luego se muestra un análisis de las series de tiempo, a modo de validar lo simulado con lo observado. Posteriormente, se presentan las series de tiempo, los diagramas de dispersión, los histogramas de las diferencias y el respectivo diagrama de Taylor. Al mismo tiempo, se adjuntan tablas con estadísticos que relacionan la serie simulada con la serie observada. Finalmente, mediante las salidas del modelo, se muestra una proyección en base a tendencias de temperaturas.

## 4.1. Ciclo anual y ciclo estacional

Para el periodo de interés (1988-1999), se muestra el ciclo anual (Fig. 4.12) y el ciclo estacional (Fig. 4.13), de las variables temperatura media [°C] y precipitación acumulada [mm/mes]. En las gráficas se identifican las series observadas, simuladas y la diferencia entre ambas.


Figura 4.12: Ciclo anual de precipitación acumulada mensual (1) y temperatura media (2), para el periodo 1988-1999. En azul la serie observada, en rojo la simulada y en negro la diferencia entre ambas.



Figura 4.13: Ciclo estacional de precipitación acumulada mensual (1) y temperatura media (2), para el periodo 1988-1999. En azul la serie observada, en rojo la simulada y en negro la diferencia entre ambas.

Para el ciclo anual de precipitación acumulada (Fig. 4.12.1), no existe un ciclo anual distinguible entre las estaciones, mostrando todas ellas un comportamiento diferente. Existe una sobrestimación de la precipitación a lo largo de todos los meses para todas las estaciones. Se muestra que el ciclo anual no es respetado por la simulación y no se observa un patrón común en los mínimos o máximos de precipitación; los valores extremos simulados no se condicen con los valores extremos reales.

Para el caso del ciclo anual de temperatura (Figura 4.12.2), se distingue un ciclo anual, siendo más frío en invierno y más cálido en verano. Se aprecia que el ciclo anual si es modelado, sin embargo en la gran mayoría de las estaciones se evidencia una disminución en la amplitud. Al mismo tiempo, se aprecia que el modelo subestima las temperaturas medias máximas en los meses de verano, mientras que en varias estaciones, la temperatura es sobrestimada en los meses de invierno, lo que se observa con mayor claridad en el gráfico, mediante la línea que arroja la diferencia entre las temperaturas  $(T_{sim} - T_{obs})$ .

Para el ciclo estacional de precipitación acumulada, se tiene un acentuamiento de las diferencias entre las observaciones y la simulación (Fig. 4.13.1). Se distinguen los máximos de precipitación observadas, durante los meses MAM (Marzo-Abril-Mayo) y en su mayoría los mínimos durante los meses de invierno JJA (Junio-Julio-Agosto), pero estos mínimos y máximos no son bien representados por el modelo, el que en general no muestra un ciclo estacional claro para definir los extremos.

Para el caso del ciclo estacional de temperatura, se distingue un ciclo estacional y una alta correspondencia entre la serie observada y simulada (Fig. 4.13.2). Los máximos de temperatura se alcanzan en los meses DEF (Diciembre-Enero-Febrero) y los mínimos en los meses JJA (Junio-Julio-Agosto). Si bien se observa un compartamiento similar entre estaciones, se tiene que el modelo sobrestima la temperatura en tres estaciones y subestima en otras tres, siendo la diferencia más grande cercana a 5 [°C].

## 4.2. Distribución

A continuación se presentan figuras que muestran la combinación de histograma, estimación de la densidad de Kernel (KDE), boxplot y función de distribución acumulada (CDF) para visualizar la distribución de los datos. Las gráficas adjuntas muestran la distribución de la precipitación acumulada y la temperatura media, tanto para la simulación como para los datos observados. Cada set de cuatro gráficas corresponde a cada una de las estaciones meteorológicas (Figs. 4.14 - 4.19), en donde las figuras superiores (1 y 2) se obtuvieron a partir de los datos de precipitación acumulada mensual, mientras que las figuras inferiores (3 y 4), corresponden a aquellas producto de la temperatura media mensual. El análisis contempla datos para el periodo 1988-1999.



Figura 4.14: Visualización de la distribución de los datos a través de la combinación de histograma, estimación de la densidad de Kernel (KDE), boxplot y función de distribución acumulada (CDF). El set de figuras corresponde a la distribución en la estación Torres del Paine, siendo las figuras superiores (1 y 2) obtenidas a partir de los datos de precipitación acumulada, mientras que las de la parte inferior (3 y 4) son producto de las temperaturas. Se tiene que el color azul representa lo observado y el color rojo lo simulado. El análisis contempla datos para el periodo 1988-1999.

Para la estación Torres del Paine, al observar los gráficos para precipitación acumulada (Fig. 4.14.1), se aprecia que poseen una distribución normal o gaussiana. Lo anterior, se valida mediante el análisis de los diagramas de caja, donde los datos se presentan de forma simétrica. Puede observarse que la distribución de los datos simulados es mayor a la de los observados, es decir, poseen mayor dispersión. En cuanto a las medias se observa que poseen notoria diferencia entre lo observado y lo simulado, siendo la media de lo simulado la de mayor valor. En ambos casos se observan puntos atípicos. Por otra parte, la CDF muestra una amplitud de la distribución similar para los datos del modelo y los datos observados, además se puede distinguir el sesgo existente en precipitación, dado que la línea roja se encuentra más a la derecha (Fig. 4.14.2).

Para los gráficos de temperatura (Fig. 4.14.3), se aprecia que poseen una distribución de tipo bimodal, lo que gráficamente se explica al observar que la distribución posee dos puntos máximos en la curva. De los diagramas de caja, se tiene que los datos no se presentan de forma asimétrica, pero si presentan una leve tendencia hacia la derecha. Puede observarse que la distribución de los datos simulados es menor a la de observados, por lo que poseen una menor dispersión. En cuanto a las medias se observa una leve diferencia entre ambas muestras, presentando valores mayores la serie observada. No se aprecian puntos atípicos para el caso de las temperaturas; para esta variable, se observa una menor amplitud de la distribución de datos modelados y se tiene que existe un sesgo frío, dado que el desfase se da hacia la izquierda (Figura 4.14.4).



Figura 4.15: Visualización de la distribución de los datos a través de la combinación de histograma, estimación de la densidad de Kernel (KDE), boxplot y función de distribución acumulada (CDF). El set de figuras corresponde a la distribución en la estación Puerto Natales, siendo las figuras superiores (1 y 2) obtenidas a partir de los datos de precipitación acumulada, mientras que las de la parte inferior (3 y 4) son producto de las temperaturas. Se tiene que el color azul representa lo observado y el color rojo lo simulado. El análisis contempla datos para el periodo 1988-1999.

Para la estación Puerto Natales, al observar los gráficos para precipitación acumulada (Fig. 4.15.1), se aprecia que poseen una distribución de tipo asimétrica positiva, lo que gráficamente se explica al observar que la distribución apunta hacia la derecha y la campana hacia la izquierda. Lo anterior se valida mediante el análisis de los diagramas de caja, donde los datos se presentan de forma asimétrica con tendencia hacia la izquierda. Puede observarse que la distribución de los datos observados es mayor a la de los simulados, por lo tanto poseen mayor dispersión. En cuanto a las medias se observa que poseen notoria diferencia entre lo observado y lo simulado, siendo la media de lo simulado la de mayor valor. La distribución acumulada de precipitaciones (Figura 4.15.2), muestra una sobrestimación por parte del modelo, además se observa una amplitud semejante entre modelo y datos, pero desfasada.

Para los gráficos de temperatura (Fig. 4.15.3), se aprecia que poseen una distribución de tipo bimodal, lo que gráficamente se explica al observar que la distribución posee dos puntos máximos en la curva. Puede observarse que la distribución de los datos simulados es menor a la de los datos observados, por lo que presentan una menor dispersión. En cuanto a las medias se observa una leve diferencia entre ambas muestras, en donde lo simulado muestra un mayor valor. No se aprecian puntos atípicos para el caso de las temperaturas. Además, se tiene que el modelo sobrestima la mayoría de los valores y no se aprecia un ajuste entre observaciones y modelo, ni para valores centrales ni extremos (Fig. 4.15.4).



Figura 4.16: Visualización de la distribución de los datos a través de la combinación de histograma, estimación de la densidad de Kernel (KDE), boxplot y función de distribución acumulada (CDF). El set de figuras corresponde a la distribución en la estación Bahía San Felipe, siendo las figuras superiores (1 y 2) obtenidas a partir de los datos de precipitación acumulada, mientras que las de la parte inferior (3 y 4) son producto de las temperatura. Se tiene que el color azul representa lo observado y el color rojo lo simulado. El análisis contempla datos para el periodo 1988-1999.

Para la estación Bahía San Felipe, al observar los gráficos de precipitación acumulada (Fig. 4.16.1), se aprecia que poseen una distribución de tipo asimétrica positiva; si bien para el caso de la distribución de la serie simulada forma casi una campana perfecta de distribución normal, no lo logra ya que posee tendencia hacia la izquierda. En tanto, para el caso de la serie observada, se observa que la distribución apunta hacia la derecha y la campana hacia la izquierda. Lo anterior se valida mediante el análisis de los diagramas de caja, donde los datos se presentan de forma asimétrica con tendencia hacia la izquierda. Se distingue que la distribución de los datos simulados es mayor a la de los observados, es decir, presentan una mayor dispersión. En cuanto a las medias se observa que poseen notoria diferencia entre lo observado y lo simulado, siendo la media de lo simulado la de mayor valor. En ambos casos se se presentan puntos atípicos. Con respecto a la CDF de precipitación (Fig. 4.16.2), se tiene una cierta concordancia en el valor mínimo, pero un desajuste en los valores máximo, sin embargo se distingue una sobrestimación del modelo y un sesgo húmedo.

Para los gráficos de temperatura (Fig. 4.16.3), se aprecia que poseen una distribución de tipo bimodal, lo que gráficamente se explica dado que posee dos puntos máximos en la curva. Al observar los diagramas de caja, se tiene que los datos no se presentan de forma asimétrica, pero si se observa una leve tendencia hacia la derecha. Se tiene que la distribución de los datos simulados es menor a la de los datos observados, por lo que poseen una menor dispersión. En cuanto a las medias existe una leve diferencia entre ambas muestras, siendo la serie observada la que presenta un valor mayor. No se aprecian puntos atípicos para el caso de las temperaturas. Con respecto a la CDF de temperaturas (Fig. 4.16.4), hay una mayor coincidencia para los valores mínimos, pero un desajuste para los valores máximos, alcanzándose una mayor amplitud entre observaciones y modelo. En general se presenta un sesgo frio.



Figura 4.17: Visualización de la distribución de los datos a través de la combinación de histograma, estimación de la densidad de Kernel (KDE), boxplot y función de distribución acumulada (CDF). El set de figuras corresponde a la distribución en la estación Punta Arenas DMC, siendo las figuras superiores (1 y 2) obtenidas a partir de los datos de precipitación acumulada, mientras que las de la parte inferior (3 y 4) son producto de las temperaturas. Se tiene que el color azul representa lo observado y el color rojo lo simulado. El análisis contempla datos para el periodo 1988-1999.

Para la estación Punta Arenas DMC, al observar los gráficos para precipitación acumulada (Fig. 4.17.1), se aprecia que poseen una distribución de tipo asimétrica positiva, lo que gráficamente se explica ya que distribución apunta hacia la derecha y la campana hacia la izquierda. Lo anterior se valida mediante el análisis de los diagramas de caja, donde los datos se presentan de forma asimétrica con tendencia hacia la izquierda. Puede observarse que la distribución de los datos simulados es mayor a la de los observados, por lo tanto presentan una mayor dispersión. En cuanto a las medias se observa que poseen notoria diferencia entre lo observado y lo simulado, siendo la media de lo simulado la de mayor valor. En ambos casos se presentan puntos atípicos. Con respecto a la distribución acumulada de precipitaciones (Fig. 4.17.2) se observa una sobreestimación del modelo.

Para los gráficos de temperatura (Figura 4.17.3), se tiene una distribución de tipo bimodal, lo que gráficamente se explica ya que la distribución posee dos puntos máximos en la curva. Al observar los diagramas de caja, los datos no se presentan de forma asimétrica, pero si presentan una leve tendencia hacia la derecha. Se tiene que la distribución de los datos simulados es menor a la de observados, es decir, presentan una menor dispersión. En cuanto a las medias se observa una leve diferencia entre ambas muestras, siendo lo simulado lo que presenta un valor mayor. No se aprecian puntos atípicos para el caso de las temperaturas. En general, no se observa un buen acuerdo entre lo simulado y lo observado; el modelo sobrestima algunos valores y subestima otros (Figura 4.17.4).



Figura 4.18: Visualización de la distribución de los datos a través de la combinación de histograma, estimación de la densidad de Kernel (KDE), boxplot y función de distribución acumulada (CDF). El set de figuras corresponde a la distribución en la estación Punta Arenas DGA, siendo las figuras superiores (1 y 2) obtenidas a partir de los datos de precipitación acumulada, mientras que las de la parte inferior (3 y 4) son producto de las temperaturas. Se tiene que el color azul representa lo observado y el color rojo lo simulado. El análisis contempla datos para el periodo 1988-1999.

Para la estación Punta Arenas DGA (Fig. 4.18), el comportamiento es similar a Punta Arenas DMC (Fig. 4.17). Al observar los gráficos para precipitación acumulada (Fig. 4.18.1), se aprecia que poseen una distribución de tipo asimétrica positiva, lo que gráficamente se explica ya que la distribución apunta hacia la derecha y la campana hacia la izquierda, lo que se valida mediante el análisis de los diagramas de caja, donde los datos se presentan de forma asimétrica con tendencia hacia la izquierda. Puede observarse que la distribución de los datos simulados es mayor a la de los observados, es decir, poseen mayor dispersión. En cuanto a las medias se observa que poseen notoria diferencia entre lo observado y lo simulado, siendo la media de lo simulado la de mayor valor. En ambos casos se observa puntos atípicos. Para la CDF de precipitaciones (Fig. 4.18.2) se observa una sobreestimación del modelo y se puede distinguir el sesgo existente, dado que la línea roja se encuentra más a la derecha.

Para los gráficos de temperatura (Fig. 4.18.3), se aprecia que poseen una distribución de tipo bimodal, lo que gráficamente se explica ya que la distribución muestra dos puntos máximos en la curva. Puede observarse que la distribución de los datos simulados es menor a la de observados, por lo tanto presentan una menor dispersión. En cuanto a las medias se observa una leve diferencia entre ambas muestras, siendo la serie simulada la que presenta un valor mayor. No se aprecian puntos atípicos para el caso de las temperaturas. Para la CDF, no se observa una ajuste continuo entre lo simulado y lo observado (Figura 4.18.4).



Figura 4.19: Visualización de la distribución de los datos a través de la combinación de histograma, estimación de la densidad de Kernel (KDE), boxplot y función de distribución acumulada (CDF). El set de figuras corresponde a la distribución en la estación Porvenir, siendo las figuras superiores (1 y 2) obtenidas a partir de los datos de precipitación acumulada, mientras que las de la parte inferior (3 y 4) son producto de las temperaturas. Se tiene que el color azul representa lo observado y el color rojo lo simulado. El análisis contempla datos para el periodo 1988-1999.

Para la estación Porvenir, al observar los gráficos de precipitación acumulada (Fig. 4.19.1), se aprecia que poseen una distribución de tipo asimétrica positiva. Para el caso de la distribución de la serie simulada forma casi una campana perfecta de distribución normal, pero posee tendencia hacia la izquierda. En el caso de la serie observada la distribución apunta hacia la derecha y la campana hacia la izquierda. Lo anterior se valida mediante el análisis de los diagramas de caja, donde los datos se presentan de forma asimétrica con tendencia hacia la izquierda. Puede observados, es decir, presentan una mayor dispersión, abarcando un amplio rango. En cuanto a las medias existe una notoria diferencia entre lo observado y lo simulado, siendo la media de lo simulado la de mayor valor. En ambos casos se observan puntos atípicos. Por otra parte, la CDF de precipitaciones (Fig. 4.19.2) muestra un gran desajuste, hay un sesgo amplio y el modelo sobrestima considerablemente las observaciones.

Para los gráficos de temperatura (Fig. 4.19.3), se aprecia que poseen una distribución de tipo bimodal, lo que gráficamente se explica ya que la distribución posee dos puntos máximos en la curva. Al analizar los diagramas de caja, se tiene que los datos no se presentan de forma asimétrica, pero si presentan una leve tendencia hacia la derecha. Puede observarse que la distribución de los datos simulados es menor a la de los observados, por lo que presentan una menor dispersión. En cuanto a las medias se tiene una leve diferencia entre ambas muestras, siendo la serie observada la que presenta un valor mayor. No se aprecian puntos atípicos para el caso de las temperaturas. Para la CDF (Fig. 4.19.4), se observa un sesgo frio. Además se distingue un buen acuerdo para las temperaturas mínimas, pero no así para las máximas.

## 4.3. Análisis de series de tiempo

Las figuras que siguen presentan gráficas que corresponden al análisis de la precipitación acumulada para las 6 estaciones en estudio (Tabla 3.2). Se muestra la visualización de los datos o series de tiempo, diagramas de dispersión, histogramas de las diferencias y diagramas de Taylor (Figs. 4.20 - 4.25). Validación realizada para el periodo 1988-1999, comparando la serie de precipitación observada y la serie de precipitación simulada.





Figura 4.20: Validación de precipitación acumulada en estación Torres del Paine, para el periodo 1988-1999. Las gráficas corresponden a la visualización de los datos mediante: (1) series de tiempo, (2) gráfico cuantil-cuantil (qqplot), (3) diagrama de dispersión, (4) histograma de las diferencias y (5) diagrama de Taylor. El color azul representa lo observado, el color rojo lo simulado y la recta verde corresponde a la línea 1 es a 1.





Figura 4.21: Validación de precipitación acumulada en estación Puerto Natales, para el periodo 1988-1999. Las gráficas corresponden a la visualización de los datos mediante: (1) series de tiempo, (2) gráfico cuantil-cuantil (qqplot), (3) diagrama de dispersión, (4) histograma de las diferencias y (5) diagrama de Taylor. El color azul representa lo observado, el color rojo lo simulado y la recta verde corresponde a la línea 1 es a 1.





Figura 4.22: Validación de precipitación acumulada en estación Bahía San Felipe, para el periodo 1988-1999. Las gráficas corresponden a la visualización de los datos mediante: (1) series de tiempo, (2) gráfico cuantil-cuantil (qqplot), (3) diagrama de dispersión, (4) histograma de las diferencias y (5) diagrama de Taylor. El color azul representa lo observado, el color rojo lo simulado y la recta verde corresponde a la línea 1 es a 1.





Figura 4.23: Validación de precipitación acumulada en estación Punta Arenas DMC, para el periodo 1988-1999. Las gráficas corresponden a la visualización de los datos mediante: (1) series de tiempo, (2) gráfico cuantil-cuantil (qqplot), (3) diagrama de dispersión, (4) histograma de las diferencias y (5) diagrama de Taylor. El color azul representa lo observado, el color rojo lo simulado y la recta verde corresponde a la línea 1 es a 1.





Figura 4.24: Validación de precipitación acumulada en estación Punta Arenas DGA, para el periodo 1988-1999. Las gráficas corresponden a la visualización de los datos mediante: (1) series de tiempo, (2) gráfico cuantil-cuantil (qqplot), (3) diagrama de dispersión, (4) histograma de las diferencias y (5) diagrama de Taylor. El color azul representa lo observado, el color rojo lo simulado y la recta verde corresponde a la línea 1 es a 1.



Figura 4.25: Validación de precipitación acumulada en estación Porvenir, para el periodo 1988-1999. Las gráficas corresponden a la visualización de los datos mediante: (1) series de tiempo, (2) gráfico cuantil-cuantil (qqplot), (3) diagrama de dispersión, (4) histograma de las diferencias y (5) diagrama de Taylor. El color azul representa lo observado, el color rojo lo simulado y la recta verde corresponde a la línea 1 es a 1.

Para la estación Torres del Paine, se aprecia un desajuste entre la serie observada y la serie simulada de precipitaciones (Fig. 4.20.1). Se observa que existe una buena distribución (Fig. 4.20.2), aunque el modelo sobrestima ciertos valores; se observa desfase, presentándose puntos atípicos (Fig. 4.20.3). A partir del histograma, se tiene que el rango de precipitación varía entre 0 y 200 [mm]; en el rango de 30-60 [mm] es donde se alcanza la mayor probabilidad en las diferencias siendo de 25 % (Fig. 4.20.4). El diagrama de Taylor presenta una correlación baja, cercana a 0,12 y el RMSE tiene un valor dentro del rango 60-70 [mm] (Fig. 4.20.5).

Para la estación Puerto Natales no se observa un buen ajuste entre la serie observada y la serie simulada de precipitaciones (Fig. 4.21.1). Existe una buena distribución, pero con cierto desfase (Fig. 4.21.2); se tiene que el modelo sobrestima los valores de precipitación y se observan puntos atípicos (Fig. 4.21.3). A partir del histograma, se tiene que el rango de precipitación varía entre 0 y 180 [mm] aproximadamente; en el rango de 30-60 [mm] es donde se alcanza la mayor probabilidad en las diferencias siendo de 37,5 % (Fig. 4.21.4). El diagrama de Taylor presenta una correlación muy baja, cercana a 0, cuyo valor es 0,003. El RMSE tiene un valor que se aproxima a 50 [mm] (Fig. 4.21.5).

Para la estación Bahía San Felipe se muestra un gran desajuste entre lo observado y lo simulado (Fig. 4.22.1). Se tiene que el modelo sobrestima visiblemente los valores de precipitación (Figs. 4.22.2 y 4.22.3). A partir del histograma, se tiene que el rango de precipitación varía entre 0 y 200 [mm]; en el rango de 60-80 [mm] es donde se alcanza la mayor probabilidad en las diferencias siendo de 24 % (Fig. 4.22.4). Para el diagrama de Taylor se presenta una correlación muy baja, cercana a 0,07 y el RMSE tiene un valor que se aproxima a 70 [mm] (Fig. 4.22.5).

Para la estación Punta Arenas DMC se muestra un desajuste entre los datos observados de precipitación y los simulados (Fig. 4.23.1). El modelo sobrestima en un amplio rango de valores y se aprecian puntos atípicos (Figs. 4.23.2 y 4.23.3). A partir del histograma, se tiene que el rango de precipitación varía entre 0 y 240 [mm]; en el rango de 60-90 [mm] es donde se alcanza la mayor probabilidad en las diferencias siendo de 27,5% (Fig. 4.23.4). El diagrama de Taylor presenta una correlación baja y negativa, lo que significa que esta existe, pero está en contrafase, cuyo valor es -0,17. El RMSE encuentra su valor dentro del rango aproximado 90-95 [mm] (Fig. 4.23.5).

Para la estación Punta Arenas DGA se observa un desajuste entre la serie observada y la serie simulada (Fig. 4.24.1). El modelo sobrestima visiblemente los valores de precipitación y se distinguen puntos atípicos (Figs. 4.24.2 y 4.24.3). A partir del histograma, se tiene que el rango de precipitación varía entre 0 y 240 [mm]; en el rango de 60-90 [mm] es donde se alcanza la mayor probabilidad en las diferencias siendo de 27,5% (Figura 4.24.4). A través del diagrama de Taylor se observa una correlación muy baja y negativa, lo que significa que esta existe, pero está en contrafase, cuyo valor es - 0,05. El RMSE encuentra su valor dentro del rango aproximado 85-90 [mm] (Fig. 4.24.5).

Para la estación Porvenir se tiene un amplio desajuste entre lo observado y lo simulado (Fig. 4.25.1), siendo el mayor entre las estaciones en estudio. El modelo presenta una sobrestimación en un amplio rango de valores y se aprecian puntos atípicos (Figs. 4.25.2 y 4.25.3). A partir del histograma, se tiene que el rango de precipitación varía entre 0 y 400 [mm]; en el rango de 100-200 [mm] es donde se alcanza la mayor probabilidad en las diferencias siendo de 27 % (Fig. 4.25.4). El diagrama de Taylor presenta una correlación baja, cercana a 0,15 y el RMSE tiene un valor que se aproxima a 190 [mm] (Fig. 4.25.5).

Se tiene una sobreestimación de la precipitación acumulada mensual simulada para todas las estaciones, sin embargo el menor sesgo (Tabla 4.3) se encuentra en la estación ubicada en Puerto Natales (34,83), la que se localiza en la zona norte de la región analizada, mientras que el mayor sesgo (175,53[mm]) en la estación Porvenir, la más austral de las estaciones consideradas en el presente estudio.

Al analizar las correlaciones obtenidas para precipitación (Tabla 4.3), se evidencia que todas son cercanas a 0, incluso son negativas en algunas de las estaciones, aunque presentan valores en torno a 0. Para el caso de los meses en los cuales los datos observados presentan peaks, el modelo tampoco parece representarlos. Se distingue además que la dispersión de los datos es importante.

Precipitación acumulada						
Estadístico	Correlación	Sesgo [mm]	$rac{s_y}{s_x}$	RMSE [mm]		
Torres del Paine	0, 12	41,98	0,95	65, 55		
Puerto Natales	0,003	34, 83	1,03	51,95		
Bahía San Felipe	0,07	49, 33	1,73	69,05		
Punta Arenas DMC	-0, 17	80, 21	1,74	93, 29		
Punta Arenas DGA	-0,05	74, 12	1,57	87, 63		
Porvenir	0, 13	175, 53	4,57	188,66		

Tabla 4.3: Resultados de estadísticos de validación para variable precipitación acumulada entregada por el modelo a partir de los datos observados por las estaciones. Análisis realizado para el periodo 1988-1999. Se muestran valores de correlación, error de sesgo, cociente entre las desviaciones estándar y raíz del error cuadrático medio (RMSE).

Las figuras que siguen presentan gráficas que corresponden a analisis de temperatura media asociados a cada una de las estaciones. Se muestra la visualización de los datos o series tiempo, diagramas de dispersión, histogramas de las diferencias y diagramas de Taylor (Figs. 4.26 - 4.31). Validación realizada para el periodo 1988-1999, comparando la serie de temperatura observada y la serie de temperatura simulada.



Figura 4.26: Validación de temperatura media en estación Torres del Paine, para el periodo 1988-1999. Las gráficas corresponden a la visualización de los datos mediante: (1) series de tiempo, (2) gráfico cuantil-cuantil (qqplot), (3) diagrama de dispersión, (4) histograma de las diferencias y (5) diagrama de Taylor. El color azul representa lo observado, el color rojo lo simulado y la recta verde corresponde a la línea 1 es a 1.



Figura 4.27: Validación de temperatura media en estación Puerto Natales, para el periodo 1988-1999. Las gráficas corresponden a la visualización de los datos mediante: (1) series de tiempo, (2) gráfico cuantil-cuantil (qqplot), (3) diagrama de dispersión, (4) histograma de las diferencias y (5) diagrama de Taylor. El color azul representa lo observado, el color rojo lo simulado y la recta verde corresponde a la línea 1 es a 1.



Figura 4.28: Validación de temperatura media en estación Bahía San Felipe, para el periodo 1988-1999. Las gráficas corresponden a la visualización de los datos mediante: (1) series de tiempo, (2) gráfico cuantil-cuantil (qqplot), (3) diagrama de dispersión, (4) histograma de las diferencias y (5) diagrama de Taylor. El color azul representa lo observado, el color rojo lo simulado y la recta verde corresponde a la línea 1 es a 1.



Figura 4.29: Validación de temperatura media en estación Punta Arenas DMC, para el periodo 1988-1999. Las gráficas corresponden a la visualización de los datos mediante: (1) series de tiempo, (2) gráfico cuantil-cuantil (qqplot), (3) diagrama de dispersión, (4) histograma de las diferencias y (5) diagrama de Taylor. El color azul representa lo observado, el color rojo lo simulado y la recta verde corresponde a la línea 1 es a 1.



Figura 4.30: Validación de temperatura media en estación Punta Arenas DGA, para el periodo 1988-1999. Las gráficas corresponden a la visualización de los datos mediante: (1) series de tiempo, (2) gráfico cuantil-cuantil (qqplot), (3) diagrama de dispersión, (4) histograma de las diferencias y (5) diagrama de Taylor. El color azul representa lo observado, el color rojo lo simulado y la recta verde corresponde a la línea 1 es a 1.



Figura 4.31: Validación de temperatura media en estación Porvenir, para el periodo 1988-1999. Las gráficas corresponden a la visualización de los datos mediante: (1) series de tiempo, (2) gráfico cuantil-cuantil (qqplot), (3) diagrama de dispersión, (4) histograma de las diferencias y (5) diagrama de Taylor. El color azul representa lo observado, el color rojo lo simulado y la recta verde corresponde a la línea 1 es a 1.

Para la estación Torres del Paine se tiene que el modelo sobrestima algunos mínimos y subestima los máximos (Fig. 4.26.1). Las series presentan una distribución similar, aunque con cierta tendencia a subestimar valores (Figs. 4.26.2 y 4.26.3). A partir del histograma, se tiene que el rango de temperaturas varía entre -3 y 4 [°C]; en el rango de -3 a -2 [°C] es donde se alcanza la mayor probabilidad en las diferencias siendo de 27,5 % (Fig. 4.26.4). El diagrama de Taylor presenta una correlación alta, cercana a 0,9 y el RMSE encuentra su valor dentro del rango 2-3,5 [°C] (Fig. 4.26.5).

Para la estación Puerto Natales se tiene que el modelo sobrestima las temperaturas bajas y subestima las temperaturas altas (Fig. 4.27.1). Los valores de temperaturas mínimas y máximas son más bajos que los típicos observados (Fig. 4.27.2). En general, no se presenta una distribución uniforme; se observan subestimaciones y sobrestimaciones (Fig. 4.27.3). A partir del histograma, se tiene que el rango de temperaturas varía entre -4 y 11 [°C]; en el rango de 2 a 4 [°C] es donde se alcanza la mayor probabilidad en las diferencias siendo de 27,5 % (Fig. 4.27.4). El diagrama de Taylor presenta una correlación alta de 0,85 y el RMSE encuentra su valor dentro del rango 2-3,5 [°C] (Fig. 4.27.5).

Para la estación Bahía San Felipe el modelo presenta una variabilidad semejante a las observaciones reales (Fig. 4.28.1). Se tiene que el modelo subestima algunos valores de temperatura, sin embargo los datos se distribuyen uniformemente, sólo que con cierto desfase (Figs. 4.28.2 y 4.28.3). A partir del histograma, se tiene que el rango de temperaturas varía entre -6 y 4 [°C]; en el rango de -3 a -2 [°C] es donde se alcanza la mayor probabilidad en las diferencias siendo de 26 % (Fig. 4.28.4). El diagrama de Taylor para la variable temperatura, en la estación Bahía San Felipe presenta una correlación alta, superior a 0,9 y el RMSE encuentra su valor dentro del rango 2-3,5 [°C] (Fig. 4.28.5).

Para la estación Punta Arenas DMC se tiene que ambas series muestran un ciclo similar, pero los valores extremos simulados son más bajos que los valores observados (Fig. 4.29.1). Para la distribución se tiene un desajuste entre los datos observados y los simulados (Figs. 4.29.2 y 4.29.3). A partir del histograma, se tiene que el rango de temperaturas varía entre -4 y 8 [°C]; en el rango de -1 a 0 [°C] es donde se alcanza la mayor probabilidad en las diferencias siendo de 20% (Fig. 4.29.4). El diagrama de Taylor para la variable temperatura, en la estación Punta Arenas DMC presenta una correlación alta, de 0,9 y el RMSE encuentra su valor dentro del rango 2-3,5 [°C] (Fig. 4.29.5).

Para la estación Punta Arenas DGA se tiene que la variabilidad que muestran las temperaturas es semejante, pero los valores extremos son más bajos que los típicos observados (Fig. 4.30.1). De los gráficos de distrubución se observa que el modelo subestima los máximos y sobrestima los mínimos (Figs. 4.30.2 y 4.30.3). A partir del histograma, se tiene que el rango de temperaturas varía entre -3 y 7 [°C]; en el rango de -1 a 0 [°C] es donde se alcanza la mayor probabilidad en las diferencias siendo de 21 % (Fig. 4.30.4). El diagrama de Taylor para la variable temperatura presenta una correlación alta, de 0,9 y el RMSE encuentra su valor dentro del rango 2-3,5 [°C] (Fig. 4.30.5).

Para la estación Porvenir se tiene que el modelo presenta una variabilidad semejante a las observaciones (Fig. 4.31.1). Si bien, la distribución de las temperaturas es similar, se tiene que el modelo no representa algunos valores de temperaturas máximos (Figs. 4.31.2 y 4.31.3). A partir del histograma, se tiene que el rango de temperaturas varía entre -6 y 4 [°C]; en el rango de -3 a -2 [°C] es donde se alcanza la mayor probabilidad en las diferencias siendo de 25 % (Fig. 4.31.4). El diagrama de Taylor para la variable temperatura presenta una correlación alta, de 0,9 y el RMSE encuentra su valor dentro del rango 2-3,5 [°C] (Fig. 4.31.5).

Paralelamente, se aprecia que en todos los puntos de control se tiene una alta correlación, en torno a 0,9 (Tabla 4.4), con una baja dispersión de los datos. Al mismo tiempo, no se identifica un valor de sesgo en común para toda la serie, lo que no permite ajustar todo el campo uniformemente.

A lo largo de las 6 estaciones, se muestra que el modelo parece respetar el ciclo anual, aunque con una subestimación de la amplitud de los valores a lo largo de los 12 años de medición, lo que se evidencia mediante el calculo del cociente de las desviaciones estándar, los que presentan valores en torno a 0,5 para todas las estaciones (Tabla 4.4).

Temperatura media						
Estadístico	Correlación	Sesgo [°C]	$rac{s_y}{s_x}$	RMSE [°C]		
Torres del Paine	0, 89	-1,64	0,65	2,60		
Puerto Natales	0,85	1,99	0, 37	3, 36		
Bahía San Felipe	0,91	-1,51	0,80	2,30		
Punta Arenas DMC	0,90	1,35	0,41	2,62		
Punta Arenas DGA	0,90	1,18	0, 45	2,28		
Porvenir	0,90	-1,79	0,67	2,46		

Tabla 4.4: Resultados de estadísticos de validación para variable temperatura media entregada por el modelo a partir de los datos observados por las estaciones. Análisis realizado para el periodo 1988-1999. Se muestran valores de correlación, error de sesgo, cociente entre las desviaciones estándar y raíz del error cuadrático medio (RMSE).

## 4.4. Proyectiones

A partir de la serie simulada, se calculó la tendencia lineal, para obtener la significancia decadal, mediante la aplicación del test de Monte Carlo (Fig. 4.32). Las tendencias se presentan como positivas para el periodo de estudio, aunque bajas para todo el área. Se presentan estadísticamente significativas en las zonas ocenánicas, tanto para el Pacífico como para el Atlántico, así como para el sureste Argentino, lugar en donde se registran los valores más altos, junto con la parte norte de la región de Magallanes y la zona de Campos de Hielo, sin embargo, para la región de Magallanes propiamente tal, la tendencia es aún más baja y se muestra como no significativa.



Figura 4.32: Tendencias de temperatura media, obtenidas con su respectiva significancia a partir del test de Monte Carlo con un 95% de confianza, con datos cada 6 h para el periodo 1988-1999. La zona sombreada es no significativa

## 5. Discusión

Este trabajo se ha basado en evaluar el desempeño de un downscaling, en donde se utiliza como forzante el modelo global MIROC5, acoplado con el modelo regional WRF. Los GCM aún contienen errores en varios de sus campos, entre ellos la precipitación y la temperatura; en general, ambas variables revelan desacuerdos considerables (Bony y Dufresne, 2005). Algunos aspectos de los errores del modelo ciertamente se pueden reducir al aumentar la resolución, tanto para la atmósfera como para el componente oceánico (Shaffrey et al., 2009). Los modelos atmosféricos de alta resolución producen una distribución mejorada (Pope y Stratton 2002, Jung et al., 2006; Gent et al., 2009). Sin embargo, existen errores atribuidos a procesos de retroalimentación que no se reducen necesariamente aumentando la resolución, sino que se hace necesario modificar los esquemas de parametrización. En este sentido, junto al uso de modelos de mayor resolución, se hace necesario el continuo desarrollo del modelo, para lograr reproducir mejor la variabilidad climática pasada, proyectar el cambio climático futuro y comprender diversos procesos.

Para las seis estaciones en análisis se obtuvo que el modelo presenta un aumento del rango intercuartil para el caso de la precipitación, evidenciandose un desplazamiento de todos los valores hacia la derecha, lo que muestra que los valores atípicos por lo general corresponden a valores considerablemente mayores a los observados. El modelo MIROC5 muestra una sobreestimación considerable de la precipitación en la porción sur austral de Chile, lo que se reafirma a través de estudios previos (Alcafuz et al, 2015), dando cuenta de las grandes imprecisiones del modelo MIROC5 en cuanto a la representación de las observaciones. El mismo estudio señala, que WRF tiene un mejor desempeño en la representación de las variables evaluadas y es capaz de corregir los sesgos y errores presentes en los datos de condición inicial, sin embargo para la precipitación se observa que existe un sesgo húmedo en todas las estaciones. Con respecto a las correlaciones, el estudio de la DMC muestra bajos valores, donde predominan los valores negativos para la variable precipitación, resultados similares a los obtenidos en el presente análisis. En general, a través de la evaluación realizada, se observa una
sobreestimación de la precipitación acumulada mensual simulada para todas las estaciones. Con respecto a las correlaciones obtenidas , estas presentan valores cercanos a 0

y además se distingue una considerable dispersión de los datos. Destacar que a medida que se analizan estaciones ubicadas más al sur, se observa que la distribución presenta mayores disparidades, lo que puede deberse a cambios abruptos en el terreno, debido a presencia de canales y fiordos, además de la influencia de la circulación de vientos del oeste, junto a una menor altitud de la cordillera.

Para el caso de la temperatura, se muestra que el modelo al ser comparado con los datos observados, presenta una disminución del rango intercuartíl, así como de los límites inferiores y superiores. Se evidencia que no existe una uniformidad en el desfase del valor medio de la distribución, variando entre las diferentes estaciones. También se aprecia la no existencia de valores escapados, esto tanto para los datos observados como para los modelados. Además se tiene que el modelo, para todas las estaciones, proporciona valores de temperatura considerablemente menos dispersos que los observados, no reflejando de buena manera los valores de temperatura media extremos, sin embargo, el valor medio de la distribución presenta una cierta correspondencia. En la evaluación realizada para la variable temperatura por la DMC (Alcafuz et al., 2015), se encontraron, en general, sesgos en las extremas, dado que tiende a existir una sobrestimación de las mínimas, aunque la correlación entre modelo y observación es aceptable. Esos resultados son comparables con los obtenidos en el presente trabajo, lo que se corrobora con el error en torno a 2-3 [°C] que las series presentan en cada una de las estaciones. Paralelamente, se aprecia que en todos los puntos de control se tiene una alta correlación, en torno a 0,9 (Tabla 4.4), con una baja dispersión de los datos. Al mismo tiempo, no se identifica un valor de sesgo en común para toda la serie, lo que no permite ajustar todo el campo uniformemente.

La hipótesis planteada en esta investigación hace referencia a la representatividad que alcanza el modelo de reducción de escala en Fuego-Patagonia. Se obtuvo que el modelo presenta un ajuste con respecto a la variable temperatura media, en donde se tiene un RMSE entre 2-3 [°C]. En tanto, para la variable precipitación acumulada el modelo presenta un RMSE entre 65-200 [mm]. Para la temperatura, existe una relación entre los resultados obtenidos e investigaciones previas (Alcafuz et al, 2015), en donde se plantea que es predominante la presencia de RMSE de entre 1-3 [°C], en donde además se señala que el modelo tiende a representar una variabilidad de la temperatura mínima mayor que la observada, lo que es concordante con los resultados de esta investigación. Por otra parte, para la variable precipitación acumulada, el estudio de la DMC concluye que los valores de los estadísticos como el RMSE y el sesgo, dan cuenta de una sobreestimación generalizada, simulando montos anuales que superan a las observaciones, lo que valida los resultados obtenidos en el presente análisis.

# 6. Conclusiones

Se realizó un análisis comparativo entre el hindcast del modelo de downscaling de MIROC5 acoplado con WRF e informaciones de estaciones meteorológicas. El modelo utilizado fue desarrollado por la Dirección Meteorológica de Chile (Alcafuz et al., 2015), del que se extrajo el dominio de interés enfocado en Fuego-Patagonia. A través de observaciones provenientes de seis estaciones meteorológicas, se realizaron los análisis de distribución de las series de datos observadas y simuladas, así como también la respectiva validación mediante el uso de estadísticos.

En primer lugar se puede concluir que la hipótesis planteada en esta investigación se cumple, puesto que en general, el modelo de reducción de escala tiene la capacidad de reconstruir el clima local en Fuego-Patagonia. Se concluye que el modelo tiene un buen ajuste con respecto a la variable temperatura, en donde se obtuvo un RMSE entre 2-3 [°C] para todas las estaciones, lo que es concordante con el resultado obtenido en el estudio de la DMC, en donde sólo se analizó la estación Punta Arenas DMC y se obtuvo un error entre 1-3 [°C]. En tanto, para la variable precipitación acumulada el modelo presenta un RMSE entre 65-200 [mm], este error es aceptable, en comparación a los errores que el mismo modelo presenta para estaciones en el resto del territorio chileno, en donde son subestimadas incluso en 1000 [mm].

Respecto a los objetivos específicos se concluye lo siguiente:

- 1. A través de gráficos que muestran el ciclo anual y estacional de las series observadas y simuladas, fue posible visualizar la distribución de ambas series, para distinguir el ajuste entre ellas, mediante las subestimaciones y sobrestimaciones existentes.
- 2. A partir del estudio realizado por la DMC, fue posible describir la tendencia en precipitación y temperatura en Fuego-Patagonia y validar las salidas del modelo mediante observaciones meteorológicas.

3. Mediante el uso de estadísticos, se pudo conocer la distribución de la serie de datos observados y simulados (histogramas, KDE, diagramas de caja y CDF) y por otra parte validar las salidas del modelo con observaciones reales (series de tiempo, histogramas, diagrama de dispersión y de Taylor), a modo de verificar la habilidad del modelo de reducción de escala en simular el clima local.

Por otra parte, se tiene que existe una alta irregularidad en los terrenos de la zona sur austral de Chile, lo que sumado a la influencia oceánica y a la circulación del oeste, dificulta obtener simulaciones atmosféricas que sean altamente representativas. Por lo anterior, se cree necesario implementar un modelo que trabaje a una mayor resolución espacial. En este estudio se empleó un modelo que tiene una resolución de 25 [km], en donde se tiene que las ecuaciones que gobiernan la atmósfera se resuelven a una distancia no adecuada, no representando de manera correcta la compleja topografía de la región, alejando de la realidad los resultados. Por ejemplo, la distancia aproximada, en línea recta, entre Punta Arenas y Porvenir es de 20 [km] y el sector más ancho del Estrecho de Magallanes, llamado Paso Ancho, tiene una distancia de 35 [km]. Asociado a esto, es necesario poner especial atención en la resolución efectiva del modelo que hace referencia al número de cuadrículas para los cuales el modelo resuelve los procesos atmosféricos.

El modelo WRF da la posibilidad realizar aproximaciones de los fenómenos físicos que ocurren en el medio en estudio mediante distintos esquemas de parametrizaciones físicas. Estas consideran los fenómenos como un flujo que puede simplificarse, o bien, hacerse más complejo; dado que los modelos numéricos son aproximaciones de las ecuaciones de la física, no están exentos de presentar errores. Para trabajos futuros, es importante realizar un amplio análisis previo para conocer cuál es la física adecuada que se debe establecer para la región. Es necesario que a través de pruebas se pueda conocer la sensibilidad del modelo a los cambios en las distintas opciones físicas.

Por otra parte, la validación es un tema importante en el área de la modelación. El comparar los resultados entregados por el modelo con datos observados de la zona de estudios, permite conocer la existencia de deficiencias en las parametrizaciones utilizadas. Se estima necesario ampliar la red de estaciones meteorológicas para poder verificar las proyecciones en base a modelos numéricos de modelación atmosférica; el contar con más estaciones meteorológicas es una buena herramienta para lograr una validación estadística más representativa. Adicionalmente, se requiere crear protocolos de registro y almacenamiento de datos climáticos, a modo de facilitar la obtención de estos, a través de convenios de colaboración entre entidades del rubro.

El trabajo desarrollado es considerado un punto de partida y un importante paquete de trabajo en el marco del Programa de Modelamiento Climático (MoCliM) para la región de Magallanes, con el que se busca cuantificar a largo plazo los efectos del cambio climático en la región, mediante la implementación de modelos climáticos, a través de las herramientas que proporciona la modelación numérica de la atmósfera.

# Anexo

# Anexo A

### Modelo MIROC5

MIROC5 (Model for Interdisciplinary Research On Climate), es un modelo climático global, de origen Japonés, desarrollado por National Institute For Environmental Studies and Japan Agency for Marine Earth Science and Technology. Este modelo es una nueva versión del modelo de circulación general atmósfera-océano producido cooperativamente por la comunidad de investigación japonesa, conocido como el Modelo para la Investigación Interdisciplinaria sobre el Clima (MIROC).

El modelo global MIROC5 se encuentra incorporado al proyecto CMIP5, que corresponde a la quinta fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Climáticos del Programa World Climate Research (WCRPs). El CMIP5 recoge un conjunto amplio de salidas modeladas que están disponibles libremente a investigadores a través de un archivo de datos integrados y ha sido parte del quinto informe de evaluación del IPCC (Stocker et al., 2013; Pachauri et al., 2014). Este proyecto incluye simulaciones históricas para el clima del siglo XX y proyecciones futuras para el siglo XXI. Además, se incluyen simulaciones de corto plazo centradas en las últimas décadas y simulaciones futuras hasta el año 2035.

En una versión anterior del modelo, descrita por Hasumi y Emori (2004), MIROC3.2, se tiene que este combina ciertos modelos para generar sus componentes. El modelo de atmósfera es CCSR-NIES-Frontier Research Center for Global Change (FRCGC) AGCM (Numaguti et al., 1997), que se basa en un núcleo dinámico espectral global e incluye un paquete de física estándar, mientras que el modelo oceánico es el modelo de componente oceánico CCSR (Hasumi, 2006), que incluye un modelo de hielo marino, además se acopla un modelo de tierra que incluye un módulo de ríos. MIROC5 se desarrolló en base a MIROC3.2, sin embargo hubo modificaciones o ajustes en algunos de

sus esquemas.

El modelo global MIROC5 está compuesto por los siguientes módulos: componente atmosférico, componente oceánico, componente de hielo marino y componente terrestre. En estos, se hicieron mejoras, específicamente en la base dinámica y en las parametrizaciones físicas. Además se realizaron múltiples experimentos de control, lo que fueron comparados con las observaciones de la versión anterior (MIROC3.2), a dos resoluciones diferentes, una más gruesa y otra más fina que MIROC5.

Se tiene que la precipitación y la temperatura mejoraron en MIROC5 en varios aspectos. Esta mejora se atribuye al nuevo esquema de convección de cúmulos y un esquema de advección con mayor precisión para las corrientes oceánicas. Por otra parte, los esquemas actualizados de radiación y turbulencia también funcionan para reducir los sesgos medios de la temperatura y humedad.

La nueva versión de MIROC emplea un tratamiento de pronóstico para la proporción de mezcla de hielo y agua en la nube, así como la fracción de nubes, considerando los procesos de lluvia cálida y fría. Además, una ventaja considerable es que simula ENSO de forma más realista que los modelos anteriores.

En general, se demuestran que las deficiencias observadas en el modelo anterior se reducen en gran medida en varios aspectos para la nueva versión, cumpliendo el objetivo de mejorar la simulación del clima global, para comprender su variabilidad y proyectar el cambio climático debido al forzamiento radiativo antropogénico.

# Anexo B

### Modelo WRF

Modelo atmosférico Weather Research and Forecasting model (WRF) (Skamarock et al., 2008). WRF es un modelo numérico de predicción y simulación del tiempo diseñado con fines operacionales y para investigación. WRF ha sido desarrollado gracias a el trabajo colaborativo entre el National Center for Environmental Prediction (NCAR) Mesoscale and Microscale Meteorology (MMM) Division y entre otras instituciones, organizaciones, además de la participación de científicos de todo el mundo.

Para el cálculo de las ecuaciones que gobiernan la atmosfera, este modelo ofrece dos núcleos dinámicos, cuya elección dependerá del enfoque que se le dé al estudio. Las dos versiones son: el Nonhydrostatic Mesoscale Model (NMM) y el Advanced Research WRF (ARW). La primera versión, WRF-NMM, es mayormente empleada para pronósticos numéricos. Esta se basa en el modelo ETA y es apoyado por el Developmental Testbed Center (DTC). La segunda versión, WRF-ARW, es con frecuencia utilizada en el área de la investigación. Se trata de una continuación del modelo MM5 y es desarrollado principalmente por NCAR. Este último sistema, es el que se empleó en el presente trabajo.

El sistema WRF-ARW es un modelo no hidrostático, es decir, la fuerza del gradiente de presión no está en equilibrio con la fuerza de gravedad, lo que favorece el libre movimiento de las parcelas de aire en la vertical, además compresible que trabaja con coordenadas verticales sigma. La integración temporal es mediante un esquema de Runge-Kutta de 3er orden y las variables son organizadas en una grilla Arakawa-C (Figura B.1), la que posiciona en el centro de las cuadrículas las componentes de la velocidad (U, V y W), reubicando en la cuadrícula las variables termodinámicas, de masa y escalares.



Figura B.1: Grilla Arakawa-C utilizada al desarrollar las ecuaciones que gobiernan la atmósfera, se tiene la grilla horizontal (izquierda) y grilla vertical (derecha), correspondientes a las respectivas velocidades. (Skamarock y Klemp, 2008).

Se define un sistema de coordenadas Eulerianas (Skamarock et al., 2005), en el cual se tiene que el observador se encuentra en un punto fijo observando el movimiento del fuido. El sistema de coordenada vertical es denotado por  $\sigma$  (Figura B.2), la cual sigue el terreno, cuyo principio se basa en la presión hidrostática, la que está definida como:

$$\sigma = \frac{Ph - Pht}{Phs - Pht} \tag{B.1}$$

donde:

Ph: componente hidrostático de la presión en cada nivel vertical,

*Pht y Phs:* valores de presión en el tope de la atmosfera en el modelo y a lo largo de la superficie, respectivamente.

 $\sigma:$ varía des<br/>de 1 en la superficie hasta 0 en el tope superior del modelo.



Figura B.2: Esquema del terreno siguiendo coordenadas  $\sigma$  (Skamarock y Klemp, 2008).

Para crear las condiciones iniciales y de borde con la finalidad de generar una simulación, es necesaria una fuente de datos para que WRF pueda ejecutar los procesos. Esta información puede proveerse de distintas fuentes correspondientes a modelos globales, tales como GFS, FNL, ECMWF -ERA40, ECMWF-ERA Interim, entre otros. Se busca aumentar la resolución espacial y temporal permitiendo a WRF realizar una reducción de escala o downscaling, lo que genera productos en alta resolución, en base a información de un modelo global de baja resolución.

Para que los datos de entrada logren generar la simulación, es necesario seguir pasos previos que recaen en varios módulos de WRF, cada uno de los cuales poseen distintas funciones. En primera instancia se configuran archivos iniciales, para luego dar paso a la etapa de pre-procesamiento. Finalizada ésta comienza la etapa del procesamiento (Figura B.3).



Figura B.3: Esquema de los componentes de WRF-WPS.

- **geogrid.exe:** Se determinan el (los) dominio (s) de la simulación, previamente definidos en el archivo namelist.wsp, para luego interpolar conjuntos de datos terrestres, con la finalidad de fijarlos a la grilla del modelo.
- ungrib.exe: Se decodifican los archivos generados en el paso anterior. Se leen y transforman los archivos meteorológicos de GRIB, para posteriormente ser transcritos en un formato intermedio WPS. Estos archivos son generados para poder ser leídos en el siguiente paso.
- metgrid.exe: Se realiza la interpolación horizontal de los archivos con formato intermedio generados anteriormente, producidos por geogrid.exe y ungrib.exe. Los datos de salida son archivos netCDF, los cuales al ser multitemporales almacenan en un mismo archivo distintas capas.
- real.exe: Se verifica que estén en orden las condiciones para correr el modelo. Luego, en base a las coordenadas N para cada punto del dominio, se interpolan verticalmente los datos.

- wrf.exe: Se inicia la simulación considerando las variables físicas que se describen en el archivo namelist.input, es decir, aquí es donde se corren todos los algoritmos. Como resultado se entrega un modelo espacial con formato NetCDF en base a los parámetros establecidos.
- namelist.wps: Archivo en el que se definen los parámetros necesarios para el pre-procesamiento de los datos. En este se establece el periodo a simular, la cantidad de dominios y las coordenadas de dominios, además se definen los forzantes meteorológicos. Este archivo posee la información necesaria para que se ejecuten geogrid.exe, ungrib.exe, metgrid.exe.
- namelist.input: Archivo en el que se configura el tiempo de control del modelo y dominios, así como también las parametrizaciones físicas y dinámicas necesarias para la simulación.

# Anexo C

# Distribución temporal de los datos

A continuación se presentan dos tablas que contienen información de la distribución temporal de los datos, en base a un total de 80 estaciones meteorológicas de la región, pertenecientes a la Dirección General de Aguas (DGA) y la Dirección Meteorológica de Chile (DMC).

- La Figura C.1 muestra la cobertura temporal de datos de precipitación acumulada para el periodo 1988-2017.
- La Figura C.2 muestra la cobertura temporal de datos de temperatura media para el periodo 1988-2017.

Estación	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Lago Dickson	2000				2002	2000		1000	1000		2000				2002	2000	2001	2000		2007						2010				
Lago Paine																														
Laguna Azul																														
Cerro Guido																														
Rio Paine En Parque Nacional 2																														
Lago Sarmiento																														
kio Las Chinas En Cerro Guido																							_							
Lago Grev																							-						-	
Glaciar Tindall																													-	
Torres Del Paine																														
Estancia Rio Paine																														
Rio Tindall En Desembocadura																														
Cerro Castillo																														
Rio Rincon En Ruta Y-290																														
Rio Serrano En Desembocadura																							_							_
Giaciar Baimaceda Teniente Gallardo Puerto Natales Ad																							_							
Casas Vieias																							_						-	-
Puerto Natales																													-	
Rio Tranquilo En Ruta N 9																														
Rio Rubens En Ruta N 9																														
Teniente Merino																														
Rubens En Ruta N. 9																														
Rio Penitente En Morro Chico		-	-															⊢												
Lago Anibai Pinto Monte Avmond		-	-	-																										
Penitente Alto		-		-																										
Seno Obstruccin															_		-													
Ohiggins Villa																														
Villa Tehuelche																														
Bahia Lomas																														
Rio Perez																														
Rio Perez En Desembocadura																														
San Gregorio																													_	
Rio Verde																							_						_	
Rio Side En Cerro Sombrero																														
Cerro Sombrero																							_							_
Cordillera Riesco											_												_							
Sarita En Bahia San Felipe																														
Bahia San Felipe																														
Isla Riesco																														
Rio Grande En Isla Riesco																													_	
Punta Arenas DGA																													_	
Punta Arenas DMC																							_						-	
Canal De Trasvase Estero Llau-Llau											-																		-	
Rio Las Minas En Bt. Sendos																														
Magdalena Giglio 2																														
Las Minas																														
Laguna Lynch																														
Cerro Mirador																													_	
Fuentes Martinez Porvenir Ad.																													_	
Porvenir																							_						-	
Onaisin En Maria Cristina																													-	
San Sebastian																														
Lago Parrillar																														
La Baglina																														
Cameron																														
Rio San Juan En Desembocadura																			_										_	
San Juan																													-	
Rio Caleta En Tierra Del Fuego																							_						-	
Puerto Yartou																							_						-	
Rio Grande En Tierra Del Fuego																														
Seccion Rio Grande																														
Rio Condor																														
Pampa Huanaco																														
Lago Blanco																														
Lago Deseado																							_							
Nio Azopardo En Desembocadura Bahia Vendegaia		-	-	-																										
Puerto Navarino																							-							
Guardia Marina Zanartu Pto Williams Ad.																														
Rio Robalo En Puerto Williams																														
Robalo Alto																														
Lago Navarino																														
Puerto Toro																														
												1																		

Figura C.1: Distribución temporal de datos observados de precipitación acumulada, para el periodo 1988-2017.

Estación	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Lago Dickson																														
Lago Paine																														
Laguna Azul																														
Cerro Guido																														
Rio Paine En Parque Nacional 2																														
Lago Sarmiento																														
Rio Las Chinas En Cerro Guido																														
Lago Pehoe																														
Lago Grey																													_	
Glaciar Tindall								_													_									
Torres Del Paine																														
Estancia Rio Paine				<u> </u>																										
Rio Tindali En Desembocadura			-											_								_							_	
Pio Pincon En Puto V 290			-																											
Rio Serrano En Desembocadura								_								_					_								-	
Glaciar Balmaceda			-					_								_													-	
Teniente Gallardo Puerto Natales Ad.		-	-																											
Casas Viejas		-	<u> </u>														_			_		_				_		_		
Puerto Natales																														
Rio Tranquilo En Ruta N 9																														
Rio Rubens En Ruta N 9																														
Teniente Merino																														
Rubens En Ruta N. 9			<b> </b>																											
Rio Penitente En Morro Chico		<u> </u>	<u> </u>		L																									
Lago Anibal Pinto		-	-		-																									
Monte Aymond		-		-																										
Penitente Alto		-	-	-																	_									
Ohiggins Villa		+	1	-	-							-								-	-									
Villa Tehuelche								_																						
Bahia Lomas																														
Rio Perez																														
Rio Perez En Desembocadura																														
San Gregorio			<u> </u>																											
Rio Verde																														
Rocallosas			<u> </u>																										_	
Rio Side En Cerro Sombrero																														
Certo Sombrero			-	-																									_	
Sarita En Bahia San Feline			<u> </u>																										-	
Bahia San Felipe																														
Isla Riesco																														
Rio Grande En Isla Riesco																														
Punta Arenas DGA																														
Bitsch Alto																														
Punta Arenas DMC																														
Canal De Trasvase Estero Llau-Llau																														
Rio Las Minas En Bt. Sendos				<u> </u>																									_	
las Minas		-	-					_													_									
Laguna Lynch			-																											
Cerro Mirador																														
Fuentes Martinez Porvenir Ad.																														
Leadura Alta																														
Porvenir																														
Onaisin En Maria Cristina																														
San Sebastian																														
Lago Parrillar		-		-								<u> </u>																		
La Baglina																														
Cameron Rio San Juan En Docomboordura				<u> </u>																										
San Juan			-					_								_			_											
Russfin																														
Rio Caleta En Tierra Del Fuego																						_								
Puerto Yartou																														
Rio Grande En Tierra Del Fuego																														
Seccion Rio Grande																														
Rio Condor																														
Pampa Huanaco																													_	
Lago Bianco		-	-																											
Rio Azonardo En Desembocadura		-	-	-	-															-	-									
Bahia Yendegaia		-	-																					-						
Puerto Navarino																														
Guardia Marina Zanartu Pto Williams Ad.																														
Rio Robalo En Puerto Williams																														
Robalo Alto																														
Lago Navarino		-																												
Puerto Toro		ļ	-		ļ																									
												1																		

Figura C.2: Distribución temporal de datos observados de temperatura media, para el periodo 1988-2017

# Anexo D

# Participación en Conferencia y Workshop

Con el apoyo del Programa de Cooperación Internacional Chile/Alemania CONICYT-BMBF N° BMBF20140052: Respuestas de los Glaciares, biosfera e hidrología a la variabilidad climática en los Andes autrales (GABY-VASA), al Programa de Transferencia Científica y Tecnológica FNDR/GORE-Magallanes: Modelamiento Climático Magallanes, código BIP 30462410-0 y de la beca GAIA/DPA de la Universidad de Magallanes (UMAG), fue posible participar de la Conference and Workshop Climate Impacts on glacier and biosphere in Fuego-Patagonia, realizada en la Universidad de Humboldt, Berlín, Alemania, entre lo días 14-19 de Julio-2017.

Durante la conferencia se realiazó la presentación del trabajo **Regional Climate** Models perfomance by precipitation and temperature analysis in Fuego-Patagonía, en formato póster, en donde se dieron a conocer los avances de esta tesis de pregrado.



IGEO)

### Regional Climate Models performance by precipitation and temperature analysis in Fuego – Patagonia.

Gaete, K. <sup>1,2,3</sup>, Jaña, R. <sup>2</sup>, Sepúlveda, A. <sup>3</sup>, Casassa, G. <sup>1</sup>, Aguirre, F. <sup>2</sup> <sup>1</sup> Antarctic and sub-antarctic Programs Centre, University of Magallanes, Punta Arenas, Chile. <sup>2</sup> Scientific Department of Chilean Antarctic Institute, Punta Arenas, Chile <sup>3</sup> Department of Geophysics, University of Concepción, Concepción, Chile.

#### ABSTRACT

There is a growing interest in understanding how the current climate changes will affect the Earth system. In this regard numerical modelling of the atmosphere and climate system is a powerful tool to forecast future conditions. The low resolution of General Circulation Models (GCMs), makes them unsuitable for the specific case of Chile, a long and narrow country with complex topography, with the Andes mountain range extending from north to south. In this case, in order to better understand the climate system, it is necessary to apply a higher resolution Regional Climate Model (RCM) nested into a GCM.

Two main studies have been published in Chile regarding future climate variability. The first was carried out in 2006 by the Department of Geophysics (DGF) of Chile University, which used the regional model PRECIS coupled to the global HadCM3 model. The second study was carried out by Chile's Meteorological Directorate (DMC) in 2014, using the WRF model coupled to the global model MIROC5. In both studies an increase of atmospheric temperatures is observed over Fuego-Patagonia, but smaller in magnitude than in central Chile due to the lower altitude of the Andes, the ocean influence and the westerlies circulation. In the case of precipitation, future trends suggest an increase in Fuego-Patagonia, contrary to the decrease observed in the central and southern areas of the country. A hindcast analysis of the DMC (2014) model results is performed for the period 1988-1999, with the objective of understanding climate variability in Fuego – Patagonia.

### AREA AND PERIOD OF STUDY



### METHODS

We used a numerical climatic simulation output for the period between 1970 and 1999, this computation were made by DMC (Dirección Meteorológica de Chile). The second step consist in choosing a zone of interest and then generate a new domain of study. The objective is to analyzed the performance of the model respect to the variables of precipitation and temperature.

In order to validate the model for the new domain we selected meteorological stations that belong to DGA (Dirección General de Aguas). A common period of data between the modelling and the meteorological stations is considered, 1988-1999 (12 years).

#### Simulations in the DMC: Global model selection

- Model MIROC5 is a Japanese model that belongs to the project CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5). It is a system of models that relates ocean, ground and atmosphere.
- Aprox. 150 km of horizontal resolution.
- · 49 levels in the vertical.

#### Simulations in the DMC: Regional model selection

- · MIROC5 coupled with WRF
- Horizontal resolution of 25 km
- 45 levels in the vertical





### CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

- In the austral south there's an decrease of temperature for two simulated stations and this
  variable increase for the others stations in the validated period, even though this increase is not
  significant in comparison to the studies previously carried out for the rest of the chilean territory.
- There's an increase of precipitation in the simulated series for the stations of the study. This
  shows a difference respect to the situation in the rest of the country; central and southern
  regions where previous studies show that there's a decrease tendency of precipitation.
- The work presented here is considered as the starting point to develop the initiative "Modelamiento Climático Magallanes". This program will allow us to quantify the future effects of climatic change in the region of Magallanes.
- It is estimated that is necessary to expand the meteorological station net in order to verify the projections that are based on numerical atmospheric models.
- It is required to create protocol of climatic records and data storage so the acquisition becomes more efficient and easy to carry out.

### ACKNOWLEDGEMENTS

- This work has been funded by CONICYT under the Chilean/German International Cooperation Program CONICYT-BMBF, Grant N° BMBF20140052: "Responses of Glaciers, Biosphere and Hydrology to climate variability across the Southern Andes (GABY-VASA)". Further support has been provided by Programa de Transferencia Científica y Tecnológica FNDR/GORE-Magallanes under the initiative "Modelamiento Climático Magallanes", code BIP 30462410-0 and by the GAIA/DPA Scholarship of Universidad de Magallanes (UMAG).
- We thanks the Dirección Meteorológica de Chile to facilitate their results and data coming from the "Convenio de Alta Dirección Pública" finished in 2014. We also thank the department of geophysics of the Universidad de Concepción for the founding given to do this research work.

# Bibliografía

[1]	<ul> <li>Alcafuz, R., Arroyo, R., Delgado, R., Hernández, Y., Morales, J., Ramos,</li> <li>I. (2015). Análisis y publicación de los resultados convenio alta direc- ción pública meteorológica de Chile. Publicación de resultados, Dirección Meteorológica de Chile, Santiago.</li> </ul>
[2]	Aravena, J. y Luckman, B. (2009). Spatiotemporal rainfall patterns in Southern South America. International Journal of Climatology, 29, 2106- 2120.
[3]	Bony, S. y Dufresne, J. (2005). Marine boundary layer clouds at the heart of tropical cloud feedback uncertainties in climate models. Geophys. Res. Lett., 32, L20806, doi:10.1029/2005GL023851.
[4]	Christensen, J., Carter, T., Rummukainen, M., Amanatidis, G. (2007). Evaluating the performance and utility of regional climate models: the PRUDENCE project.
[5]	Garreaud, R. (2011). Cambio Climático: Bases físicas e impactos en Chile. Revista Tierra Adentro-INIA, 93, pp. 13-19.
[6]	Gent, P., Yeager, S., Neale, R., Levis, S., Bailey, D. (2009). Improvements in a half degree atmosphere/land version of the CCSM, Clim. Dyn., 34(6), 819–833, doi:10.1007/s00382-009-0614-8.
[7]	Giorgi, F., Shields, C., Bates, G. (1994). Regional climate change scenarios over the United States produced with a nested regional climate model.
[8]	Giorgi, F. y Francisco, R. (2000). Uncertainties in regional climate change prediction: A regional analysis of ensemble simulations with the HADCM2 coupled AOGCM. Climate Dynamics. 16. 169-182. 10.1007/PL00013733.
[9]	González, A., Aravena, J., Muñoz, A., Soto-Rogel, P., Aguilera, I., Toledo, I. (2017). Variabilidad de la precipitación en la ciudad de Punta Arenas,

Chile, desde principios del siglo XX. Anales del Instituto de la Patagonia. 45. 31-44.

- [10] Hasumi, H. y Emori, S. (2004). K-1 coupled model (MIROC) description. K-1 Tech. Rep., 34 pp. [Available online at http://www.ccsr.utokyo.ac.jp/;agcmadm/.]
- [11] Hasumi, H. (2006). CCSR Ocean Component Model (COCO), version 4.0.
   Center for Climate System Research Rep. 25, 103 pp. [Available online at http://www.ccsr.u-tokyo.ac.jp/; hasumi/COCO/coco4.pdf.]
- [12] Huebener, H., Cubasch, U., Langematz, U., Spangehl, T., Niehorster, F.,
   Fast, I., Kunze, M. (2007). Ensemble climate simulations using a fully coupled ocean-troposphere-stratosphere general circulation model.
- [13] Imbert, A. y Benestad, R. (2005). An improvement of analog model strategy for more reliable local climate change scenarios.
- [14] Jaña, R. y Mansilla, A. (2009). International Colloquium Climate change in Magellan and Antartic regions: evidence and challenges for the future.
- [15] Jones, R., Murphy, J., Noguer, M., Keen, B. (1997). Simulation of climate change over Europe using a nested regional-climate model. II: Comparison of driving and regional model responses to a doubling of carbon dioxide.
- Jung, T., Gulev, S., Rudeva, I., Soloviv, V. (2006). Sensitivity of extratropical cyclone characteristics to horizontal resolution in the ECMWF model. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 132, 1839–1857.
- [17] Meehl, G., Covey, C., Delworth, T., Latif, M., McAvaney, B., Mitchell, J., Stouffer, R., Taylor, K. (2007). The WCRP CMIP3 multimodel dataset: A new era in climate change research. Bull. Amer. Meteor. Soc., 88, 1383–1394.
- [18] Numaguti, A., Takahashi, M., Nakajima, T., Sumi, A. (1997). Description of CCSR/NIES atmospheric general circulation model. National Institute for Environmental Studies, Center for Global Environmental Research Supercomputer Monograph Rep. 3, 1–48.
- [19] Pachauri, R., Allen, M., Barros, V., Broome, J., Cramer, W., Christ, R.,
   ... van Ypersele, J. (2014). IPCC 2014: Climate Change 2014, Synthesis report.

[20]	Pope, V. y Stratton, R. (2002). The processes governing horizontal reso- lution sensitivity in a climate model. Climate Dyn., 19, 211–236.
[21]	Reichler, T. y Kim, J. (2008). How Well Do Coupled Models Simulate Today's Climate?. Bull. Amer. Meteor. Soc 89. 303-311. 10.1175/BAMS- 89-3-303.
[22]	Santana, A., Butorovic, N., Olave, C. (2009). Variación de la temperatura en Punta Arenas (Chile) en los últimos 120 años. Anales del Instituto de la Patagonia, 37(1), 85-96.
[23]	Schneider, C. y Gies, D. (2004). Effect of El Niño-Southern Oscillation on southernmost South America precipitation at 53°S revealed from NCEP- NCAR reanalyses and weather station data. International Journal of Cli- matology, 24, 1057-1076.
[24]	<ul> <li>Shaffrey, L., Stevens, I., Norton, M., Robert, M., Vidale, P., Harle, J.,</li> <li>Jrrar, A., Stevens, D., Woodage, M., Demory, M., Donners, J., Clark,</li> <li>D., Clayton, A., Cole, J., Wilson, S., Connolley, W., Davies, T., Iwi, A.,</li> <li>Johns, T., King, J., New, A., Slingo, J., Slingo, A., Sttenman, L., Martin,</li> <li>G. (2009). U.K. HiGEM: The new U.K. high-resolution global environmental model—Model description and basic evaluation. J. Climate, 22, 1861–1896.</li> </ul>
[25]	Skamarock, W., Klemp, J., Dudhia, J., Gill, D., Barker, D., Wang, W., Powers, J. (2005). A description of the advanced research wrf version 2 (Inf. Tec.). DTIC Document.
[26]	Shamarock, W., Klemp, J., Dudhia, J., Gill, D., Barker, D., Duda, M., Huang, X., Wang, W., Powers, J. (2008). A description of the advanced research WRF version 3. NCAR technical note NCAR/TN/u2013475. 104 pp.
[27]	Skamarock, W. y Klemp, J. (2008). A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications. Journal of Computational Physics, 227(7):3465-3485.
[28]	Cruz, C. y Calderón, J. (2008). Guía Climática Práctica. Dirección Me- teorológica de Chile.

[29]	Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Averyt, K., Tignor, M., Miller, H., Chen, Z., Eds. (2007). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, 996 pp.
[30]	Stocker, T., Qin, D., Plattner, G., Tignor, M., Allen, S., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P. (2013). IPCC, 2013. Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.
[31]	Taylor, E., Stouffer, J., Meehl, A. (2012). An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. Bull. Amer. Meteor. Soc.; 93(4): p. 485-498.
[32]	Thompson, D. y Wallace, J. (2000). Annular Modes in the Extratropical Circulation. Part I: Month-to-Month Variability. Journal of Climate, 13(694), 1000-1016.
[33]	Von Storch, H., Zorita, E., Cubasch, U. (1993). Downscaling of Global Climate Change Estimates to Regional Scales: An Application to Iberian Rainfall in Wintertime.
[34]	Watanabe, M., Suzuki, T., Oíshi, R., Komuro, Y., Watanabe, S., Emo- ri, S., Takemura, T., Chikira, M., Ogura, T., Sekiguchi, M., Takata, K., Yamazaki, D., Yokohata, T., Nozawa, T., Hasumi, H., Tatebe, H., Kimo- to, M. (2010). Improved Climate Simulation by MIROC5: Mean States, Variability, and Climate Sensitivity. Journal of Climate. 23. 6312-6335. 10.1175/2010JCLI3679.1.
[35]	Wilby, R., Charles, S., Zorita, E., Timbal, B., Whetton, P., Mearns, L. (2004). Guidelines for use of Climate Scenarios Developed from Statistical Downscaling Methods.
[36]	Wilks, D. (2011). Statistical methods in the atmospheric sciences (Vol.100). Academic press.