



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA

IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA ALTURA DE LA ISOTERMA 0°C
SOBRE CHILE CENTRAL

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGÍSTER EN METEOROLOGÍA Y CLIMATOLOGÍA

PIERO BASTIÁN MARDONES BASCUÑÁN

PROFESOR GUÍA:
RENÉ GARREAUD SALAZAR

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ROBERTO RONDANELLI ROJAS
ALDO MONTECINOS GULA

Este trabajo ha sido financiado por CONICYT PFCHA/MAGÍSTER
NACIONAL/2017 - 22170369

SANTIAGO DE CHILE

2019

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE MAGÍSTER EN METEOROLOGÍA Y CLIMATOLOGÍA
POR: PIERO BASTIÁN MARDONES BASCUÑÁN
FECHA: 2019
PROF. GUÍA: RENÉ GARREAUD SALAZAR

IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA ALTURA DE LA ISOTERMA 0°C SOBRE CHILE CENTRAL

En esta tesis se estudió la distribución de altura de la isoterma 0° C (H_0) en Chile central, para días con y sin precipitación en el presente y futuro. Para establecer los parámetros actuales de la distribución se utilizaron observaciones de radiosonda y datos del Climate Forecast System Reanalysis (CFSR). Para caracterizar la distribución en el futuro se utilizó un conjunto de cinco modelos CMIP5 con la mayor resolución espacial disponible. Casi todos los modelos subestimaron el promedio de la distribución de H_0 ($\overline{H_0}$) en el periodo histórico, tanto para días con y sin precipitación en torno a un 5 y 9 % respectivamente. Se proyecta un incremento de $\overline{H_0}$ para fines de siglo (2071-2100) bajo el escenario RCP8.5 de aproximadamente 400 m para días con precipitación y 600 m para días sin precipitación. Para el percentil 95 de la distribución de H_0 ($H_{0.95}$) este aumento fue mayor aún, en torno a 500 m para días con lluvia y 600 m para días sin lluvia. La frecuencia de eventos extremos de H_0 sobre el percentil 95 actual (F_{95}) será entre un 15 % y 30 % en Chile central para fines de siglo, siendo mayor este porcentaje hacia el norte. Los modelos indicaron una disminución del número de días con precipitación de entre 15 a 5 días por año. Es decir, bajo este escenario lloverá una menor cantidad de días, pero los eventos extremos de H_0 serán más frecuentes y podrían ser aún más extremos debido al desplazamiento del $H_{0.95}$. Estas variaciones se traducirán en un incremento del área pluvial y por lo tanto en el volumen de agua disponible para todas las cuencas andinas de Chile central durante las tormentas. Las cuencas más afectadas debido al aumento de $\overline{H_0}$ y $H_{0.95}$ en el futuro serán aquellas en torno a 34°S donde el área pluvial se incrementará cerca de 6 veces el área bajo el promedio actual de H_0 . Esto implica que en el futuro montos relativamente bajos de precipitación, entre 10 a 20 mm/día, podrían ser capaces de producir desastres hidrometeorológicos de gran magnitud.

Agradecimientos

Primero que todo quiero agradecer a mis padres que me dieron todo para poder llegar hasta acá. También agradezco a mis amigos Rocío, Mirko, Camilo y Vale con los que aprendí un montón en este tiempo y quienes hicieron que Santiago se transformara un buen lugar para un penquista como yo. Le doy las gracias a mi polola Josse que me inspiró para terminar este trabajo y por su cariño incondicional durante los últimos meses de trabajo.

Agradezco a mi profesor guía René Garreaud, por motivarme siempre a sacar este trabajo adelante en el menor tiempo posible y por todo el apoyo que me brindó durante el proceso. De una u otra forma me enseñó que uno siempre se puede superar a si mismo. Quisiera agradecer también al profesor Roberto Rondanelli que también siempre me brindó su ayuda y con el cual tuve la oportunidad de trabajar durante el magíster en sus proyectos siempre muy innovadores. Gracias al profesor Aldo Montecinos que me inspiró para realizar el magíster y me logró transmitir su interés por la atmósfera, sin él tampoco hubiese llegado hasta acá.

Para finalizar, agradecimientos al programa de formación de capital humano avanzado de CONICYT con lo cual se financió mis estudios a través de la beca de Magíster Nacional. Agradecimientos al Centro del Clima y la Resiliencia (CR2) por los recursos y datos aportados para poder realizar este trabajo. Finalmente, agradezco también a la Dirección Meteorológica de Chile por todos los datos que han recolectado a lo largo de los años sin los cuales no sería posible esta tesis.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Tormentas en Chile central	1
1.2. La altura de la isoterma 0°C (H_0) durante tormentas	2
1.3. Proyecciones de temperatura y precipitación para mediados y fines del siglo XXI	4
2. Hipótesis y objetivos	7
2.1. Hipótesis	7
2.2. Objetivos	7
2.2.1. General	7
2.2.2. Específicos	7
3. Metodología y datos	9
3.1. Zona de estudio	9
3.2. Datos	9
3.3. Obtención de H_0 para días con y sin precipitación	12
3.3.1. Obtención de H_0 en los modelos	12
3.4. Métricas de evaluación	14
3.4.1. Cambios en la distribución de H_0 para días con y sin precipitación	14
3.5. Impacto hidrológico	15
3.5.1. Área sobre 1000 m.s.n.m	16
4. Resultados	17
4.1. Incertidumbre en el cálculo de H_0	17
4.1.1. Incertidumbre en el promedio diario de H_0	17
4.1.2. Validación CFSR en Chile central	20
4.2. Análisis global de $\overline{H_0}$ (NCEP-CFSR)	22
4.3. Evaluación modelos CMIP5 (histórico)	27

4.3.1.	Precipitación en los modelos	27
4.3.2.	Evaluación de H_0 por latitud	29
4.3.3.	Errores por modelo	31
4.4.	Cambios en la distribución de H_0 a futuro	34
4.4.1.	Cambio en el promedio ($\Delta\overline{H_0}$)	36
4.4.2.	Cambio en los extremos ($\Delta H_{0.95}$)	37
4.4.3.	Cambio en la frecuencia de eventos extremos (F_{95})	38
4.4.4.	Contexto global de los cambios en Chile central	39
4.5.	Impacto hidrológico de las variaciones de H_0	42
4.5.1.	Incremento del área pluvial en las cuencas andinas de Chile central	44
4.5.2.	Estimación de caudales futuros	47
5.	Discusión y conclusiones	49
5.1.	Discusión	49
5.1.1.	Diferencia H_0 entre días con y sin precipitación	49
5.1.2.	Disminución de H_0 en zonas cordilleranas	52
5.1.3.	Contexto global de los cambios en Chile central	54
5.1.4.	Factibilidad de escenario RCP8.5	55
5.2.	Conclusiones	57
	Bibliografía	59
	Anexos	64
6.	Figuras	64

Índice de Tablas

3.1. Fuentes de datos (valores diarios) utilizadas para caracterizar la condición actual de la distribución de H_0	11
3.2. Conjunto de modelos CMIP5 utilizados para caracterizar la condición futura de la distribución de H_0	13
4.1. Error porcentual asociado a cada percentil al considerar el promedio diario de H_0 en vez de los valores instantáneos, para días con y sin precipitación.	19
4.2. Error porcentual asociado a cada percentil al comparar la distribución de H_0 para días con y sin precipitación entre CFSR y la observación en Santo Domingo.	22

Índice de Ilustraciones

1.1. Mapa topográfico de Sudamérica y Chile central.	2
1.2. Variación latitudinal de H_0 y precipitación.	4
1.3. Cambios de la temperatura superficial en Chile central bajo escenarios RCP8.5 y RCP4.5 para mediados y fines de siglo.	6
1.4. Cambios de la precipitación en Chile central bajo escenarios RCP8.5 y RCP4.5 para mediados y fines de siglo.	6
3.1. Topografía de la zona de estudio y ubicación de las estaciones.	10
3.2. Esquema de la metodología utilizada para calcular el área sobre 1000 m.s.n.m.	16
4.1. Distribución de probabilidad de H_0 observado en Santo Domingo para días y eventos con precipitación.	18
4.2. Distribución de probabilidad de H_0 observado en Santo Domingo para días y eventos sin precipitación.	19
4.3. Comparación entre la precipitación diaria observada y la obtenida con CFSR en Santo Domingo.	20
4.4. Comparación entre el promedio diario de H_0 observado y el obtenido con CFSR en Santo Domingo.	21
4.5. Distribución global de $\overline{H_0}$ (m.s.n.m.) para días sin precipitación en invierno. 23	
4.6. Distribución global de $\overline{H_0}$ (m.s.n.m.) para días sin precipitación en invierno. 23	
4.7. Diferencia del $\overline{H_0}$ entre días con y sin precipitación (CPP-SPP) con el reanálisis NCEP CFSR.	24
4.8. Desviación estándar de H_0 (m.s.n.m) para días sin precipitación.	25
4.9. Desviación estándar de H_0 (m.s.n.m) para días con precipitación en invierno 26	
4.10. Precipitación anual (mm/año) obtenida con (izquierda) CFSR y (derecha) el modelo CNRM-CM5 en el periodo 1979-2005.	27

4.11. Promedio anual de número de días con precipitación (días por año) obtenida con (izquierda) CFSR y (derecha) el modelo CNRM-CM5 en el periodo 1979-2005.	28
4.12. H_0 promedio en Chile central durante días sin y con precipitación. . . .	29
4.13. Distribución actual de H_0 a lo largo de Chile central para días sin precipitación.	30
4.14. Distribución actual de H_0 a lo largo de Chile central para días sin precipitación.	31
4.15. Diferencia del $\overline{H_0}$ entre días con y sin precipitación (CPP-SPP) durante invierno con el modelo CMCC-CM (histórico).	32
4.16. Diagrama de dispersión del error porcentual al representar $\overline{H_0}$ para días con precipitación (CPP) versus el error en el número de días con precipitación (N_{pp}).	33
4.17. Diagrama de dispersión del error porcentual al representar $\overline{H_0}$ para días con precipitación (CPP) versus el error para los días sin precipitación (SPP).	34
4.18. Distribución futura de H_0 en días sin precipitación.	35
4.19. Distribución futura de H_0 en días con precipitación.	35
4.20. Esquema de la distribución de H_0 y métricas utilizadas para evaluar los cambios a futuro.	36
4.21. Cambio en el $\overline{H_0}$ para fines de siglo en Chile central para días con y sin precipitación.	37
4.22. Cambio en el percentil 95 de H_0 para fines de siglo en Chile central para días con y sin precipitación.	38
4.23. Frecuencia de eventos extremos (F_{95}) y cambio en el número de días con precipitación (ΔN_{pp}) para fines de siglo en Chile central.	39
4.24. Distribución global de $\Delta\overline{H_0}$ (m) en días sin precipitación para fines de siglo con el modelo CMCC-CM.	40
4.25. Distribución global de $\Delta\overline{H_0}$ (m) en días con precipitación para fines de siglo con el modelo CMCC-CM.	41
4.26. Distribución global de la diferencia de $\Delta\overline{H_0}$ entre días con y sin precipitación (CPP-SPP) con el modelo CMCC-CM.	41
4.27. Aumento promedio de H_0 proyectado por los modelos para fines de siglo, sobre la línea base actual estimada con CFSR para días sin precipitación.	42
4.28. Aumento promedio de H_0 proyectado por los modelos para fines de siglo, sobre la línea base actual estimada con CFSR para días con precipitación.	43

4.29. Área (km^2) sobre 1000 m.s.n.m y bajo el promedio actual de la distribución de H_0 . Factor de incremento del área sobre 1000 m.s.n.m y bajo H_0 , con respecto al área bajo el promedio actual de H_0	44
4.30. Topografía en torno a la región Metropolitana y contornos de H_0 para la cuenca del Maipo en el Manzano.	46
4.31. Caudal estimado para distintos valores de precipitación con un cierto nivel de H_0 en la cuenca del Maipo en el Manzano.	47
4.32. Precipitación necesaria para tener un caudal sobre $500 m^3/s$ en las cuencas de Chile central.	48
5.1. Compuesto de la evolución de H_0 , temperatura, presión superficial y para eventos de precipitación.	50
5.2. Promedio zonal del cambio anual de la temperatura atmosférica con modelos CMIP5.	51
5.3. Área (km^2) sobre 1000 m.s.n.m y bajo el promedio actual de la distribución de H_0 .Factor de incremento del área sobre 1000 m.s.n.m y bajo H_0 , con respecto al área bajo el promedio actual de H_0 considerando una disminución de 300 m.	53
5.4. Precipitación necesaria para tener un caudal sobre $500 m^3/s$ para las cuencas de Chile central considerando una disminución de 300 m en las líneas base de H_0	54
5.5. Emisión acumulada de CO2 para el año 2100 en base a una variación por año hipotética a partir del valor en el año 2018.	56
6.1. Distribución de probabilidad de H_0 observado en Santo Domingo para días y eventos con precipitación en Junio-Julio.	64
6.2. Distribución de probabilidad de H_0 observado en Santo Domingo para días y eventos sin precipitación en Junio-Julio.	65
6.3. Correlación punto a punto entre H_0 observada en Santo Domingo y de CFSR.	66
6.4. Diferencia del $\overline{H_0}$ entre días con y sin precipitación (CPP-SPP) con CFSR considerando solo los meses Junio y Julio (Diciembre Enero en hemisferio norte).	67
6.5. Frecuencia de eventos sobre el promedio actual de H_0 (histórico)	67
6.6. H_0 , temperatura y precipitación acumulada durante un evento de lluvia en Santiago.	68

6.7. H_0 , temperatura y precipitación acumulada durante un evento de lluvia en Santiago.	68
6.8. H_0 , temperatura y precipitación acumulada durante un evento de lluvia en Santiago.	69
6.9. H_0 , temperatura y precipitación acumulada durante un evento de lluvia en Santiago.	69
6.10. H_0 , temperatura y precipitación acumulada durante un evento de lluvia en Santiago.	70
6.11. H_0 , temperatura y precipitación acumulada durante un evento de lluvia en Santiago.	70
6.12. Curvas hipsométricas de las cuencas de Limarí en Peñones Bajos y Maipo en el Manzano.	71

Capítulo 1

Introducción

1.1. Tormentas en Chile central

Chile central (CC) corresponde a la angosta faja de tierra (≈ 200 km) que se extiende entre 30° S y 36° S, limitada al oeste por el océano Pacífico y al este por la cordillera de Los Andes, la cual alcanza alturas sobre los 4000 msnm (Figura 1.1). Esta zona, altamente poblada (más de 8 millones de habitantes), se caracteriza por tener un clima semiárido mediterráneo con montos de precipitación anuales que varían entre 200-1000 mm, dependiendo de la latitud y altura (panel inferior, Figura 1.2). La precipitación se concentra principalmente en los meses de invierno austral (Mayo-Septiembre), cuando el Anticiclón del Pacífico Sur se desplaza hacia el norte ([Saavedra y Foppiano, 1992]). Este desplazamiento expone la zona a tormentas esporádicas, con una duración entre 1 y 4 días, debido al paso de sistemas de baja presión (superficiales y de niveles altos) y los frentes superficiales asociados ([Falvey y Garreaud, 2007]). Los episodios de precipitación suelen manifestarse como tormentas frías moviéndose por la región desde oeste a este, con bloqueo del flujo en niveles bajos y la formación de un jet de barrera del norte debido a la presencia de la cordillera de Los Andes ([Falvey y Garreaud, 2007]; [Barrett *et al.*, 2009]). Los Andes no solo juegan un rol importante bloqueando el flujo en niveles bajos, también generan un incremento orográfico de la precipitación, con montos entre 1 y 3 veces mayor en la pendiente de barlovento que en el valle ([Falvey y Garreaud, 2007]). Los eventos extremos de precipitación en Chile central (> 40 mm/día) se han asociado en su mayoría con largos corredores de vapor de agua proveniente de los trópicos, denominados ríos atmosféricos ([Zhu y Newell, 1998]), los cuales

impactan a la cordillera de Los Andes previo a la llegada del frente frío y presentan otras características como una baja más intensa al sur de Chile ([Viale y Nuñez, 2011], [Valenzuela y Garreaud, 2019]).

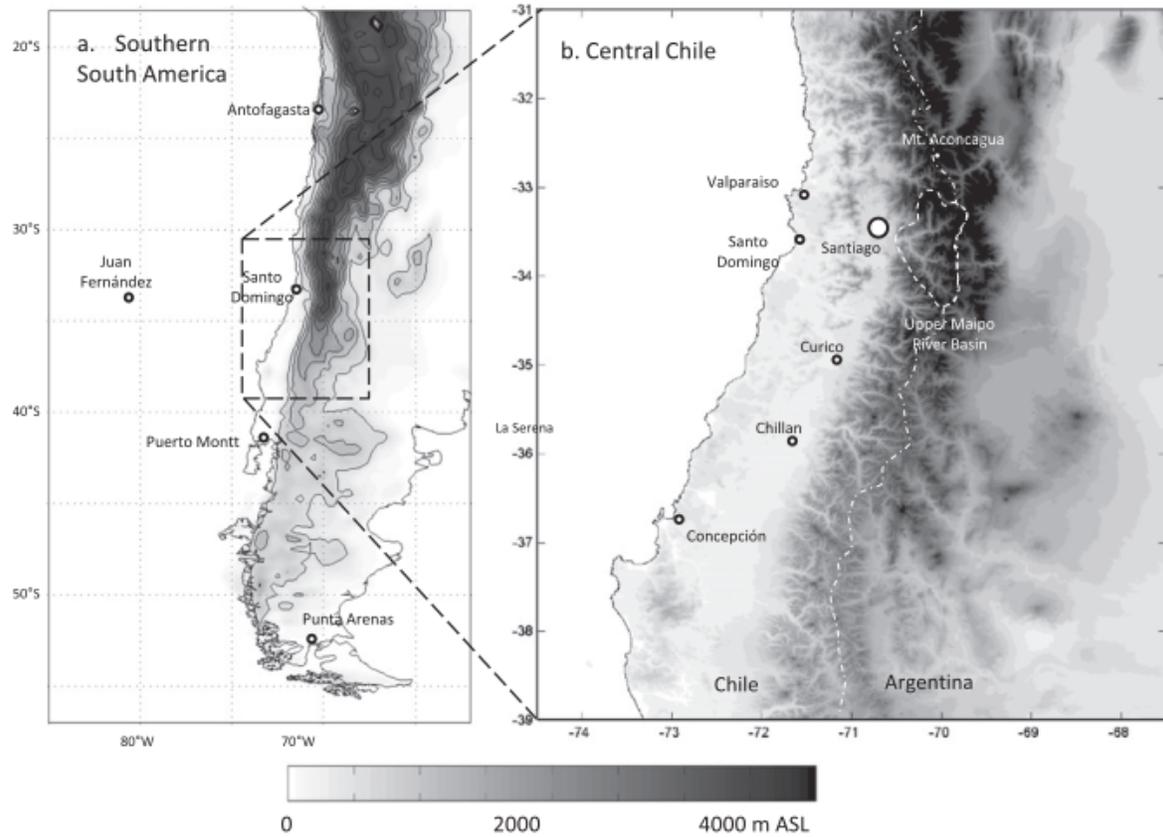


Figura 1.1: (a) Mapa topográfico de Sudamérica y ubicación de las cuatro estaciones de radiosondeos operadas por la DMC. (b) Mapa de Chile central y ubicación de sus ciudades principales. Tomada de [Garreaud, 2013].

1.2. La altura de la isoterma 0°C (H_0) durante tormentas

La altura de la isoterma 0°C (H_0) es el nivel donde la temperatura del aire alcanza los 0°C . Esta altura es una buena referencia de la línea de nieve en la tropósfera libre (e.g., [Minder *et al.*, 2011]; [White *et al.*, 2010]) y delimita en forma aproximada aquellas zonas que recibirán precipitación líquida (bajo H_0) o sólida (sobre H_0), determinando en gran parte la respuesta hidrológica en las cuencas andinas de Chile central.

En general, H_0 se vuelve muy importante en zonas donde es comparable con la altura de la cordillera (e.g Chile central, panel superior Figura 1.2). En torno a 33°S , esta altura en promedio es cercana a los 2200 m ([Garreaud, 1992]) durante eventos de precipitación, sin embargo cada tormenta tiene su propio valor de H_0 , pudiendo superar los 3000 m de altura en algunos casos. Esto puede dar lugar a desastres hidrometeorológicos con numerosas pérdidas humanas, como ha sido documentado en los trabajos de [Garreaud y Rutllant, 1996] y [Garreaud, 2013]. Lo anterior se debe a que si H_0 es muy alta aumenta significativamente el área pluvial y volumen de agua disponible en la cuenca, generando crecidas de ríos y aluviones. [Garreaud, 2013] realizó una clasificación de las tormentas de acuerdo a la temperatura promedio registrada durante el evento, dividiendo las tormentas en frías ($T_p \leq 9,5^\circ\text{C}$) y cálidas ($T_p \geq 10,5^\circ\text{C}$). Las tormentas frías presentan características ya mencionadas en los trabajos de la sección anterior ([Falvey y Garreaud, 2007]; [Barrett *et al.*, 2009]; [Viale y Nuñez, 2011]), sin embargo las cálidas (cerca de 1/3 de los casos) poseen características muy diferentes (precipitación y temperatura uniforme durante el evento) y se asocian a eventos con H_0 sobre los 3000 m. Debido a lo anterior es muy importante conocer la temperatura de cada tormenta, la cual es dominada principalmente por la advección horizontal.

El problema más recurrente al estudiar H_0 es la falta de datos en altura que proporcionen directamente el valor de esta variable. Actualmente Chile solo cuenta con cuatro estaciones en altura operadas por la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), y solo una de ellas para Chile Central (panel a, Figura 1.1). Esta estación se ubica en Santo Domingo (cerca de la costa, $33,65^\circ\text{S}$), y proporciona datos de radiosonda dos veces al día (1200 y 0000 UTC) desde Septiembre de 1999. Anterior a esta fecha (1968-1999) los radiosondas eran lanzados en la estación Quintero (también costera), ubicada 80 km al norte de Santo Domingo, sin embargo los datos no poseen la misma regularidad y calidad que los de Santo Domingo. Para extender espacialmente el análisis se vuelve necesario recurrir a otras fuentes de datos como reanálisis, o hacer estimaciones en base a la temperatura superficial.

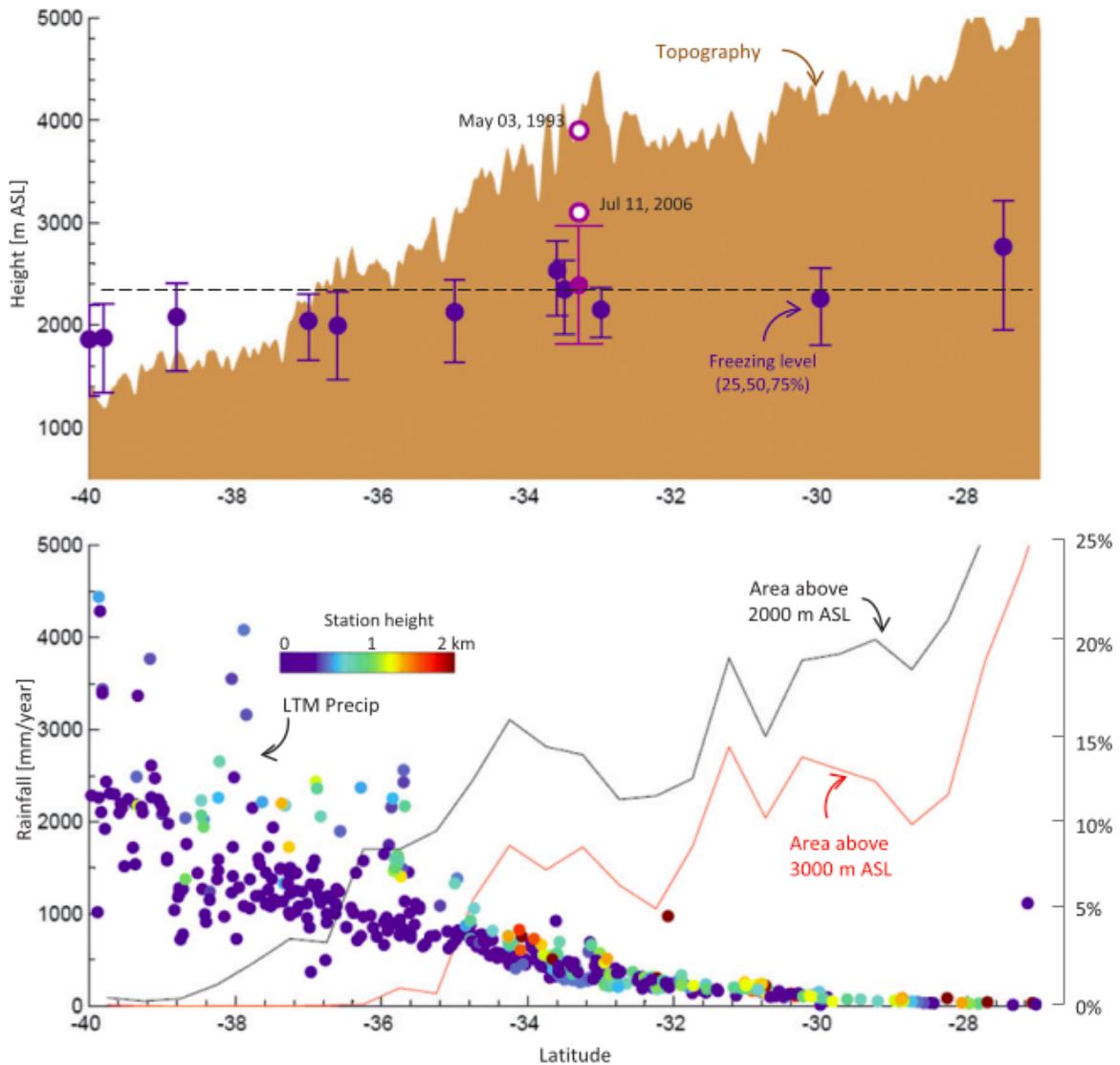


Figura 1.2: (Superior) Variación latitudinal de de H_0 y perfil topográfico; (Inferior) Precipitación anual promedio (mm/año) y porcentaje de área sobre 2000 (línea azul) y 3000 m (línea roja). Tomada de [Garreaud, 2013].

1.3. Proyecciones de temperatura y precipitación para mediados y fines del siglo XXI

Durante los últimos años Chile Central se ha convertido en uno de los focos de estudio acerca del cambio climático antropogénico, debido a las tendencias observadas (y sus impactos) de temperatura y precipitación. Las tendencias actuales de temperatura son presentadas en el trabajo de [Falvey y Garreaud, 2009], donde destacan un calenta-

miento cerca de la cordillera de Los Andes para el periodo 1979-2005, acompañado de un enfriamiento en zonas costeras. La zona también ha presentado una drástica disminución de la precipitación en las últimas décadas, experimentando una de sus sequías más intensas de la historia desde el año 2010, con un déficit cercano al 30 % ([Boisier *et al.*, 2016]). [Carrasco *et al.*, 2005] analizando datos de radiosonda en Chile central observó un calentamiento en la tropósfera media con un aumento en H_0 de 122 ± 8 m y 200 ± 6 m en invierno y verano, respectivamente, entre los años 1975-2001. Este calentamiento implica una elevación de la línea de nieve y se sugiere como la principal causa del retroceso de los glaciares en esta zona. Actualmente hay numerosos trabajos que reportan proyecciones de temperatura en Sudamérica para fines y mediados del siglo XXI. En general todas estas proyecciones coinciden en un calentamiento superficial y disminución de la precipitación para Chile Central ([Bradley *et al.*, 2004]; [Blázquez y Nuñez, 2013]; [Barros *et al.*, 2015]; [Cabré *et al.*, 2014], [Bozkurt *et al.*, 2017]). [Zazulie *et al.*, 2018] sugiere un aumento de la temperatura superficial bajo distintos escenarios (RCP4.5, RCP8.5) de $2,5^\circ$ C durante el invierno para mediados de siglo (2040-2065), mientras que para zonas más elevadas se espera que este calentamiento sea de hasta 5° C entre 2075-2100 (Figura 1.3). Con respecto a las proyecciones de precipitación estas muestran una disminución cercana a 1 mm/día para Chile central durante el invierno bajo el escenario RCP8.5, lo cual representa cerca del 20 % del valor promedio (Figura 1.4). Es muy importante destacar que el aumento de temperatura proyectado representa un promedio espacial y temporal de las condiciones esperadas, el cual está considerando en su gran mayoría días sin precipitación, por lo cual no necesariamente implica que aumente la temperatura durante las tormentas. Además, tampoco da cuenta de cambios en la estructura vertical de la columna de aire que pueden afectar directamente H_0 . Esta incertidumbre y la necesidad de diferenciar los cambios entre días con y sin precipitación es la motivación principal de este trabajo.

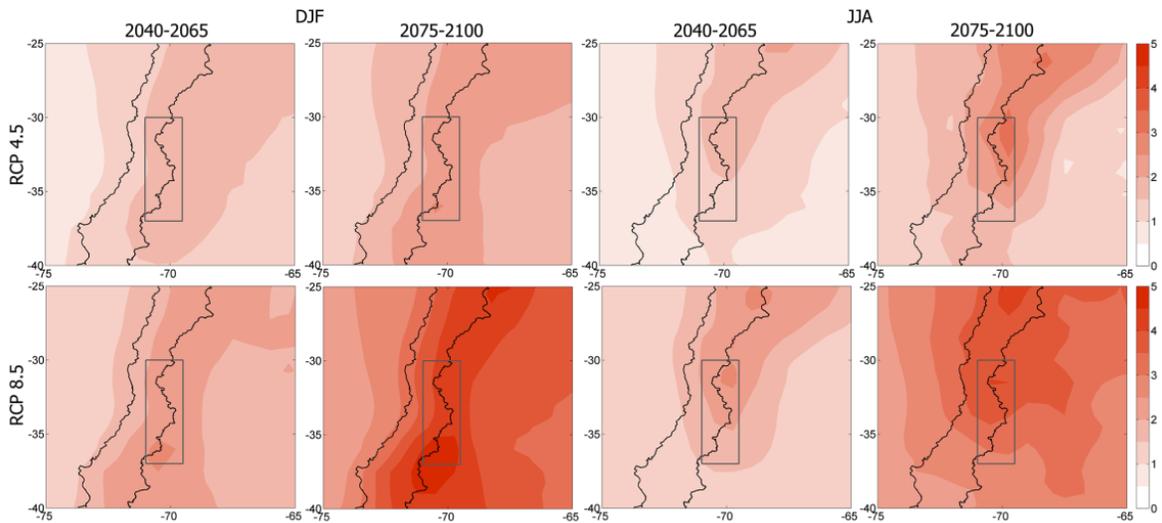


Figura 1.3: Cambios de temperatura superficial ($^{\circ}\text{C}$) relativos al periodo 1980-2005, para RCP4.5 (arriba) y RCP8.5 (abajo) durante invierno (JJA) y verano (DJF) en los periodos 2040-2065 y 2075-2100. Tomado de [Zazulie *et al.*, 2018].

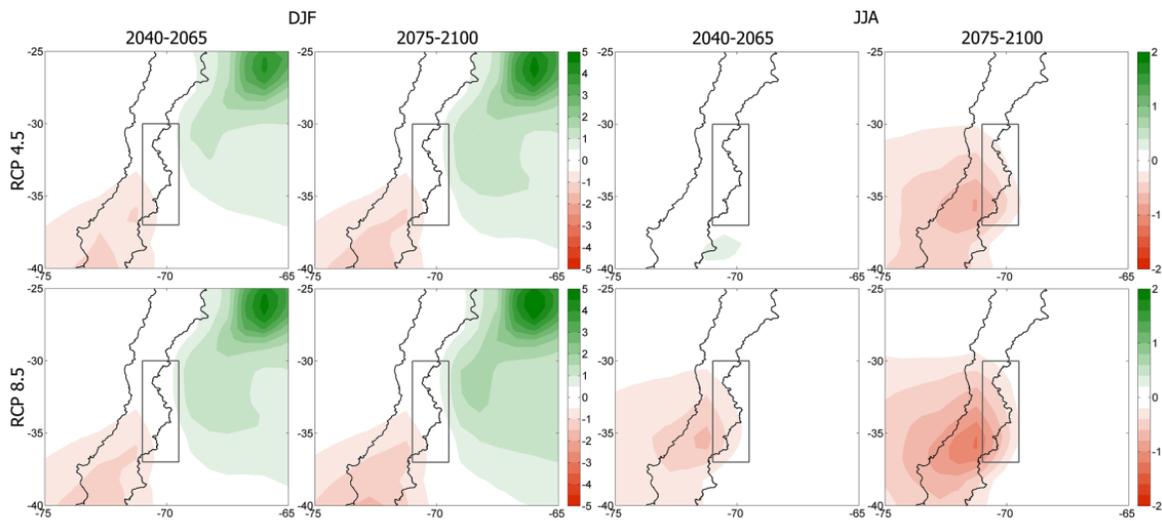


Figura 1.4: Cambios de precipitación (mm/día) relativos al periodo 1980-2005, para RCP4.5 (arriba) y RCP8.5 (abajo) durante invierno (JJA) y verano (DJF) en los periodos 2040-2065 y 2075-2100. La escala de colores es respecto al valor estacional. Tomado de [Zazulie *et al.*, 2018].

Capítulo 2

Hipótesis y objetivos

2.1. Hipótesis

En base a las proyecciones de temperatura media cerca de la superficie para mediados y fines de siglo en Chile central, se espera también un aumento de altura de la isoterma 0°C promedio durante tormentas, incrementando el volumen de agua disponible en las cuencas precordilleranas y haciendo más frecuente la ocurrencia de desastres hidrometeorológicos.

2.2. Objetivos

2.2.1. General

El objetivo general de la investigación es determinar los impactos del cambio climático en la distribución de H_0 durante tormentas para mediados y fines del siglo XXI.

2.2.2. Específicos

Los objetivos específicos son:

- 1) establecer parámetros actuales de la distribución de H_0 y su incertidumbre durante tormentas en Chile central.
- 2) determinar las variaciones en la distribución de H_0 para el clima futuro en Chile central.
- 3) estimar el impacto hidrológico de las variaciones de H_0 en las cuencas precordilleranas de Chile central.

Capítulo 3

Metodología y datos

3.1. Zona de estudio

La zona de estudio corresponde a Chile central, región comprendida entre 30°S y 36°S . El análisis en este trabajo se extendió un poco más al sur, hasta 38°S y se realizó principalmente en torno a los primeros ~ 100 km desde la costa hacia el interior. La topografía de la zona se puede observar en la Figura (3.1) junto a la ubicación de las estaciones de observación utilizadas. Como fue mencionado en la introducción esta zona esta limitada al oeste por el océano Pacífico y al este por la cordillera de Los Andes, la cual posee un gradiente latitudinal alcanzando alturas máximas cercanas a los 5000 msnm hacia el norte en 30°S y 2000 msnm en torno a 38°S .

3.2. Datos

Los datos utilizados poseen resolución temporal diaria (promedios diarios en caso de las observaciones) obtenidos de diversas fuentes y fueron separados en periodos dependiendo si son utilizados para caracterizar la condición actual o para la condición futura. El detalle de estos datos (periodos de medición, resolución espacial, etc) puede ser observado en las Tablas (3.1) y (3.2). Para caracterizar la condición actual en Chile central se utilizó como observaciones los radiosondeos de la estación de Santo Domingo, operada por la Dirección Meteorológica de Chile. Esta estación proporciona, entre

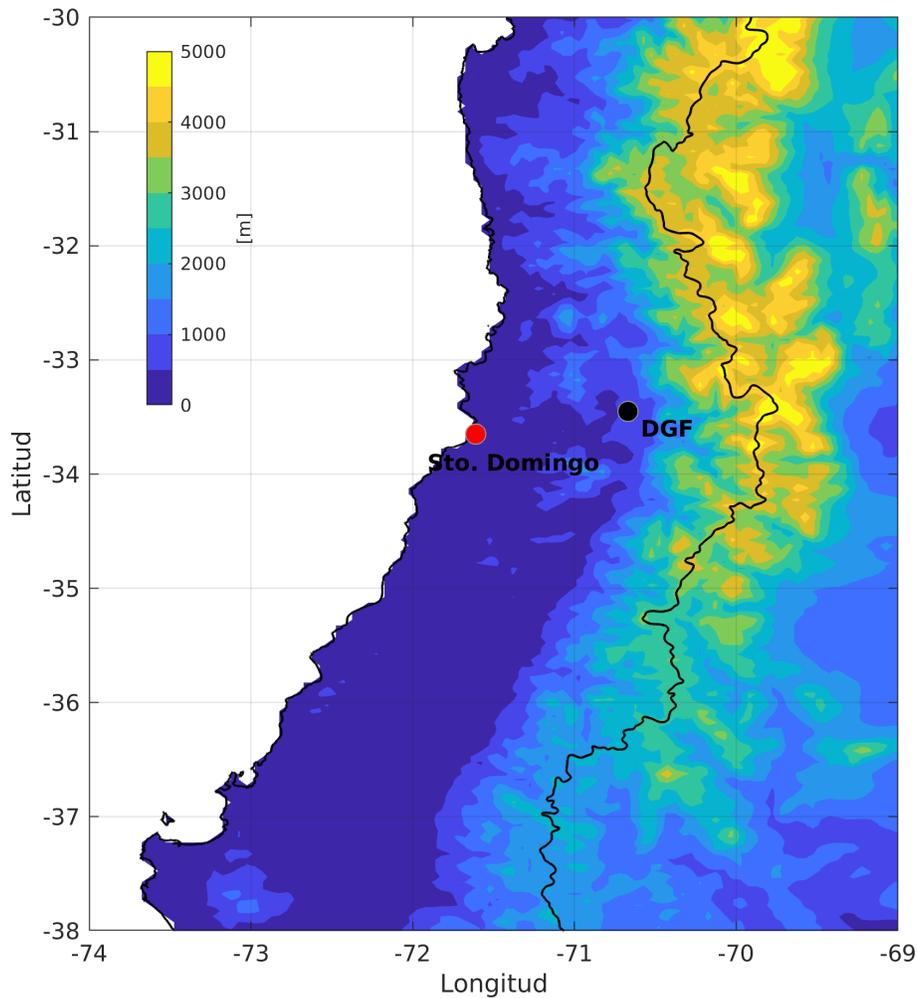


Figura 3.1: Topografía de la zona de estudio y ubicación de las estaciones de observación en altura (Santo Domingo) y superficie (Estación DGF). Datos de topografía de ETOPO2v2.

otras variables, datos de temperatura y altura geopotencial dos veces al día (1200 y 0000 UTC) desde Septiembre de 1999, de los cuales se obtuvo directamente H_0 mediante interpolación lineal entre los niveles verticales. Anterior a esta fecha (1968-1999) las radiosondas eran lanzadas en la estación Quintero (también costera), ubicada 80 km al norte de Santo Domingo, sin embargo los datos no poseen la misma regularidad y calidad que los de Santo Domingo. El promedio diario de H_0 se consideró como el promedio de estas observaciones a las 0000, 1200, y 2400 UTC de un cierto día para obtener un promedio centrado a las 1200UTC. En la misma ubicación se utilizó también datos de precipitación acumulada diaria de una estación meteorológica en superficie, únicamente para comparar con los datos de CFSR.

Para examinar con mayor resolución temporal la distribución de H_0 con y sin preci-

Tabla 3.1: Fuentes de datos (valores diarios) utilizadas para caracterizar la condición actual de la distribución de H_0 . Las variables T,Z, corresponden a la temperatura y altura geopotencial en niveles isobáricos. Las variables Ts, pp, pr representan la temperatura superficial, precipitación acumulada y tasa de precipitación.

	Nombre	VARIABLES	Res. espacial (lat x lon)	Periodo	Referencia
Observaciones	Santo Domingo (en altura)	T, Z,pp	33.7°S x 71.6°O	1999 - 2017	
	DGF (superficie)	Ts, pp	33.4°S x 70.7°O	1999 - 2014	
Productos grillados	NCEP CFSR	H_0 y pr	0.5° x 0.5°	1979 - 2010	[Saha <i>et al.</i> , 2010]

pitación, junto al comportamiento de otras variables meteorológicas, se utilizaron datos horarios de una estación automática Campbell (sensor de temperatura CS500 y TE525 para precipitación) ubicada en el techo de una universidad (30 m sobre el suelo) referida como estación DGF (Figura 3.1), la cual ya fue utilizada anteriormente en el trabajo de [Garreaud, 2013]. En particular, los datos de esta estación se utilizaron para calcular la incertidumbre al promediar H_0 diariamente. Con el fin de extender espacialmente el análisis se utilizó el Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) el cual entrega directamente el campo global de H_0 y precipitación, cada 6 horas, en un grilla rectangular de 0.5° latitud-longitud para el periodo 1979-2010 ([Saha *et al.*, 2010]). Se utilizaron promedios diarios de ambas variables centrados a las 1200UTC (00 + 06 + 12 + 18 + 24). La topografía utilizada en la sección de impacto hidrológico corresponde a los datos de ETOPO2v2 ([Center, 2006]) interpolado a una grilla regular de 0.05° latitud-longitud (5 km aproximadamente). La ubicación y máscaras de las cuencas hidrográficas analizadas fue obtenida del producto CAMELS-CL [Alvarez-Garreton *et al.*, 2018].

La condición futura fue analizada en base a 5 modelos del Coupled Model Inter-comparison Project Phase 5 (CMIP5, [Taylor *et al.*, 2012]) listados en la Tabla (3.2). Las variables utilizadas fueron promedios diarios de altura geopotencial ,temperatura (ambas en niveles isobáricos) y precipitación, además de la fracción de área terrestre para determinar la ubicación de la costa. Se utilizaron estos modelos en particular ya que poseen la mejor resolución disponible para la zona de estudio, donde el modelo con la grilla más gruesa posee una resolución de $1,865^\circ \times 1,875^\circ$ (lat \times lon) y el con resolución más fina tiene $0,748^\circ \times 0,750^\circ$. De estos modelos se utilizó el escenario histórico en el periodo comprendido entre 1976-2005, para evaluar el desempeño de los modelos en representar la condición actual, y las proyecciones con el escenario RCP8.5 ([Riahi *et al.*, 2011]) entre 2011-2100 para evaluar los cambios a futuro. En términos de concentraciones de gases de efecto invernadero y forzamiento radiativo este escenario es el límite superior de los escenarios RCP existentes ([Moss *et al.*, 2010]).

3.3. Obtención de H_0 para días con y sin precipitación

Dependiendo de los datos utilizados H_0 se obtuvo de distinta forma, sin embargo el criterio para discriminar entre días con y sin precipitación fue el mismo. Se consideran días con precipitación aquellos con una precipitación mayor o igual a 5 mm/día, y días sin precipitación aquellos con una tasa menor a este valor ([Garreaud, 2013]). Cabe destacar que se consideraron los días con y sin precipitación solo para los meses de invierno, considerados entre Abril y Septiembre para el hemisferio sur y entre Octubre-Marzo para el hemisferio norte.

3.3.1. Obtención de H_0 en los modelos

En los modelos H_0 fue obtenida en mediante interpolación lineal de los perfiles de temperatura y altura geopotencial en los puntos de grilla más cercanos a la costa de Chile central. Dado lo grueso de la resolución espacial en los modelos, la topografía se encuentra muy suavizada lo cual se refleja en un desplazamiento de la línea de costa del

Tabla 3.2: Conjunto de modelos CMIP5 ([Taylor *et al.*, 2012]) utilizados para caracterizar la condición futura de la distribución de H_0 . Las variables T,Z, corresponden a la temperatura y altura geopotencial en niveles isobáricos. Las variables pr y sftlf representan tasa de precipitación y fracción de área terrestre respectivamente.

Nombre	Variables	Res. espacial (lat x lon)	Niveles isobáricos (hPa)	Periodos
MPI-ESM-LR	T,Z,pr,sftlf	1.865° x 1.875°	1000, 850, 700, 500, 250, 150, 100, 70, 50, 30, 10, 3, 1, 0.3, 0.1 (15)	1976-2005 (HIS)
MIROC5	T,Z,pr,sftlf	1.400° x 1.406°	1000, 850, 700, 500, 250, 100, 50, 10 (8)	2011-2040 (RCP8.5) 2041-2070 (RCP8.5) 2071-2100 (RCP8.5)
CNRM-CM5	T,Z,pr,sftlf	1.400° x 1.406°	1000, 850, 700, 500, 250, 100, 50, 10 (8)	
MRI-CGCM3	T,Z,pr,sftlf	1.121° x 1.125°	1000, 850, 700, 500, 250, 100, 50, 10 (8)	
CMCC-CM	T,Z,pr,sftlf	0.748° x 0.750°	1000, 850, 700, 500, 250, 100, 50, 10 (8)	

modelo con respecto a la línea de costa real, por lo que H_0 fue obtenida en los puntos de grilla más cercanos a la línea de costa del modelo y no en la línea de costa real.

3.4. Métricas de evaluación

Para cuantificar el error de los modelos en representar los parámetros actuales de la distribución de H_0 se utiliza el error porcentual, calculado como

$$Error[\%] = \frac{Valor_{modelo} - Valor_{observado}}{Valor_{observado}} \quad (3.1)$$

3.4.1. Cambios en la distribución de H_0 para días con y sin precipitación

Los cambios en la distribución de H_0 para el futuro son determinados utilizando los modelos CMIP5 para tres periodos: 2011-2040 (presente y futuro cercano), 2041-2070 (mediados de siglo) y 2071-2100 (fines de siglo) en función de los siguientes parámetros

$$\Delta\overline{H_0}[m] = \overline{H_0}^{RCP} - \overline{H_0}^{HIS} \quad (3.2)$$

El parámetro $\Delta\overline{H_0}$ representa el cambio en el promedio de la distribución de H_0 entre la condición futura, dada por el escenario RCP de los modelos en los tres periodos futuros y la condición histórica (1976-2005).

Para dar cuenta del cambio en los extremos de la distribución se calcula el parámetro $\Delta H_{0.95}$ de la forma

$$\Delta H_{0.95}[m] = H_{0.95}^{RCP} - H_{0.95}^{HIS} \quad (3.3)$$

donde $H_{0.95}^{RCP}$ representa el percentil 95 de la distribución de H_0 en los periodos futuros con el escenario RCP y $H_{0.95}^{HIS}$ el percentil 95 en el periodo histórico (1976-2005).

Con el objetivo de cuantificar que tan frecuentes serán los extremos actuales de H_0 para días con precipitación, se calculó aparte el parámetro F_{95} como el porcentaje de datos en el futuro que supera el valor del percentil 95 del periodo histórico, esto es

$$F_{95}[\%] = 100 \times \frac{N^{RCP}}{N_{total}} = 100 \times \frac{\text{número de casos donde}(H_0^{RCP} > H_{0.95}^{HIS})}{\text{número total de días con pp (futuro)}} \quad (3.4)$$

donde N^{RCP} representa el número de casos en la distribución futura de H_0 donde se supera el valor del percentil 95 del periodo histórico, y N_{total} el número total de elementos de la distribución futura de H_0 para días con precipitación o dicho de otra forma el número total de días con precipitación en el periodo futuro. Por definición de percentil al calcular F_{95} para el periodo histórico este porcentaje sería el 5% en todos los modelos. Hay que destacar el hecho que todos estos parámetros se calcularon comparando cada modelo con si mismo, descartando de esta forma cualquier sesgo sistemático asociado a algún modelo en particular.

3.5. Impacto hidrológico

Para determinar el impacto hidrológico sobre las cuencas andinas de Chile central se calculó el área terrestre entre 1000 m.s.n.m y el promedio actual de la distribución de H_0 ($\overline{H_0}$) en cada cuenca. El proceso se realizó también para el percentil 95 de la distribución actual ($H_{0.95}$). Ambos valores para la condición actual ($\overline{H_0}$ y $H_{0.95}$) corresponden a los obtenidos con CFSR. Con los cambios promedio proyectados se calculó nuevamente esta área, es decir a la línea base actual de $\overline{H_0}$ y $H_{0.95}$ (obtenida con CFSR) se le sumó el $\Delta\overline{H_0}$ y $\Delta H_{0.95}$ respectivamente (obtenidos con los modelos) y se calculó el área entre 1000 m.s.n.m y estos nuevos valores. De esta forma se obtuvo una proyección del área entre 1000 m.s.n.m y $\overline{H_0}$ y $H_{0.95}$ para el futuro. Con estos dos valores de área pluvial (actual y futuro) se calculó un factor de incremento con respecto al $\overline{H_0}$ actual de la forma

$$FI = \frac{(\text{Área entre 1000m y } H_0 \text{ futuro})}{(\text{Área entre 1000m y } \overline{H_0} \text{ actual})} \quad (3.5)$$

3.5.1. Área sobre 1000 m.s.n.m

El detalle sobre como se calculó el área sobre 1000 m.s.n.m para cada cuenca se presenta a continuación. Con los datos de topografía de ETOPO2v2 se calculó el área terrestre sobre 1000 m.s.n.m y el máximo de altura para cada cuenca, en cajas de $0,05^\circ$ de latitud por $0,05^\circ$ de longitud. Cada caja se multiplicó por el número de veces en que se registró una cierta altura, en intervalos de 10m, en una determinada cuenca (histograma de alturas). Calculando la suma acumulada del área por altura se obtuvo las curvas hipsométricas por cuenca. La Figura (3.2) representa de forma esquemática la metodología utilizada para este cálculo. Con las curvas hipsométricas se puede obtener directamente el área entre 1000 m.s.n.m y una cierta altura. Para calcular el caudal instantáneo asociado a una cierta área pluvial se multiplicó directamente por un valor de precipitación. Al hacer el cálculo de esta forma se consideró que toda la precipitación caída escurre por las pendientes, es decir no hay evaporación ni percolación por lo cual este valor representa el caudal máximo para una cierta precipitación.

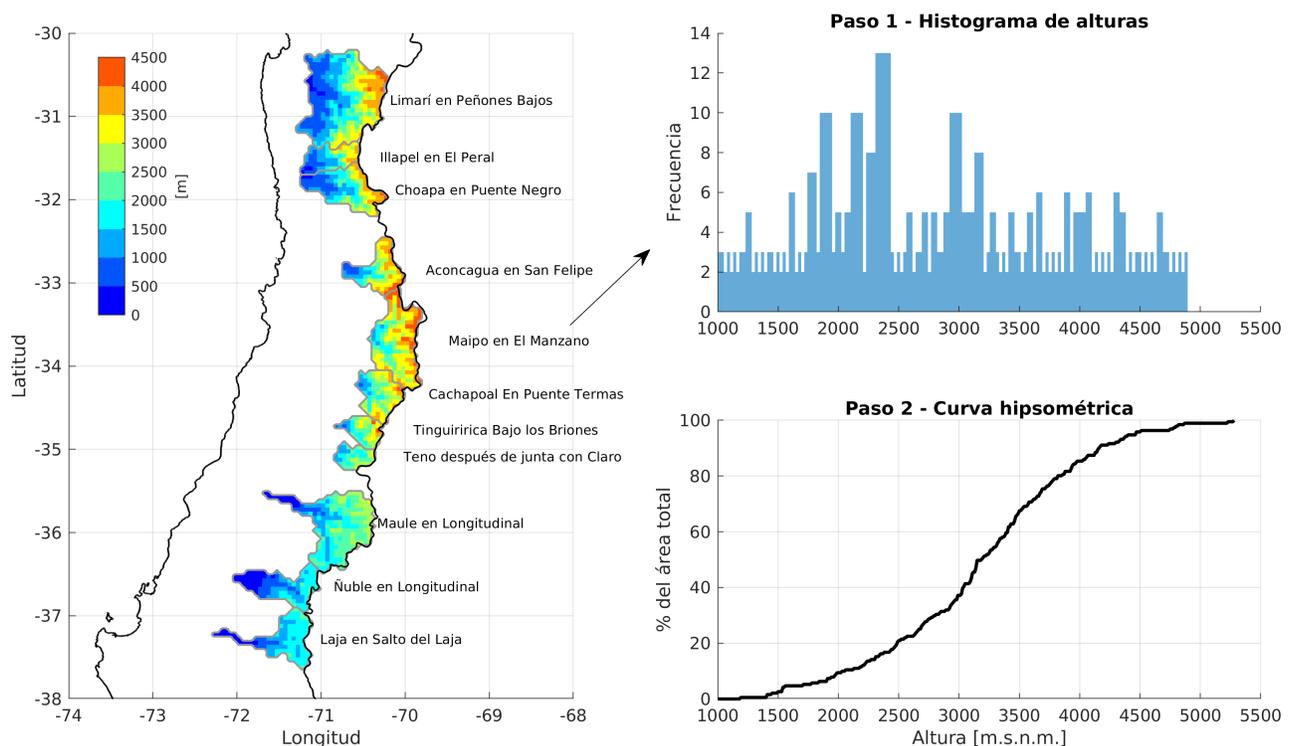


Figura 3.2: Esquema de la metodología utilizada para calcular el área sobre 1000 m.s.n.m. El método consiste en calcular el histograma de alturas por latitud y multiplicarlo por el área de una caja rectangular para obtener las curvas hipsométricas.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Incertidumbre en el cálculo de H_0

4.1.1. Incertidumbre en el promedio diario de H_0

Dado que H_0 puede variar entre y durante una tormenta el hecho de considerar promedios diarios de esta variable puede inducir cierto grado de error. Para evaluar esto la Figura (4.1) muestra las distribuciones de H_0 en Santo Domingo para días y eventos con precipitación considerando los promedios diarios de esta variable y los valores "instantáneos" a las 1200UTC y 0000UTC, considerando como eventos de precipitación aquellos con una precipitación acumulada mayor o igual a 0.625 mm en un periodo de 3 horas (centrado a las 1200UTC y 0000UTC). El promedio de la distribución instantánea para los días con precipitación tiene un valor en torno a 2100 m. Se observó en general una ligera sobreestimación de los valores de H_0 al considerar los valores diarios. Para el promedio de la distribución esta sobreestimación es de 10.4% con respecto a la distribución "instantánea", lo cual implica una diferencia en torno a 200 m. En relación a lo anterior se observó entonces un desplazamiento de la cola inferior y superior de la distribución hacia valores más altos que aparece como un artefacto de utilizar el promedio diario, ya que instantáneamente H_0 difícilmente supera los 3500 m. El mismo análisis pero para días y eventos sin precipitación se realizó observado la Figura (4.2). El valor promedio de la distribución instantánea corresponde a 3200 m aproximadamente. En este caso se consideraron días y eventos sin precipitación aquellos con una precipitación menor a 5 mm/día y 0.625 mm/3h respectivamente. Considerando días sin precipitación el

error en el promedio es mínimo y corresponde al 0.8%. También se observa una leve sobreestimación en los percentiles inferiores y casi sin error en los percentiles 75 y 95. El detalle del error para cada percentil puede ser observado en la Tabla (4.1) para días con y sin lluvia, sin embargo se advierte que este no supera el 15% en ningún caso.

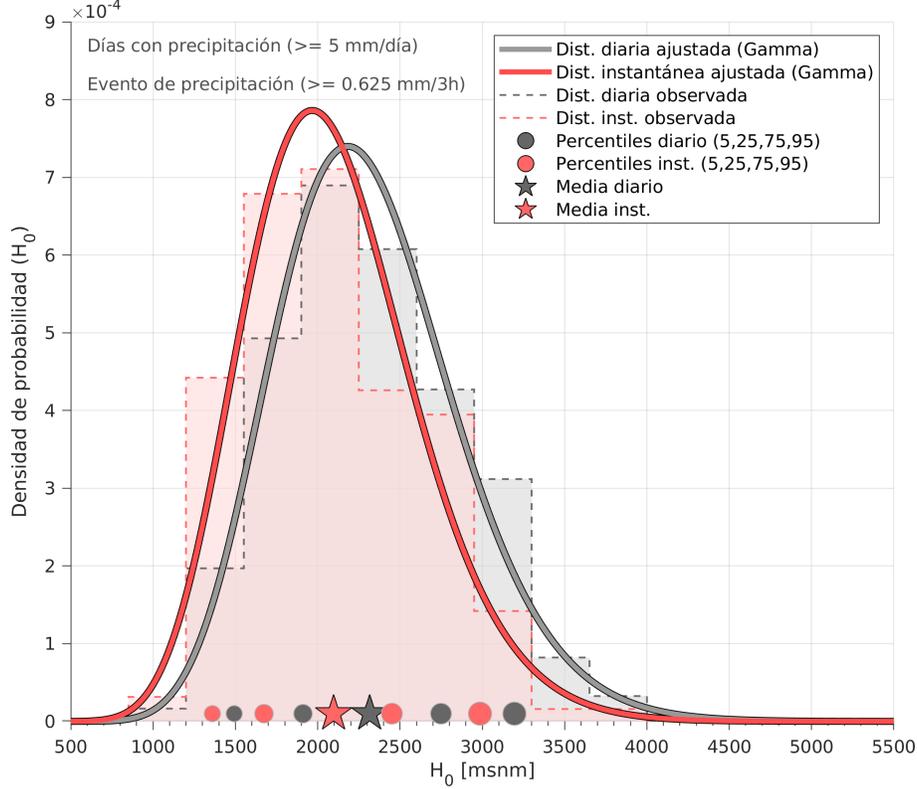


Figura 4.1: Distribución de probabilidad de H_0 observado en Santo Domingo para días y eventos con precipitación. En rojo se presenta la distribución con los valores instantáneos de H_0 a las 1200UTC y 0000UTC. En gris se presenta la distribución con los promedios diarios de H_0 . Las estrellas representan el promedio de las distribuciones y los círculos los percentiles 5,25,75 y 95.

La sobreestimación al promediar diariamente H_0 cuando precipita puede llevar a conclusiones erradas respecto al impacto hidrológico real en las cuencas o para analizar diferencias entre casos con y sin lluvia. En relación a lo anterior no sería factible analizar diferencias entre días con y sin precipitación que estén aproximadamente entre el rango de ± 200 m utilizando promedios diarios. Por otro lado, también se están subestimando/sobreestimando la magnitud (y frecuencia) de los eventos extremos bajos/altos reales de H_0 , sin embargo dado que el desplazamiento es casi uniforme en la distribución se puede corregir directamente este efecto considerando un sesgo de aprox. 200 m. Se sugiere que el desplazamiento de la distribución como consecuencia de promediar

diariamente se debe a que, al menos en esta ubicación, los eventos de precipitación no suelen durar un día completo, por lo cual al hacer el promedio diario estamos incluyendo en el promedio horas donde no precipitó en las que H_0 suele ser mayor (en torno a 1000 m de diferencia). Esto último será analizando con más detalle en las siguientes secciones.

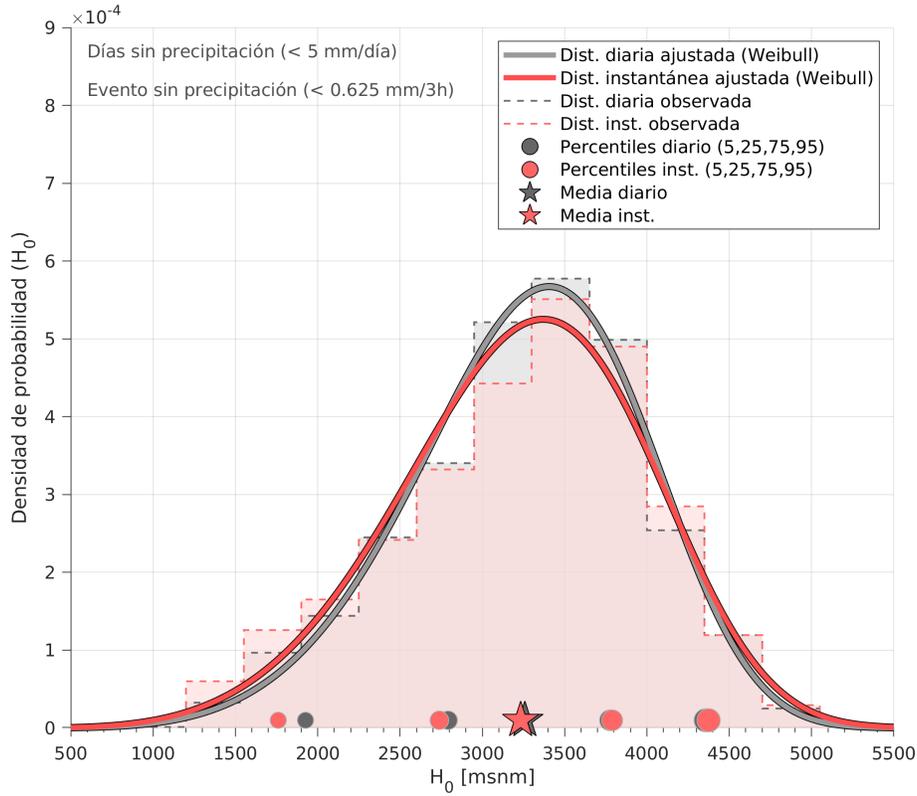


Figura 4.2: Distribución de probabilidad de H_0 observado en Santo Domingo para días y eventos sin precipitación. En rojo se presenta la distribución con los valores instantáneos de H_0 a las 12UTC y 00UTC. En gris se presenta la distribución con los promedios diarios de H_0 . Las estrellas representan el promedio de las distribuciones y los círculos los percentiles 5,25,75 y 95.

Tabla 4.1: Error porcentual asociado a cada percentil al considerar el promedio diario de H_0 en vez de los valores instantáneos, para días con y sin precipitación. Valor con respecto a los valores instantáneos.

	Error [%]			
	Percentil 5	Percentil 25	Percentil 75	Percentil 95
Días con lluvia	9.8	14.2	12.2	7.0
Días sin lluvia	9.3	2.0	-0.4	-0.4

4.1.2. Validación CFSR en Chile central

La Figura (4.3) muestra la comparación entre la precipitación diaria entregada por CFSR en el punto más cercano a Santo Domingo con la observada en el mismo lugar, en el periodo común entre ambas bases de datos (1999-2010). En términos generales se observó un $r^2=0.66$, lo cual indica una muy buena correlación entre ambas series de precipitación. Dado que se utilizó un umbral de 5 mm/día para hacer la separación entre días con y sin precipitación, se evaluó también cuanto se equivoca CFSR considerando estos umbrales. De un total de 185 días con precipitación observados realmente en Santo Domingo, el reanálisis indicó que 30 de estos eran días sin precipitación, es decir que CFSR da una falsa alarma cercana al 16% del total de los casos en el caso de los días con precipitación. Para los días sin precipitación de un total de 1644 días, el reanálisis da una falsa alarma en 80 casos, representando cerca del 5% total de casos.

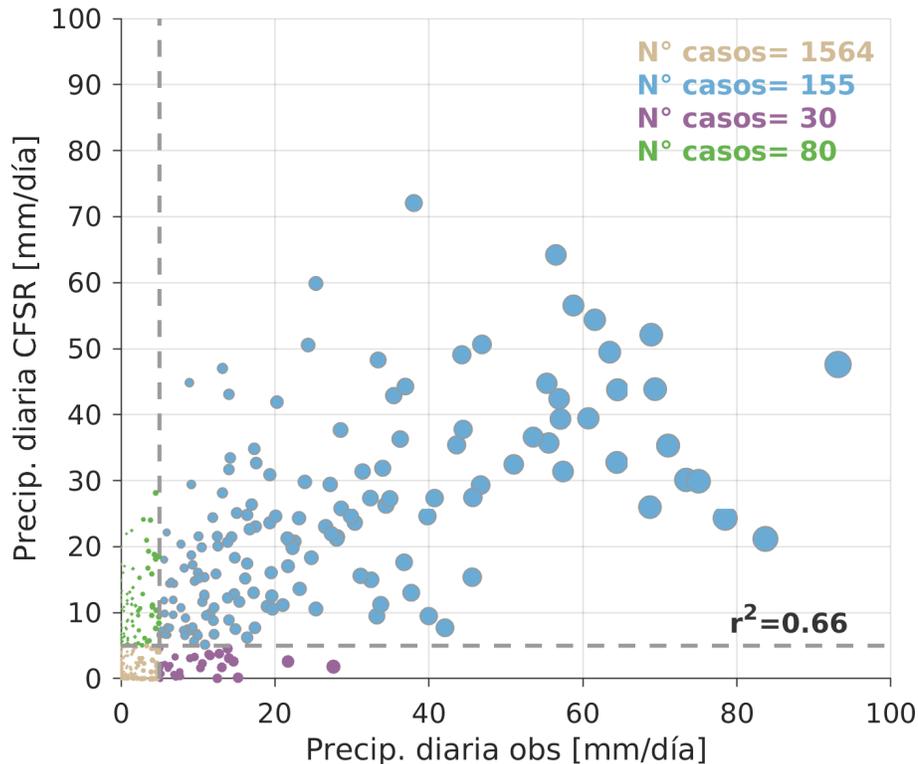


Figura 4.3: Comparación entre la precipitación diaria observada y la obtenida con CFSR en Santo Domingo. Los distintos colores indican los valores sobre o bajo el umbral de 5 mm/día.

Para analizar el desempeño de CFSR en representar H_0 se muestra la comparación

entre el promedio diario de H_0 entregado por CFSR, en el punto más cercano a Santo Domingo, con el observado en el mismo lugar en la Figura (4.4). Para los círculos se consideró los días con y sin precipitación según el reanálisis. En el caso de los percentiles y promedio de la distribución se calcularon los valores según la cantidad de casos obtenidos de forma independiente en cada serie de datos (e.g 185 días con pp observados y 235 en el reanálisis).

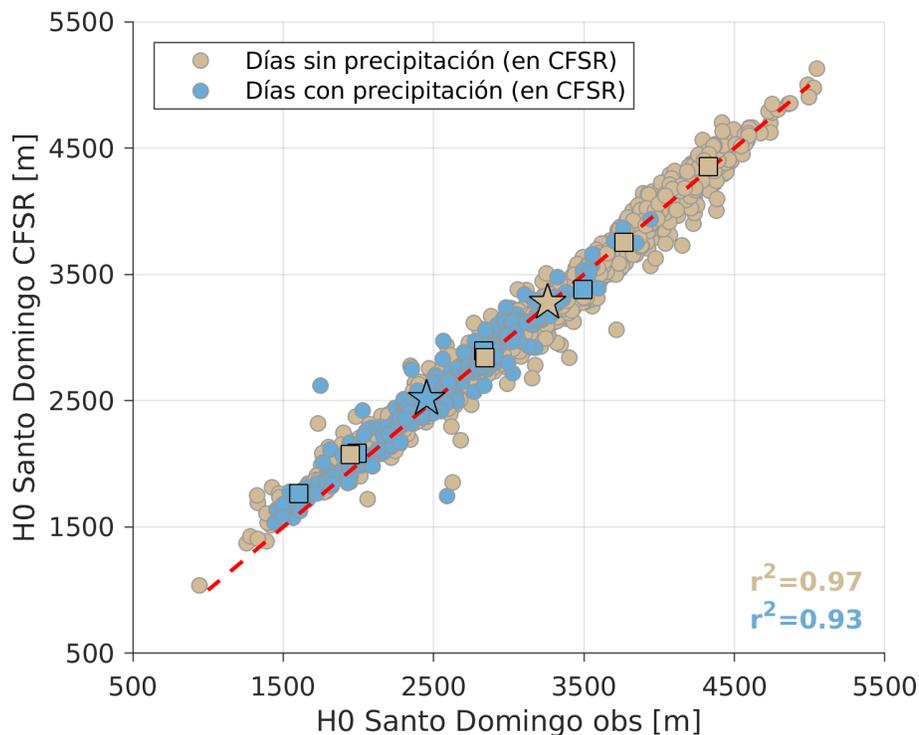


Figura 4.4: Comparación entre el promedio diario de H_0 observado y el obtenido con CFSR en Santo Domingo (punto más cercano). Los círculos azules/café indican los días con/sin precipitación en el reanálisis. Las estrellas y los cuadrados representan el promedio y los percentiles 5,25,75 y 95 de cada distribución. La línea roja representa la curva 1:1.

En primer lugar se obtuvo un $r^2 = 0.97$ y $r^2 = 0.93$ para los días sin y con precipitación respectivamente, lo cual justifica totalmente el uso de este reanálisis. Es necesario mencionar que el reanálisis no es independiente de la estación de radiosondeo, por lo tanto esta correlación se degrada ligeramente hacia el norte y hacia el sur de la estación. Sin embargo, dentro del dominio de interés esta correlación es mayor a 0,8 (Figura 6.3, Anexos). Es clara la diferencia entre ambos tipos de días, con valores mucho más altos para los días sin precipitación, donde cerca del 75 % de los datos supera el percentil 75 de H_0 de los días con precipitación. El reanálisis sobreestima ligeramente el promedio para los días con precipitación, haciéndolo en torno a un 3 %, al igual que los percentiles

de la distribución (excepto percentil 95) ,donde el máximo error fue de un 10 % para el percentil 5. Algo similar ocurre en el caso de los días sin precipitación, sin embargo el error es mucho menor y no supera el 1 % (excepto percentil 5). El detalle del error para cada percentil en ambas distribuciones se puede observar en la Tabla (4.2). De todo este análisis se concluye que si se puede establecer la línea base actual de H_0 para Chile central utilizando el CFSR.

Tabla 4.2: Error porcentual asociado a cada percentil al comparar la distribución de H_0 para días con y sin precipitación entre CFSR y la observación en Santo Domingo. Valor con respecto al observado en Santo Domingo.

	Error [%]			
	Percentil 5	Percentil 25	Percentil 75	Percentil 95
Días con lluvia	10.2	4.6	2.2	-3.2
Días sin lluvia	6.6	0.0	-0.4	0.6

4.2. Análisis global de $\overline{H_0}$ (NCEP-CFSR)

La distribución global de $\overline{H_0}$ calculada en cada punto de grilla en forma independiente, para días sin y con precipitación durante invierno se puede observar en las Figuras (4.5) y (4.6) respectivamente. Aquellas zonas donde $\overline{H_0}$ es menor o igual a la altura de la topografía fueron excluidas del análisis y se encuentran sombreadas en gris claro. Tampoco se consideraron las zonas demasiado áridas, donde no precipitó al menos una vez durante 5 inviernos en el periodo completo (gris oscuro). Para los días sin precipitación observamos, en general, un patrón bastante zonal con alturas en torno a los 5000 m en los trópicos y cercanas al nivel del mar a medida que nos acercamos hacia los polos. Debido a esta distribución la zona de mayor gradiente meridional se da en latitudes medias, con un una variación del orden de 100 m cada 1° de latitud. Para días con precipitación este patrón varía particularmente en las zonas de borde oriental de los océanos, donde se observa una inclinación de las isolíneas de $\overline{H_0}$ por lo que se tienen valores más bajos con respecto a los días sin precipitación. En torno a 50° se observa también un desplazamiento hacia el sur de estas isolíneas, por lo que en esta banda de latitud se tienen valores ligeramente mayores en algunos puntos.

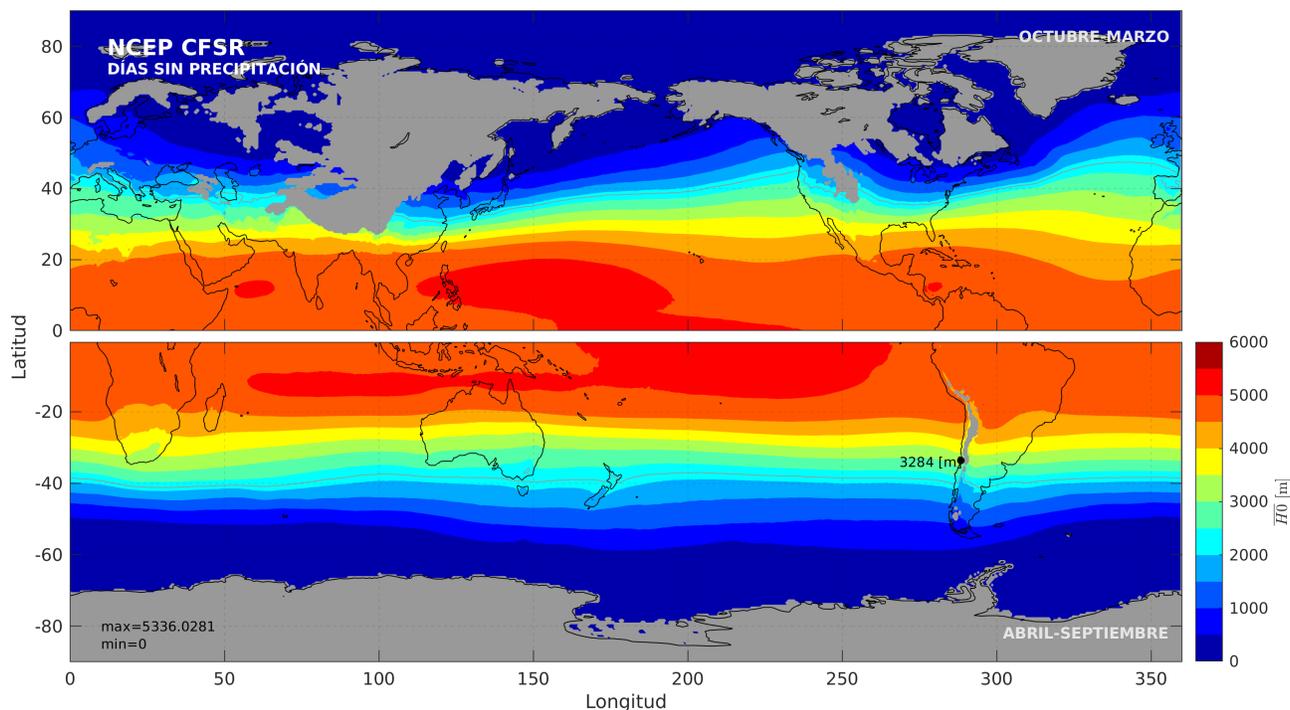


Figura 4.5: Distribución global de $\overline{H_0}$ (m.s.n.m.) para días sin precipitación en invierno (Octubre-Marzo en el hemisferio norte y Abril-Septiembre en el hemisferio sur). Las zonas en gris claro representan aquellas donde $\overline{H_0}$ intersecta con la topografía.

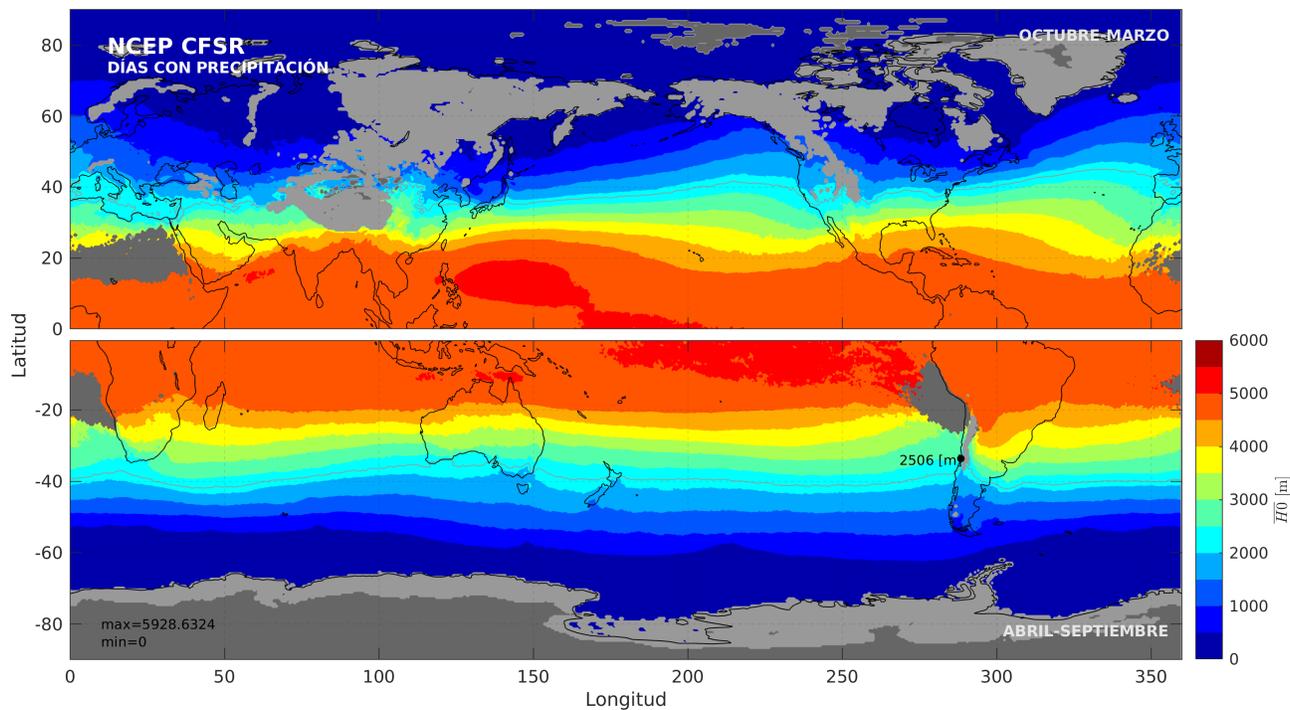


Figura 4.6: Distribución global de $\overline{H_0}$ (m.s.n.m.) para días con precipitación en invierno (Octubre-Marzo en el hemisferio norte y Abril-Septiembre en el hemisferio sur). Las zonas en gris claro representan aquellas donde $\overline{H_0}$ intersecta con la topografía. Las zonas en gris oscuro indican las zonas muy áridas (< 1 vez al año cada 5 años).

Las diferencias entre el patrón para días con y sin precipitación se pueden observar directamente en la Figura (4.7). Este mapa muestra una diferencia cercana a los 1000 m en las zonas de borde oriental mencionadas anteriormente. Esto implica que en estas zonas H_0 se encuentra, en promedio, más baja durante días con precipitación. Sin embargo en latitudes más altas la diferencia es positiva, por lo cual en estas zonas $\overline{H_0}$ estaría un poco más alta durante los días con precipitación. Cabe destacar el hecho que este patrón de diferencias también se observó considerando meses individuales, por lo que se descarta que este sea un artefacto de la estacionalidad (ver Figuras 6.1, 6.2 y 6.4 en el Anexo).

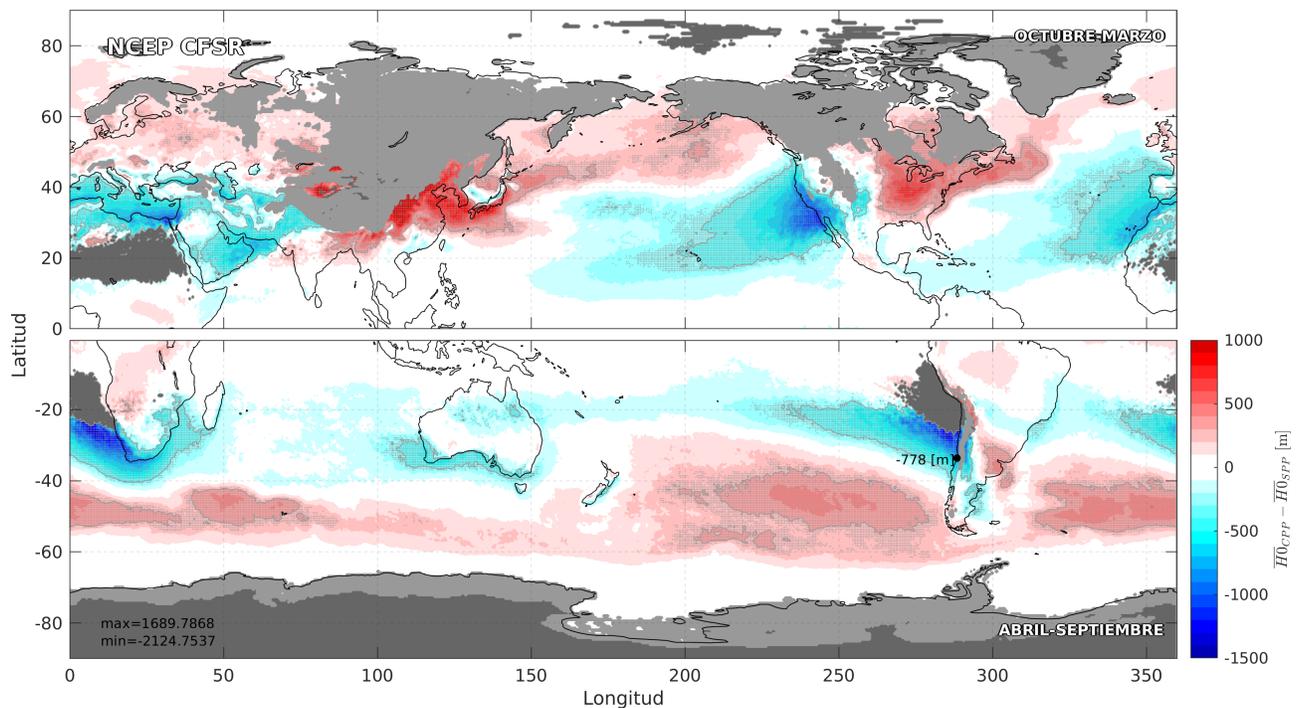


Figura 4.7: Diferencia del $\overline{H_0}$ entre días con y sin precipitación (CPP-SPP) durante invierno (Octubre-Marzo en el hemisferio norte y Abril-Septiembre en el hemisferio sur) con CFSR. Las zonas en gris claro representan aquellas donde $\overline{H_0}$ interseca con la topografía. Las zonas en gris oscuro indican las zonas muy áridas (< 1 vez al año cada 5 años).

Estos patrones podrían explicarse según el tipo de frentes asociados a la precipitación de cada zona, al menos para el caso de Chile central donde la diferencia es negativa, se podría asociar a que la mayor parte de los días con precipitación se deben al paso de frentes fríos lo cual sería consistente con un $\overline{H_0}$ más bajo. Siendo un poco más rigurosos

para observar este efecto en la práctica la precipitación debería ser en gran parte post-frontal, ya que es después del paso del frente frío cuando disminuye la temperatura, sin embargo hay que ser conscientes que al considerar valores diarios de H_0 y precipitación esto se vuelve parte de la incertidumbre, por lo tanto corresponde confirmar caso por caso junto a otras fuentes de datos con mayor resolución temporal. El punto anterior será abordado como parte de la discusión. En torno a Santiago la altura promedio de H_0 para días con y sin precipitación según el reanálisis, corresponde a ≈ 2400 m y ≈ 3200 m, lo cual da una diferencia aproximada de 800 m.

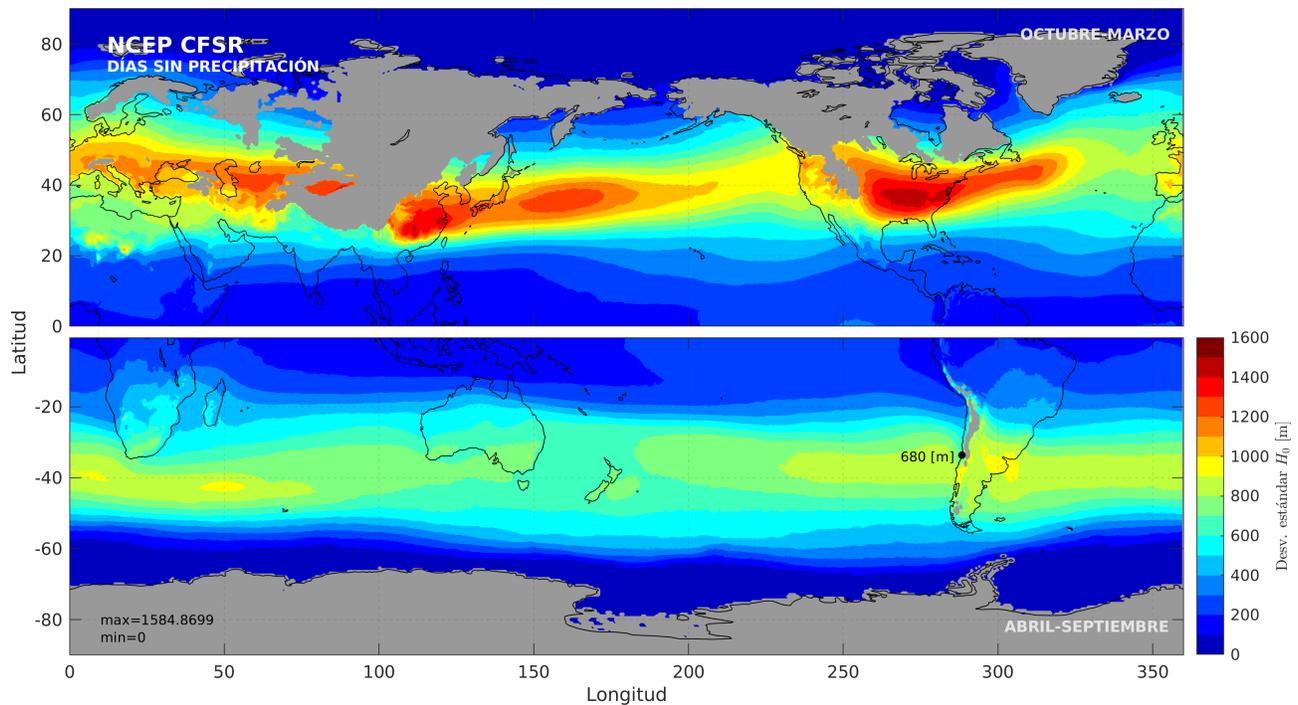


Figura 4.8: Desviación estándar de H_0 (m.s.n.m) para días sin precipitación en invierno (Octubre-Marzo en el hemisferio norte y Abril-Septiembre en el hemisferio sur). Las zonas en gris claro representan aquellas donde $\overline{H_0}$ interseca con la topografía.

Las Figuras (4.8) y (4.9) presentan la desviación estándar de H_0 para los días sin y con precipitación respectivamente. En términos generales se observa un patrón similar donde la mayor variación con respecto al promedio, en ambos casos, se da en latitudes medias siendo notoriamente mayor para el hemisferio norte donde se alcanzan valores cercanos a 1500 m. Para el hemisferio sur estos valores no superan los 1000 m. Tanto

en los trópicos como cerca de los polos este valor no supera los 300 m. Comparando entre días con y sin lluvia se notó en casi todo el globo que la desviación es mas grande cuando no hay precipitación, especialmente en el caso del hemisferio sur. En torno a Santiago, la desviación estándar para días con y sin precipitación corresponde a ≈ 500 y ≈ 700 m respectivamente. Las posibles causas del patrón espacial observado en estas figuras no fueron analizadas con mayor detalle, sin embargo la mayor desviación de H_0 se da coincidentemente en latitudes medias donde las fluctuaciones de temperatura son mayores. El por qué de la menor desviación estándar durante los días con precipitación se puede asociar a que, en general, durante los días con precipitación la atmósfera tiende a seguir el gradiente adiabático húmedo o valores en torno a este, mientras que durante los días sin lluvia suelen haber más factores que determinan la forma del perfil de temperatura (inversiones, nubosidad, advecciones de aire, etc) lo cual podría explicar una mayor dispersión.

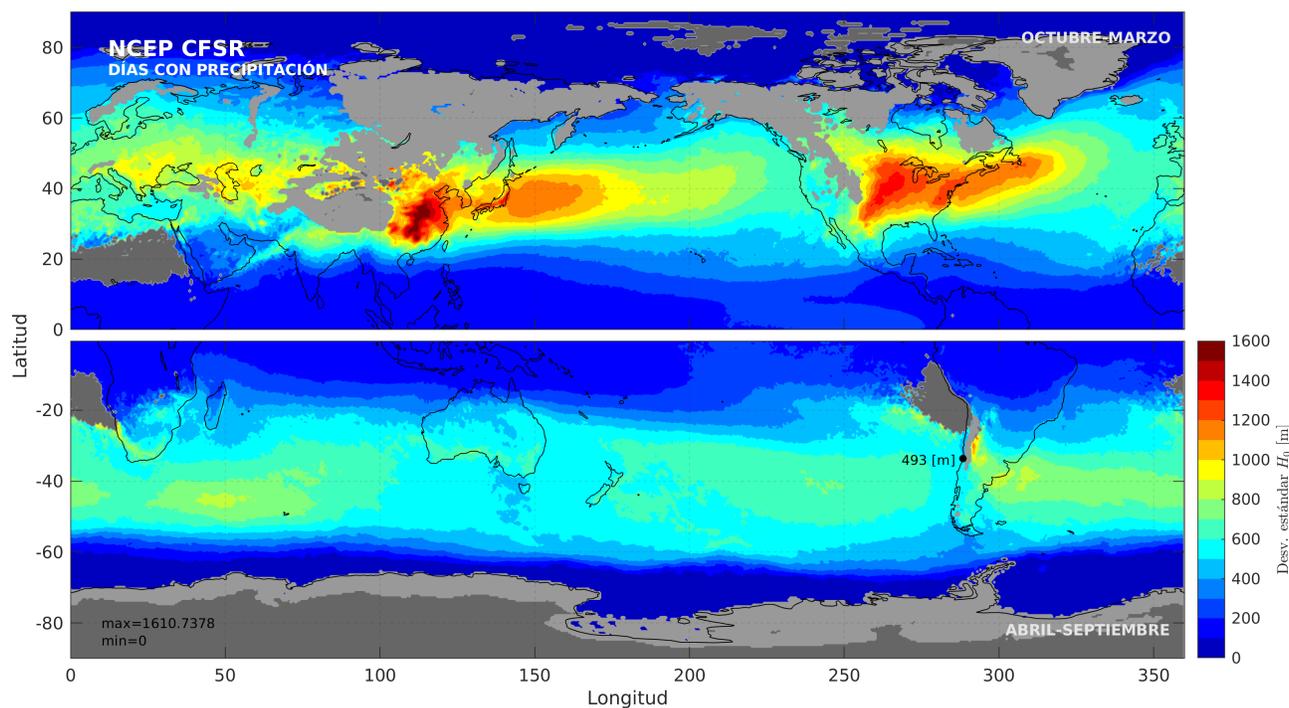


Figura 4.9: Desviación estándar de H_0 (m.s.n.m) para días con precipitación en invierno (Octubre-Marzo en el hemisferio norte y Abril-Septiembre en el hemisferio sur). Las zonas en gris claro representan aquellas donde $\overline{H_0}$ intersecta con la topografía. Las zonas en gris oscuro indican las zonas muy áridas (< 1 vez al año cada 5 años).

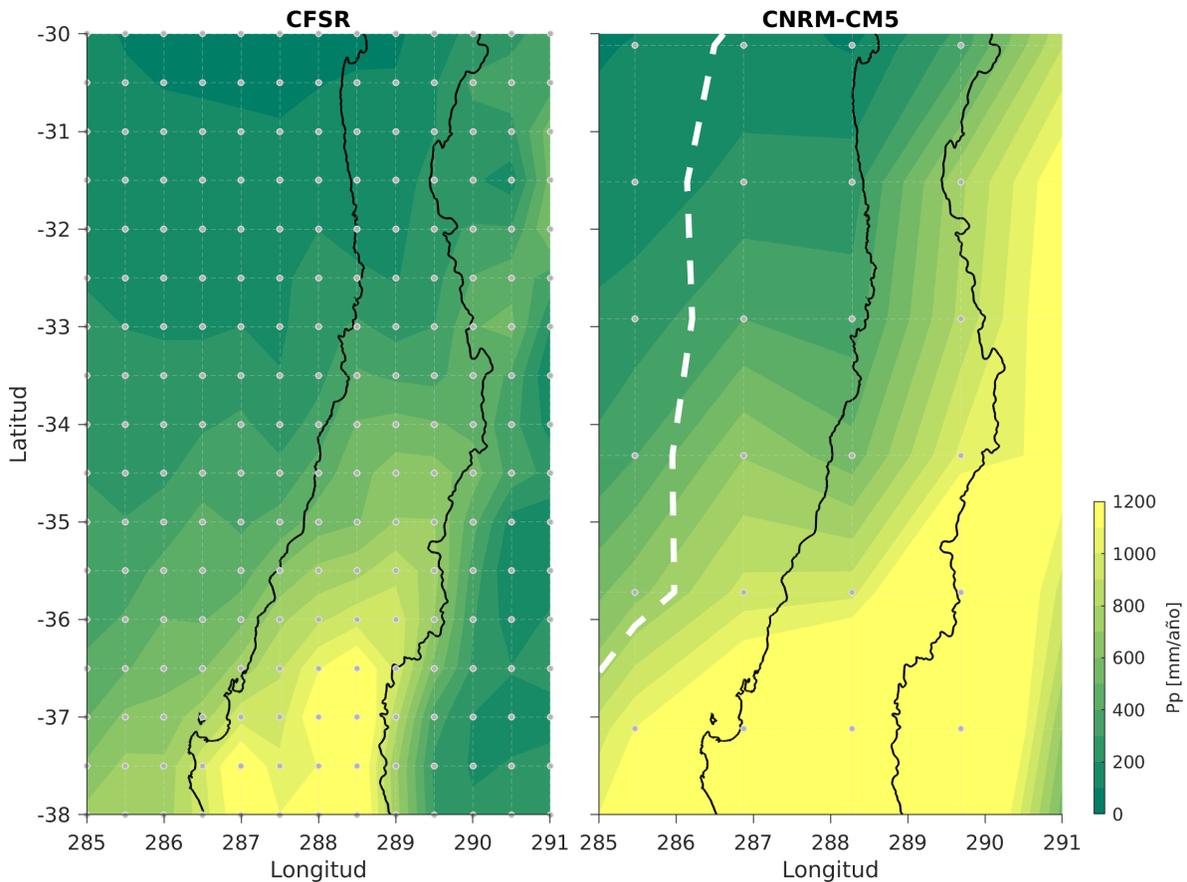


Figura 4.10: Promedio anual de precipitación acumulada (mm/año) obtenida con (izquierda) CFSR y (derecha) el modelo CNRM-CM5 en el periodo 1979-2005. La línea blanca representa la línea de costa del modelo.

4.3. Evaluación modelos CMIP5 (histórico)

4.3.1. Precipitación en los modelos

Previo al análisis de H_0 se realizó la evaluación de la precipitación en los modelos (histórico) con respecto a la climatología del CFSR. Esto se puede observar en las Figuras (4.10) y (4.11) a modo de ejemplo para un modelo en particular (CNRM-CM5) en términos del valor acumulado anual (mm/año) y el número de días con precipitación (días por año). En general el patrón espacial de la precipitación en este modelo difiere bastante en magnitud (Figura 4.10) de lo observado con CFSR, sobretodo si consideramos la precipitación siguiendo la línea de costa real. Sin embargo, si consideramos la línea de costa del modelo, esta se encuentra más de un grado alejada de la real, por lo

cual técnicamente Chile central se encuentra desplazado debido a lo grueso de la resolución. Si consideramos la precipitación teniendo en cuenta este desplazamiento notamos que los valores se vuelven un poco más realistas. Lo mismo se observa en términos del número de días con precipitación por año, por lo que en base a estos resultados se consideró utilizar solo aquellos puntos más cercanos a la costa desplazada (línea blanca segmentada) para evaluar H_0 en los modelos. Este inconveniente de la línea de costa desplazada ocurre en mayor o menor medida en todos los modelos utilizados (no mostrado) y tiene estrecha relación con la resolución de cada uno, es decir mientras más gruesa la resolución más desplazada se encuentra la costa.

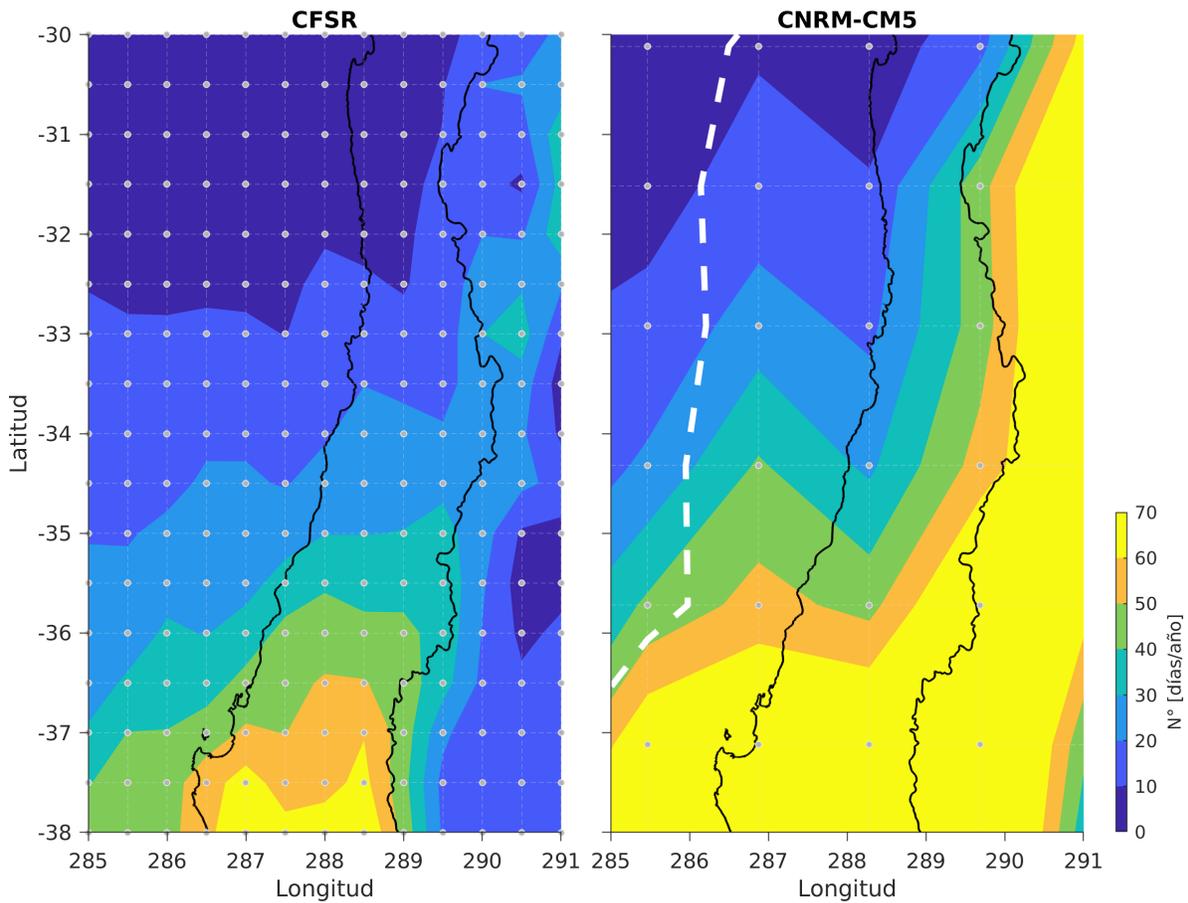


Figura 4.11: Promedio anual de número de días con precipitación (días por año) obtenida con (izquierda) CFSR y (derecha) el modelo CNRM-CM5 en el periodo 1979-2005. La línea blanca representa la línea de costa del modelo.

4.3.2. Evaluación de H_0 por latitud

La Figura (4.12) muestra de izquierda a derecha un acercamiento en Chile central de las Figuras (4.5), (4.6) y (4.7) respectivamente. En primer lugar notamos que también hay un ligero desplazamiento de la costa, en torno a medio grado de longitud, producto de la resolución de CFSR. Observando el panel (a) con el $\overline{H_0}$ para los días sin precipitación se tiene una variación latitudinal muy marcada en torno a 200 m por un poco más de un grado de latitud. Esta variación es mucho menor para los días con precipitación (panel b), donde no varía más de 600 m en todo el dominio comprendido entre -38 y -30 °S. Con respecto a la variación longitudinal el análisis se torna un poco más complicado, ya que la resolución gruesa del modelo no permite una representación demasiado realista de la cordillera, por lo que los valores sobre 1000 m de altura presentan una estructura muy ruidosa, además de incluir zonas donde el $\overline{H_0}$ se intersecta con la topografía las cuales no son consideradas en el análisis. A pesar de lo anterior es posible reconocer una disminución de $\overline{H_0}$ hacia la cordillera, la cual es mucho más marcada en el caso de los días con precipitación y se observa que puede ser de entre 200 a 400 m. Esta disminución de H_0 hacia la cordillera será abordada en la discusión.

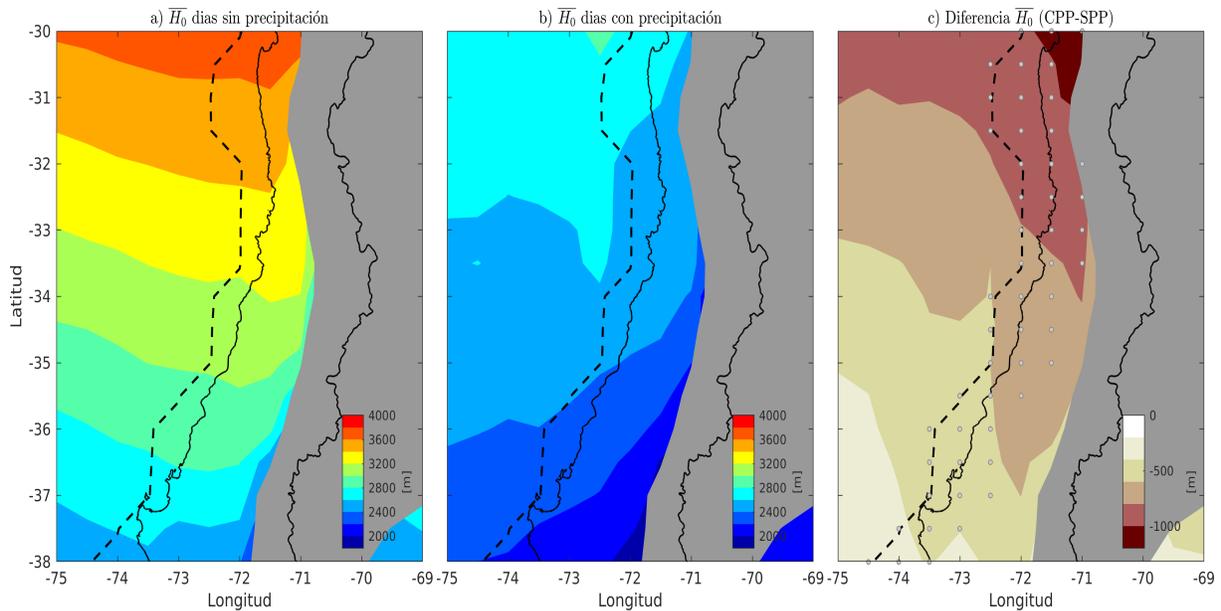


Figura 4.12: H_0 promedio en Chile central durante a) días sin precipitación y b) días con precipitación. El panel (c) muestra la diferencia entre los días con y sin lluvia. Los puntos grises representan los puntos de grillas con los cuales se obtiene el H_0 a lo largo de Chile central. El área gris indica las zonas donde la topografía de CFSR es mayor a 1000 m.s.n.m.

La diferencia entre los días con y sin precipitación se observa en el panel (c), donde notamos claramente una mayor diferencia, cercana a 1000 m, a medida que nos acercamos hacia el norte la cual disminuye a ≈ 500 m en torno a 38° S. La diferencia parece ser menor a medida que nos acercamos hacia la cordillera. En base a todo este análisis en el mismo panel (c) se observa un conjunto de tres puntos por latitud con los cuales se calculó un promedio. Con este promedio de tres puntos, representativo de los primeros ~ 100 km de costa aproximadamente, se comparó posteriormente el H_0 obtenido con los modelos.

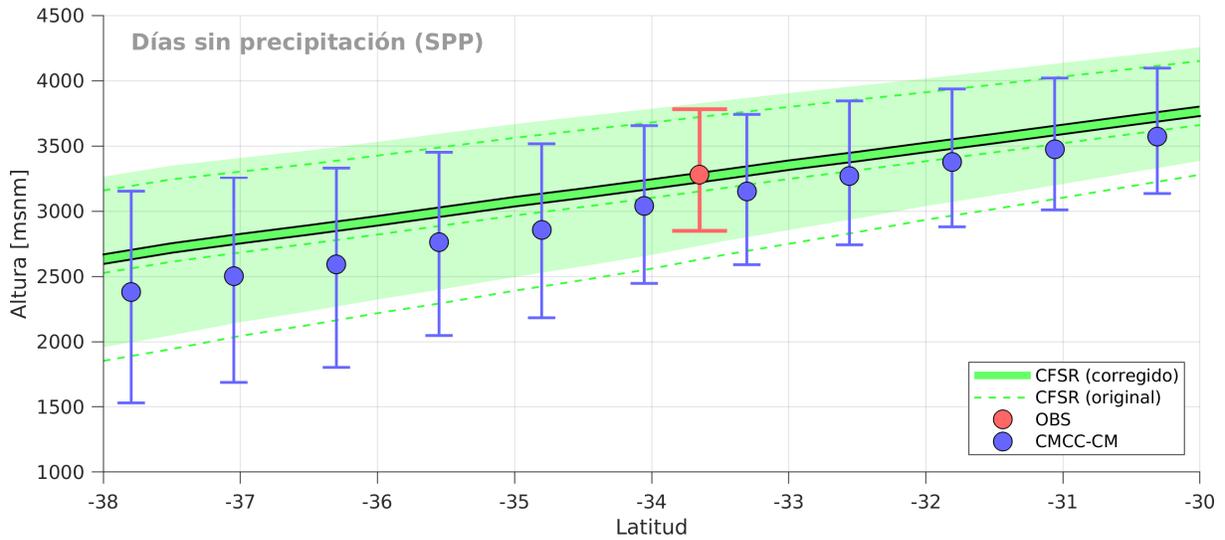


Figura 4.13: Distribución actual de H_0 a lo largo de Chile central para días sin precipitación, obtenida de las observaciones en Santo Domingo (rojo), CFSR (verde) y el modelo CMCC-CM (azul). El círculo representa el promedio. Las barras y el área sombreada representan los percentiles 25 y 75.

La variación de la distribución de H_0 a lo largo de Chile central (primeros 100km aprox.) se puede observar en la Figura (4.13) y (4.14) para días sin y con precipitación respectivamente. Se presenta solo la figura para el modelo CMCC-CM en el periodo histórico. Debido a que CFSR presentaba cierto sesgo con respecto a la observación en Santo Domingo, se corrigió este sesgo para ajustar la distribución de CFSR al valor observado en la actualidad, conservando la misma variación latitudinal. Para el caso de los días sin precipitación observamos como este modelo claramente subestima esta altura, sin embargo logra reproducir la tendencia de aumento a medida que observamos hacia el norte. Para los días con precipitación el modelo logra reproducir de muy buena forma la variación latitudinal de H_0 , acercándose mucho a lo obtenido con CFSR. El

desempeño de todos los modelos tanto para representar la precipitación como H_0 se analizó en la siguiente sección.

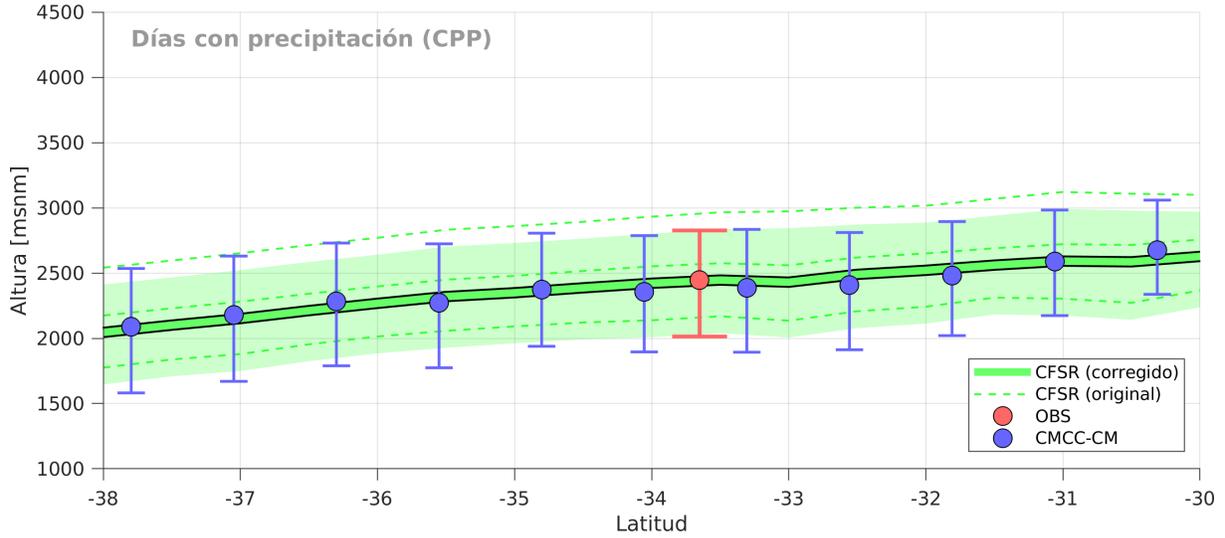


Figura 4.14: Distribución actual de H_0 a lo largo de Chile central para días con precipitación, obtenida de las observaciones en Santo Domingo (rojo), CFSR (verde) y el modelo CMCC-CM (azul). El círculo representa el promedio. Las barras y el área sombreada representan los percentiles 25 y 75.

En la escala global haciendo un símil de la Figura (4.15) de la diferencia de $\overline{H_0}$ entre días con y sin precipitación para el modelo CMCC-CM se observa a grandes rasgos los mismos patrones de diferencia negativa en las zonas de borde oriental, sin embargo la magnitud de esa diferencia es ligeramente mayor. Particularmente para el caso de Chile central este modelo logra reproducir de buena forma esta diferencia indicando un valor en torno a los ~ 850 m. Esta diferencia es un poco menor que la observada (~ 1000 m) ya que en este caso el modelo está subestimando $\overline{H_0}$ a lo largo de la costa para los días sin precipitación. Las zonas con diferencia positiva no son tan marcadas como en la figura obtenida con el reanálisis, especialmente para el hemisferio Sur.

4.3.3. Errores por modelo

Las Figuras (4.16) y (4.17) presentan los diagramas de dispersión del error en los modelos al representar $\overline{H_0}$ para días sin y con precipitación. Para ambas figuras el error está referido a lo observado con CFSR. La Figura (4.16) muestra específicamente el

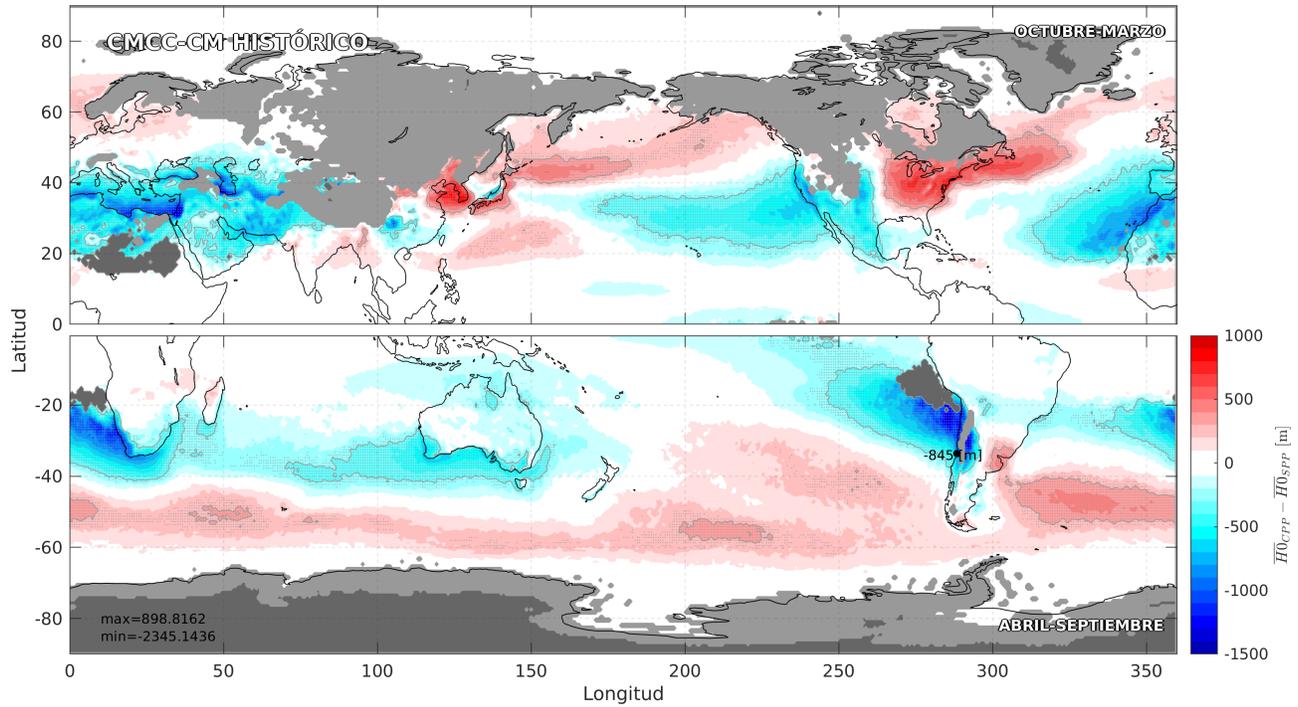


Figura 4.15: Diferencia del $\overline{H_0}$ entre días con y sin precipitación (CPP-SPP) durante invierno (Octubre-Marzo en el hemisferio norte y Abril-Septiembre en el hemisferio sur) para el modelo CMCC-CM en el periodo histórico (1976-2005). Las zonas en gris claro representan aquellas donde $\overline{H_0}$ interseca con la topografía. Las zonas en gris oscuro indican las zonas muy áridas (< 1 vez al año cada 5 años).

error en $\overline{H_0}$ para días con precipitación ($\overline{H_0}_{CPP}$) versus el error en el número de días con precipitación (N_{pp}), ambos a lo largo de Chile central. Cada círculo representa el promedio respectivo y las líneas el rango de error dentro del dominio. Al observar esta figura notamos que todos los modelos sobreestiman el número total de días con precipitación, donde el modelo que menos se equivoca en N_{pp} corresponde al modelo CNRM-CM5 que sobreestima este valor en torno a un 40 %, seguido por el modelo CMCC-CM con un 120 %. Con respecto al error en $\overline{H_0}$ notamos que los modelos tienden a subestimar este valor en promedio un 5 %, a excepción del modelo MRI-CGM3 que lo sobreestima cerca de un 10 %, el cual además sobreestima cerca de un 350 % el número de días. El peor desempeño lo tiene el modelo MPI-ESM-LR subestimando $\overline{H_0}$ cerca de un 18 %. El mejor desempeño entre los modelos lo presenta el CMCC-CM con un error de $\approx 1\%$ y $\approx 120\%$ para $\overline{H_0}_{CPP}$ y N_{pp} respectivamente.

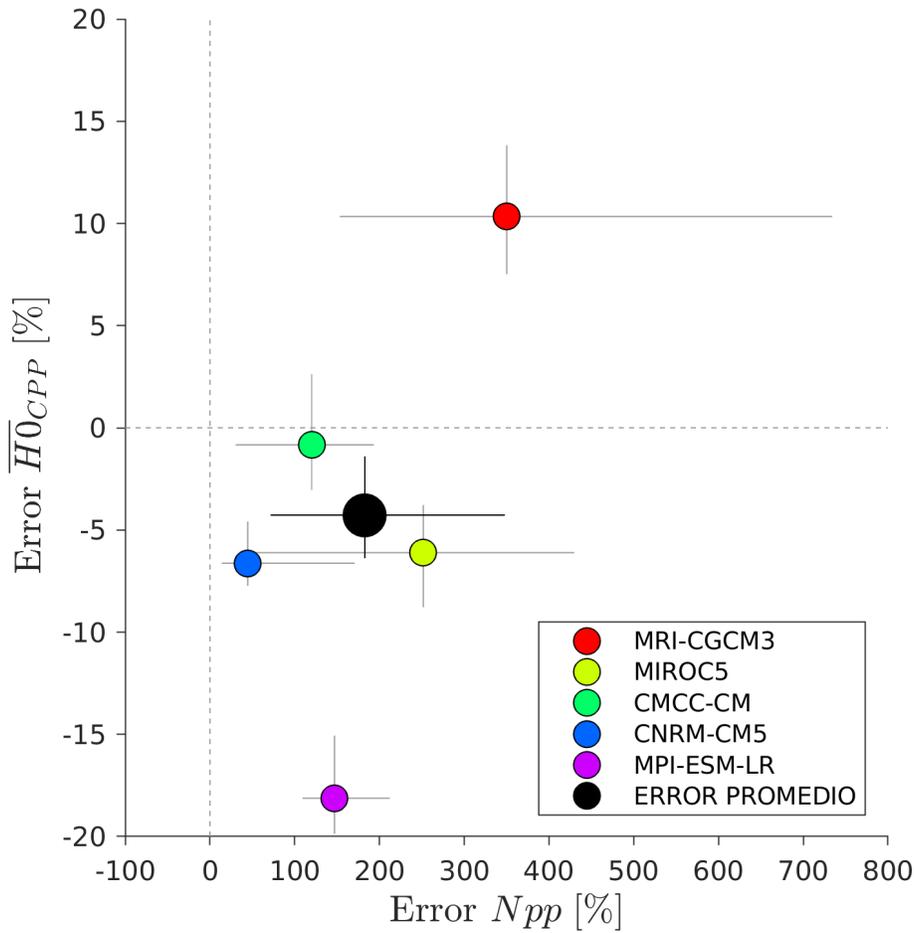


Figura 4.16: Diagrama de dispersión del error porcentual al representar $\overline{H_0}$ para días con precipitación (CPP) versus el error en el número de días con precipitación (Npp). El error es con respecto a los valores de CFSR a lo largo de Chile central. Las barras indican el intervalo de los respectivos valores en el dominio.

Si observamos ahora la comparación con respecto al $\overline{H_0}$ para días sin precipitación en la Figura (4.17) notamos que todos los modelos subestiman este valor, en promedio, cerca de un 9%. En este caso el mejor modelo en representar el $\overline{H_0}_{SPP}$ corresponde al MRI-CGCM3 con un error cercano al 3%. El peor desempeño lo tiene ahora el modelo CNRM-CM5 subestimando en torno a un 12% este valor. Este análisis de los errores fue realizado para verificar si los modelos son capaces de representar $\overline{H_0}$ de una forma más o menos realista al menos en la actualidad, de lo cuál se observó que este conjunto de modelos si es capaz de representar el promedio de la distribución tanto para días sin y con precipitación con un rango de error aceptable (menor al 10% en promedio).

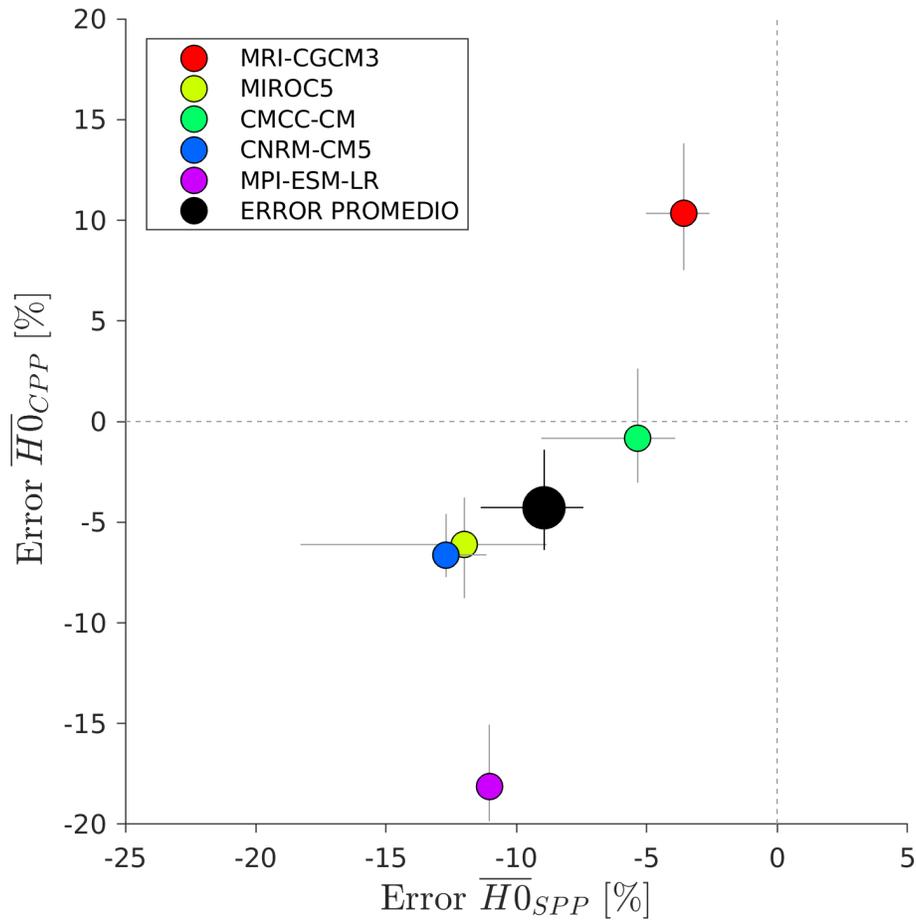


Figura 4.17: Diagrama de dispersión del error porcentual al representar $\overline{H_0}$ para días con precipitación (CPP) versus el error para los días sin precipitación (SPP). El error es con respecto a los valores de CFSR a lo largo de Chile central. Las barras indican el intervalo de los respectivos valores en el dominio.

4.4. Cambios en la distribución de H_0 a futuro

La Figuras (4.18) y (4.19) presentan la distribución por latitud para los cuatro periodos utilizados en los modelos para días sin y con precipitación respectivamente. Se presenta solo la figura para el modelo CMCC-CM a modo de ejemplo, ya que todas muestran el mismo desplazamiento de la distribución hacia valores más altos a medida que nos acercamos hacia fines de siglo. En base a lo anterior en las figuras siguientes solo se presenta el análisis para fines de siglo ya que representa el límite superior hasta el cual puede variar H_0 .

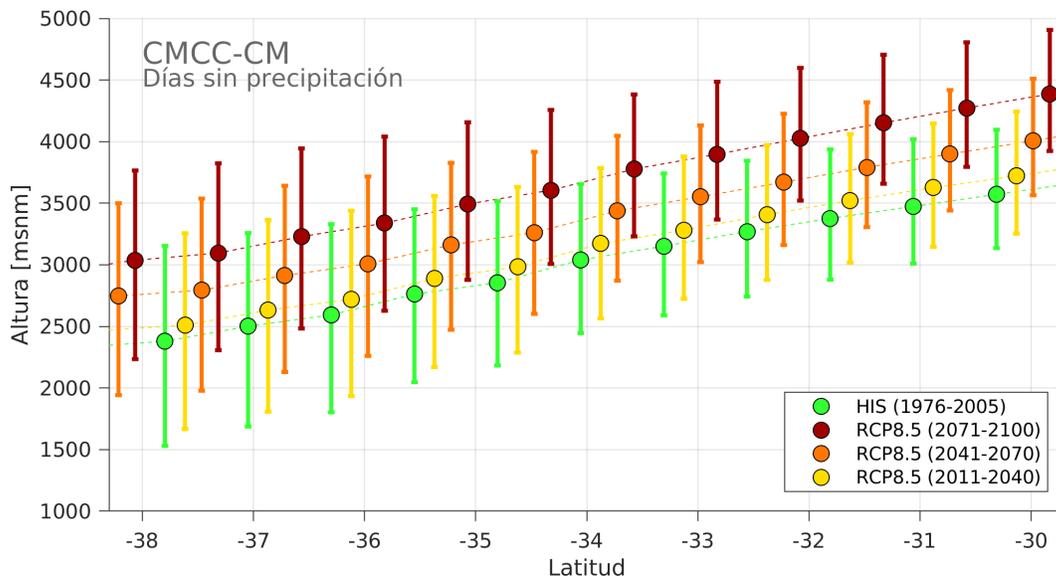


Figura 4.18: Distribución de H_0 en días sin precipitación para el periodo histórico (verde), futuro cercano (amarillo), mediados de siglo (naranja) y fines de siglo (rojo) con el modelo CMCC-CM. El círculo representa el promedio y las barras los percentiles 25 y 75.

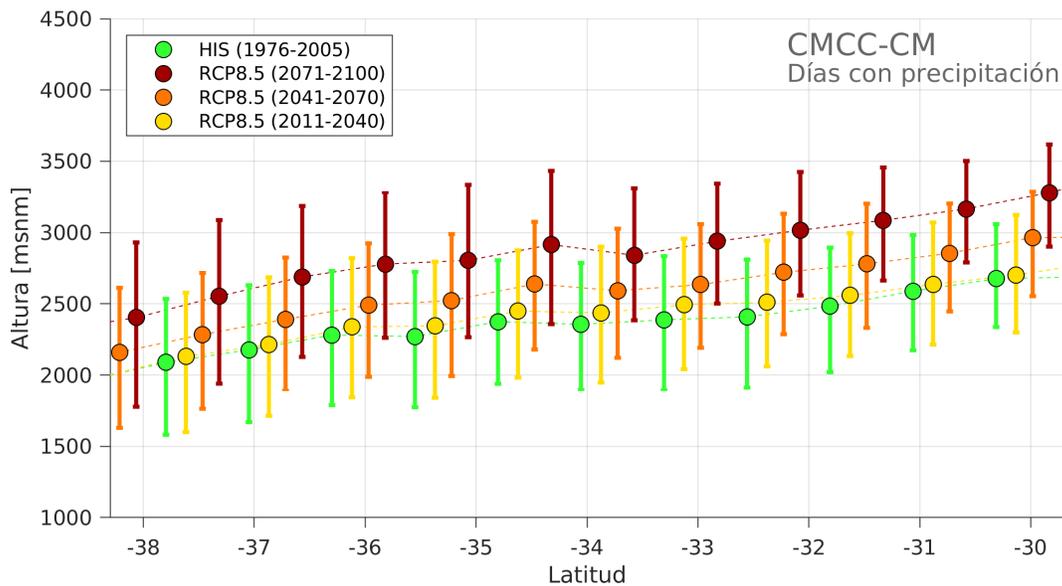


Figura 4.19: Distribución de H_0 en días con precipitación para el periodo histórico (verde), futuro cercano (amarillo), mediados de siglo (naranja) y fines de siglo (rojo) con el modelo CMCC-CM. El círculo representa el promedio y las barras los percentiles 25 y 75.

Los parámetros calculados para representar los cambios en la distribución de H_0 en el futuro son ejemplificados en la Figura (4.20) utilizando la distribución para días con precipitación a fines de siglo, en el punto más cercano a Santo Domingo con el

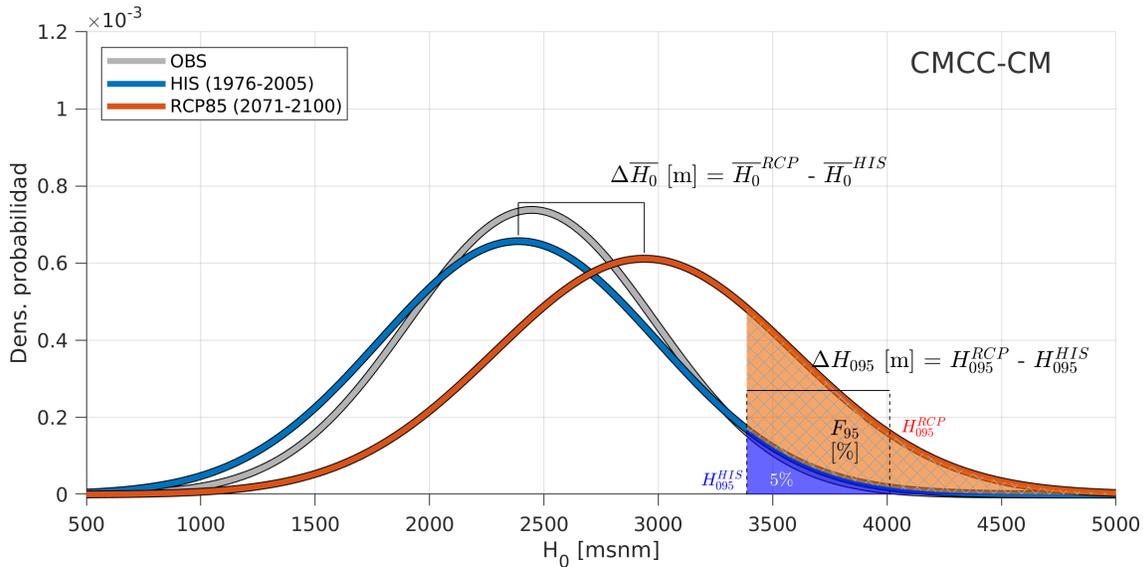


Figura 4.20: Esquema de la distribución de H_0 para días con precipitación (gris) observada en Santo Domingo, (azul) periodo histórico y (rojo) fines de siglo con el modelo CMCC-CM. Se representan además las métricas utilizadas las cuales fueron explicadas en la metodología.

modelo CMCC-CM. Estos parámetros son los mismos mencionados en la metodología y corresponden al cambio en el promedio de la distribución ($\Delta \bar{H}_0$), cambio en el percentil 95 (ΔH_{095}) y frecuencia de eventos extremos (F_{95}).

4.4.1. Cambio en el promedio ($\Delta \bar{H}_0$)

El cambio en el promedio de la distribución de H_0 a futuro (fines de siglo) para todos los modelos puede ser observado en la Figura (4.21) para días sin y con precipitación. En primer lugar todos los modelos coinciden en un aumento del \bar{H}_0 tanto para días secos y con lluvia de al menos 400 m y 200 m, respectivamente, para fines de siglo. Este aumento es ligeramente mayor hacia el norte, pero en promedio los modelos indican un aumento aproximado de 600 m y 400 m para Chile central, el cual está representado por las líneas con círculos. Se destacó el hecho de que este aumento será en forma diferenciada para los días sin y con lluvia, lo cual además estaría aumentando la diferencia ya existente en el promedio actual de ambas distribuciones. El máximo aumento proyectado por los modelos correspondió aproximadamente a unos 700 m y 800 m para los días sin y con precipitación respectivamente.

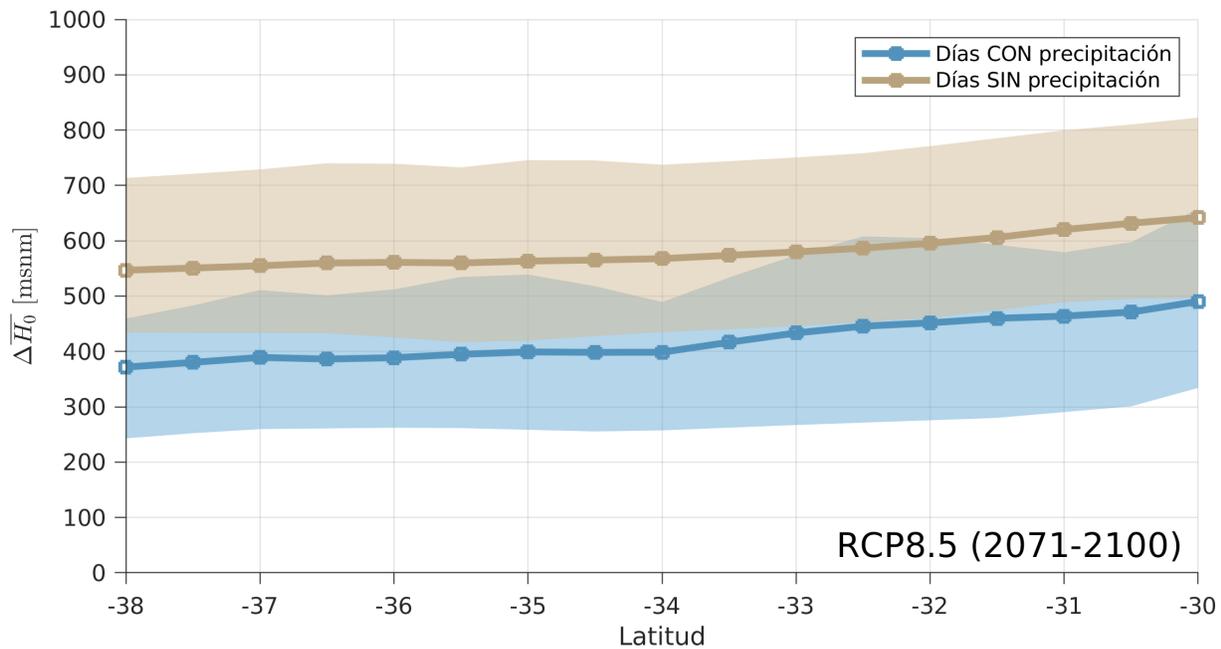


Figura 4.21: Cambio en el $\overline{H_0}$ ($\Delta\overline{H_0}$) para fines de siglo en Chile central en días con precipitación (azul) y sin precipitación (café). El área sombreada representa el intervalo (mínimo y máximo) proyectado por los modelos.

4.4.2. Cambio en los extremos ($\Delta H_{0.95}$)

En forma similar a la sección anterior, la Figura (4.22) presenta los cambios del percentil 95 de la distribución de H_0 para todos los modelos. En ambos casos, días con y sin lluvia, se tiene un aumento en el percentil 95, es decir bajo este escenario los extremos tendrán un H_0 mayor que en la actualidad. Este aumento sería de al menos 400 m y 300 m para días sin y con lluvia. El promedio de todos los modelos indica un aumento de aproximadamente 600 m y 500 m respectivamente y será ligeramente mayor hacia el norte. En este caso la diferencia entre días con y sin lluvia es ligeramente menor. El aumento máximo proyectado estaría en torno a los 700 m para días sin y con precipitación. De los cambios en $\overline{H_0}$ y $H_{0.95}$ (Figuras 4.21 y 4.22) se puede deducir que la distribución completa de H_0 se está desplazando hacia valores más elevados.

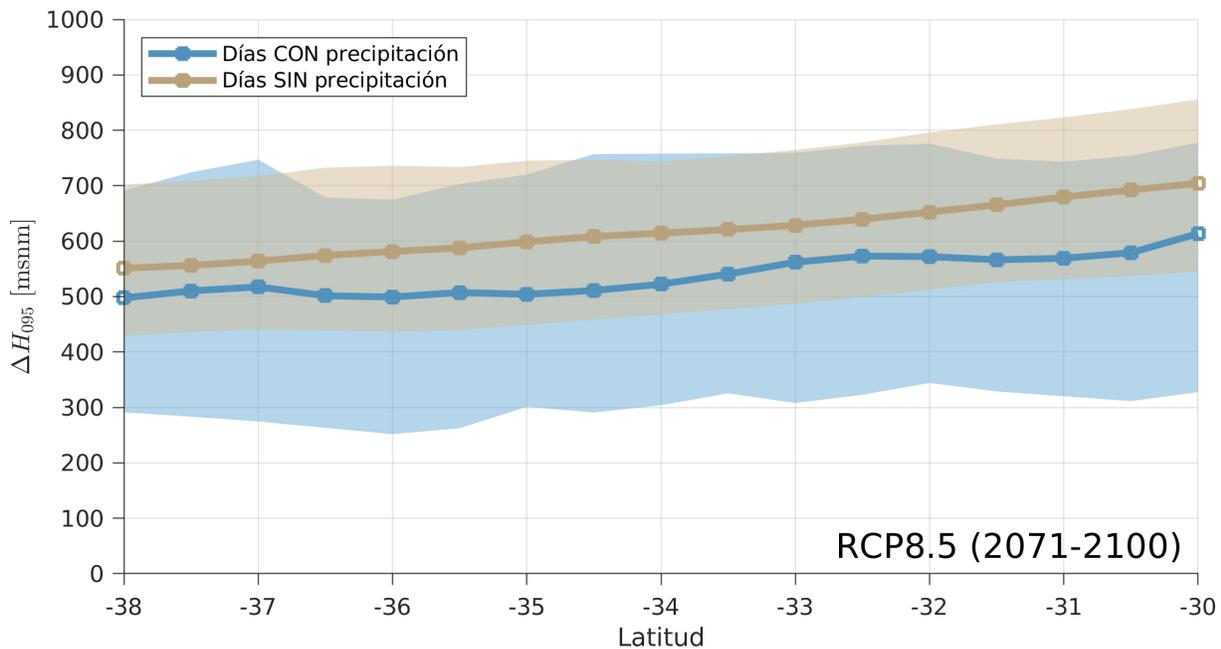


Figura 4.22: Cambio en el percentil 95 de H_0 ($\Delta H_{0.95}$) para fines de siglo en Chile central en días con precipitación (azul) y sin precipitación (café). El área sombreada representa el intervalo (mínimo y máximo) proyectado por los modelos.

4.4.3. Cambio en la frecuencia de eventos extremos (F_{95})

Para evaluar con que frecuencia ocurrirán los actuales extremos de H_0 en el futuro se calculó el parámetro F_{95} para todos los modelos, el cual es presentado en el panel superior de la Figura (4.23). Sólo se calculó para los días con precipitación ya que estos son realmente los extremos que tendrán un impacto directo en las cuencas. En base a este parámetro se observó que los eventos extremos que en la actualidad ocurren un 5% de los casos, ocurrirán entre un 20% y un 30% hacia fines de siglo bajo este escenario. Es decir serán aproximadamente entre 4 a 6 veces más frecuentes que en la actualidad a lo largo de Chile central. Dado que este porcentaje depende directamente del número de días con precipitación dentro del periodo completo, y por lo tanto de su variación en el futuro, el panel inferior de la Figura (4.23) muestra la variación del número de días con precipitación a futuro. Esta figura nos indica para todo Chile central una diferencia negativa, lo cual representa una disminución en el número de días con lluvia para fines de siglo en comparación al periodo histórico. Esta disminución sería en promedio de entre 15 a 5 días para Chile central. Entonces, además de tener una menor cantidad de días con lluvia, estos vendrán acompañados con un H_0 extremo cada vez más con

mayor frecuencia a medida que nos acercamos hacia fines de siglo.

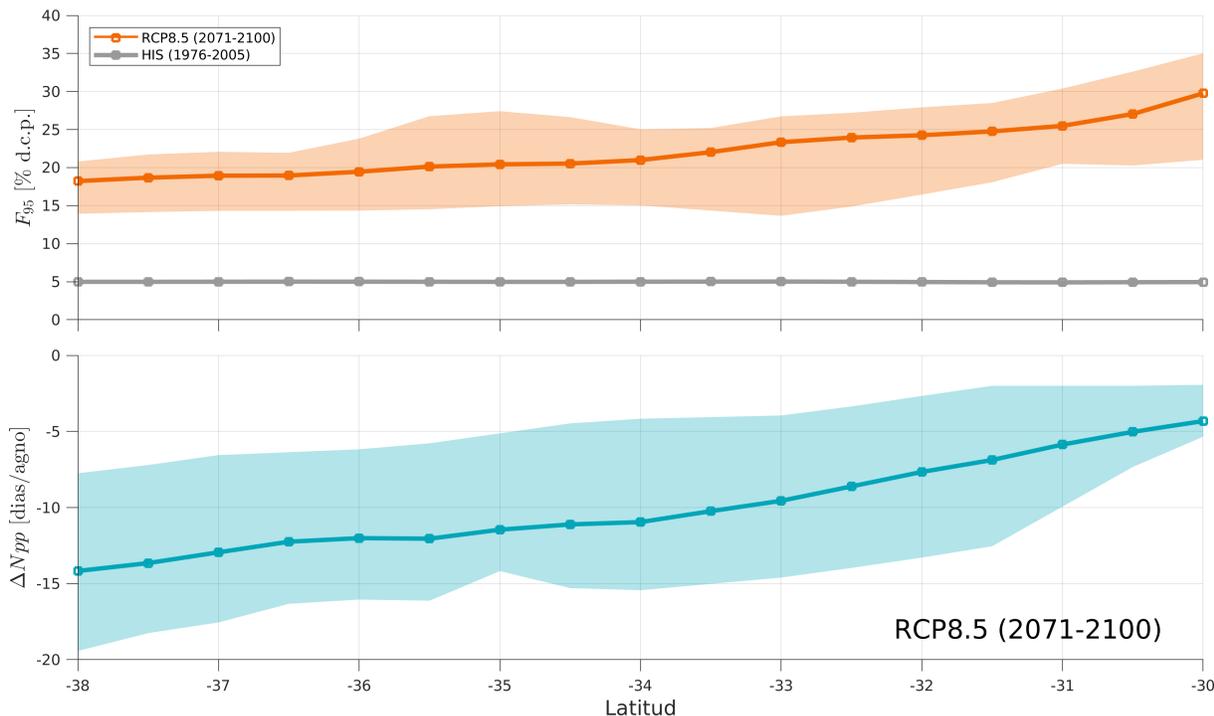


Figura 4.23: Frecuencia de eventos extremos (F_{95}) y cambio en el número de días con precipitación (ΔN_{pp}) para fines de siglo en Chile central. El área sombreada representa el intervalo (mínimo y máximo) proyectado por los modelos.

4.4.4. Contexto global de los cambios en Chile central

Para contextualizar dentro del planeta los cambios a futuro observados en Chile central, se presentan las Figuras (4.24 y (4.25). Éstas figuras presentan el $\Delta \overline{H}_0$ para días sin y con precipitación, respectivamente, con el modelo CMCC-CM para fines de siglo. En primer lugar tanto para días sin y con lluvia se observó un aumento generalizado del \overline{H}_0 en todo el mundo. Este aumento se ve particularmente intenso sobre el océano tropical con valores cercanos a los 1000 m, y menor hacia los polos donde no se observaron grandes cambios. La diferencia del $\Delta \overline{H}_0$ entre días con y sin precipitación se observa en la Figura (4.26) donde se observa con mayor claridad una diferencia negativa en latitudes medias, particularmente en torno a 40° en ambos hemisferios. Esto indicaría

que el aumento es mayor para los días secos que para días con lluvia en estas latitudes. En latitudes más altas esta diferencia es positiva, indicando en este caso que el aumento será ligeramente mayor para los días con lluvia.

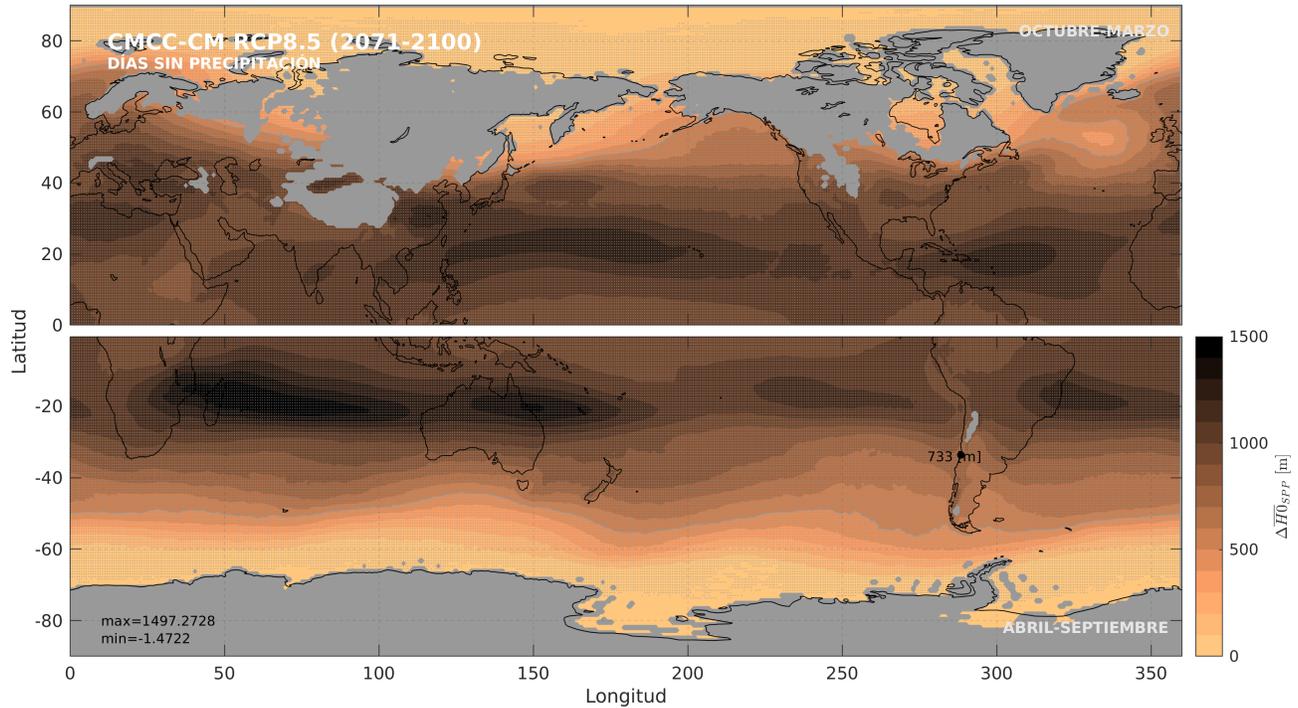


Figura 4.24: Distribución global de $\Delta\overline{H}_0$ (m) en días sin precipitación para fines de siglo con el modelo CMCC-CM. Las zonas en gris claro representan aquellas donde \overline{H}_0 en el futuro interseca con la topografía.

Retornando a Chile central, estos cambios no parecen ser tan grandes con respecto a otras zonas del planeta, en particular del hemisferio norte a las mismas latitudes. Sin embargo, no se debe olvidar que Chile posee una característica casi única en el planeta, que es limitar con la cordillera de Los Andes lo cual la hace mucho más vulnerable a los cambios de H_0 que en partes donde el aumento es mayor, como por ejemplo en los trópicos, por lo tanto a pesar de que este aumento no parezca tan grande en magnitud si tendría un impacto negativo a lo largo de las cuencas de Chile central. La cuantificación de este impacto es presentada en la siguiente sección.

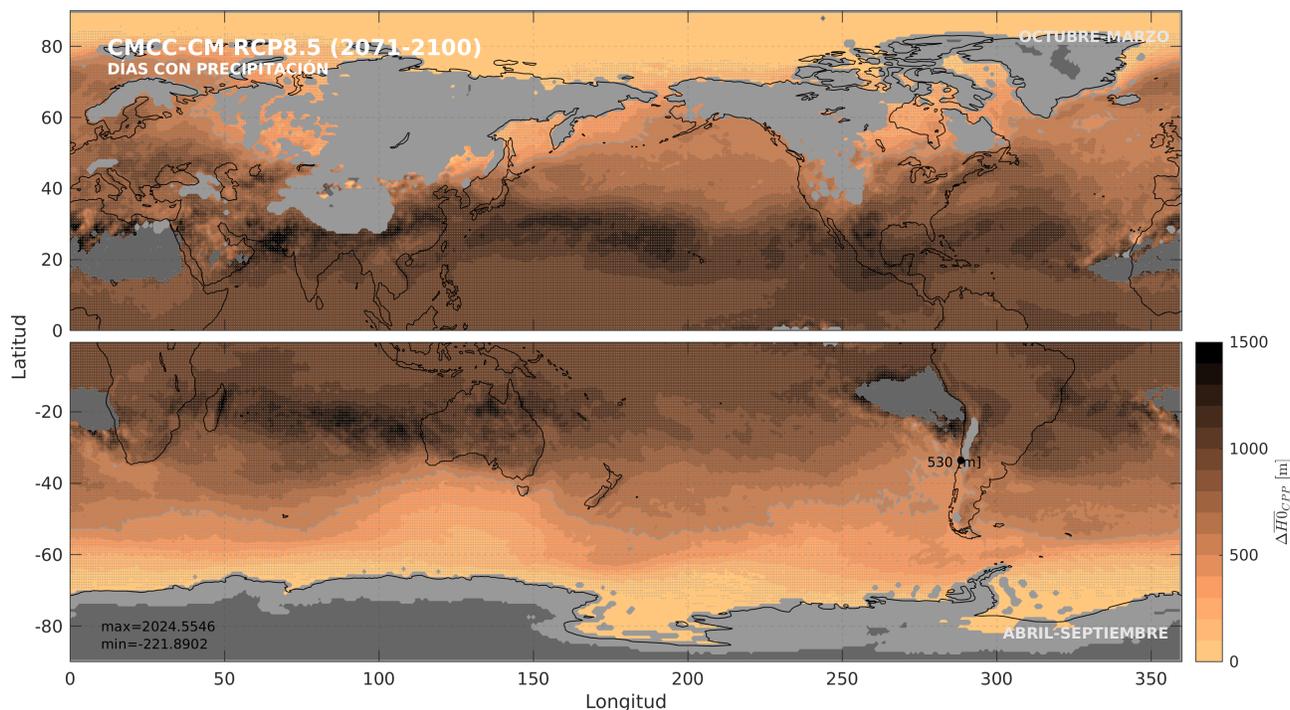


Figura 4.25: Distribución global de $\Delta\overline{H}_0$ (m) en días con precipitación para fines de siglo con el modelo CMCC-CM. Las zonas en gris claro representan aquellas donde \overline{H}_0 en el futuro interseca con la topografía. Las zonas en gris oscuro representan las zonas que son muy áridas.

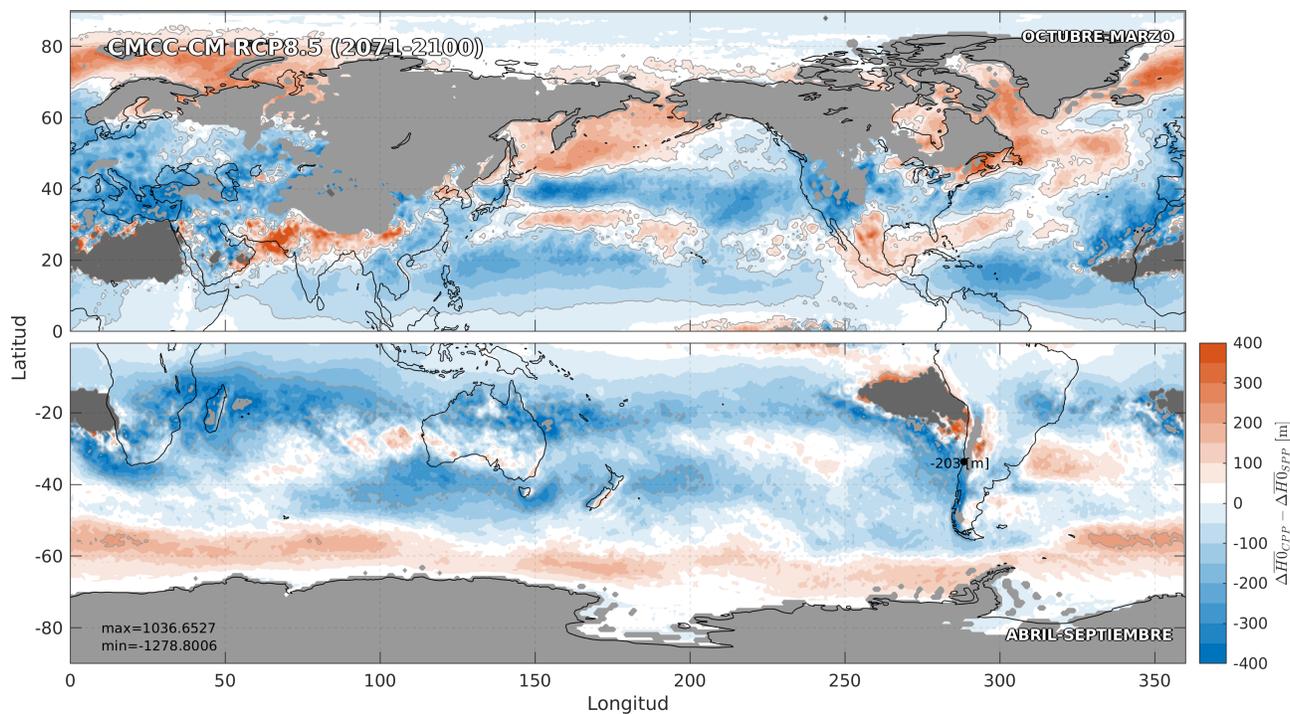


Figura 4.26: Distribución global de la diferencia de $\Delta\overline{H}_0$ entre días con y sin precipitación (CPP-SPP) con el modelo CMCC-CM. Las zonas en gris claro representan aquellas donde \overline{H}_0 en el futuro interseca con la topografía. Las zonas en gris oscuro representan las zonas que son muy áridas.

4.5. Impacto hidrológico de las variaciones de H_0

Para cuantificar el impacto de las variaciones de H_0 en Chile central se presentan las Figuras (4.27) y (4.28) para los días sin y con precipitación con la topografía de fondo. En ellas se representa el aumento promedio proyectado con los modelos para fines de siglo sobre la línea base que se observó con CFSR. Es decir, a la línea base actual de $\overline{H_0}$ y $H_{0.95}$ se le sumó el $\Delta\overline{H_0}$ y $\Delta H_{0.95}$ promedio de los modelos. Para el caso con precipitación se le restó 200 m a las líneas base actuales debido al error obtenido al promediar H_0 diariamente. Es evidente que en algunas zonas particularmente hacia el sur, las variaciones de H_0 no parecieran tener mucho impacto, ya que al menos en promedio las curvas se encuentran sobre la altura de la cordillera. Para el caso de $\overline{H_0}$ actual, cerca del 50 % de los casos superan este valor en el presente, mientras que en el futuro este porcentaje será entre un 70 % a 80 % (Figura 6.5, Anexos). Por lo tanto, poco menos de un tercio de los casos en el futuro estarán bajo el valor promedio actual de H_0 para días con precipitación. Esto es de especial interés hacia el sur, ya que el promedio parece esconder este tercio de eventos en los que seguirá precipitando en forma sólida sobre las cumbres.

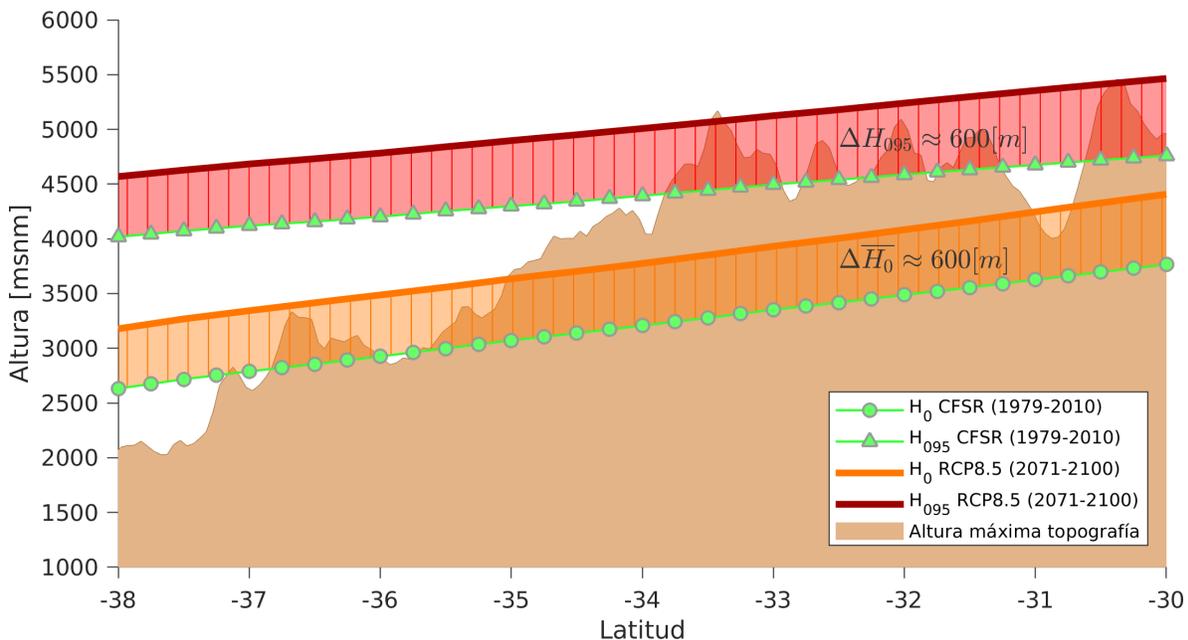


Figura 4.27: Aumento promedio de H_0 proyectado por los modelos para fines de siglo, sobre la línea base actual estimada con CFSR (verde) para días sin precipitación. En naranja se representa el aumento del promedio ($\overline{H_0}$) y en rojo el del percentil 95 ($H_{0.95}$). La altura máxima de la topografía a cada latitud es graficado en el fondo.

Las zonas más afectadas serían aquellas donde la altura de H_0 es comparable con la altura de la cordillera, lo cual se dá un poco más hacia el norte en torno a 33° S. Particularmente para el caso de los días sin precipitación (Figura 4.27) una gran variación en el promedio pasando de ≈ 3000 m a ≈ 3600 m en torno a 33° S. Esto se reflejaría directamente en que veríamos mucha menos nieve en la cordillera durante los días secos de invierno en el futuro, lo cual también se traduciría en menos agua durante la estación seca, generando otro impacto negativo más aparte de los extremos de precipitación. Lo anterior también ocurre para el percentil 95, por lo que en los casos extremos donde en la actualidad aún se logran observar algunas cumbres nevadas, ya no se observarían en el futuro.

Para los días con precipitación las alturas y las variaciones son menores, en torno a 400 y 500 m en el promedio y p95, pero en este caso toda el área representada en color naranja y rojo que intersekte con la topografía, estaría representando un incremento del área pluvial en las cuencas durante las tormentas.

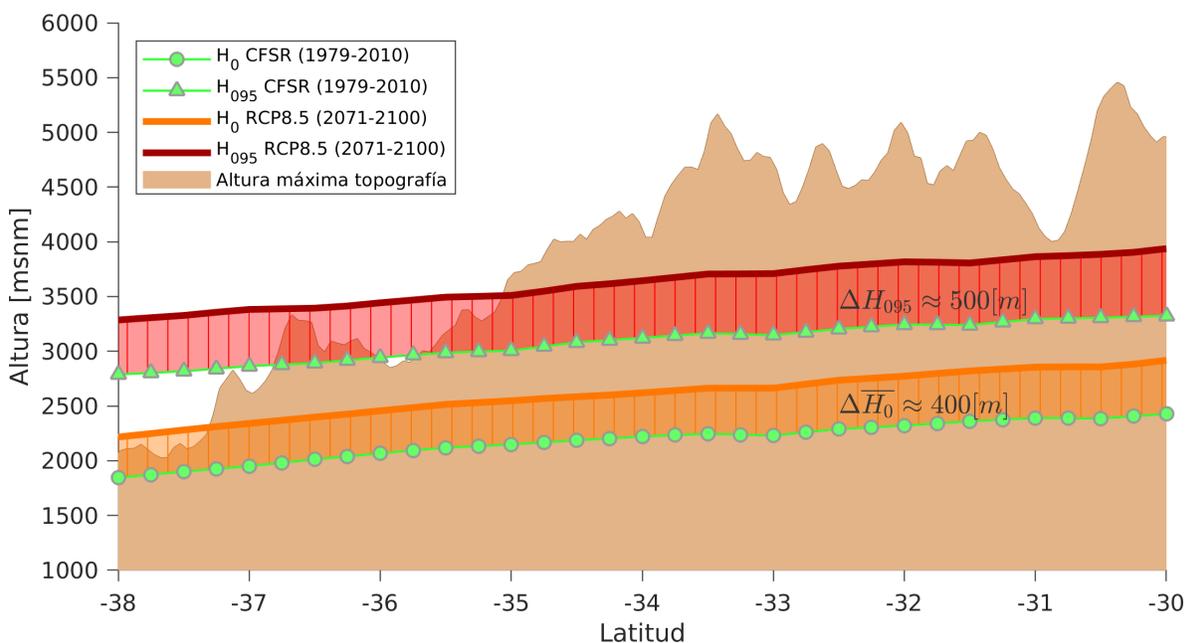


Figura 4.28: Aumento promedio de H_0 proyectado por los modelos para fines de siglo, sobre la línea base actual estimada con CFSR (verde) para días con precipitación. En naranja se representa el aumento del promedio ($\overline{H_0}$) y en rojo el del percentil 95 (H_{095}). La altura máxima de la topografía a cada latitud es graficado en el fondo.

4.5.1. Incremento del área pluvial en las cuencas andinas de Chile central

Como se mencionó en la sección anterior este aumento de H_0 representa un aumento en el área pluvial de las cuencas. El panel izquierdo de la Figura (4.29) muestra el área (en km^2) sobre los 1000 m.s.n.m y bajo la altura de $\overline{H_0}$ en la actualidad para las cuencas seleccionadas en Chile central. Claramente no es homogénea la cantidad de área a lo largo de Chile central, ya que esta se encuentra determinada por la variación del área con la altura (curvas hipsométricas) de cada cuenca. Las zonas con mayor pendiente son más vulnerables a los aumentos de H_0 , y hay algunas zonas hacia el sur donde no cambia el área ya que el aumento de H_0 se da sobre la altura máxima del terreno.

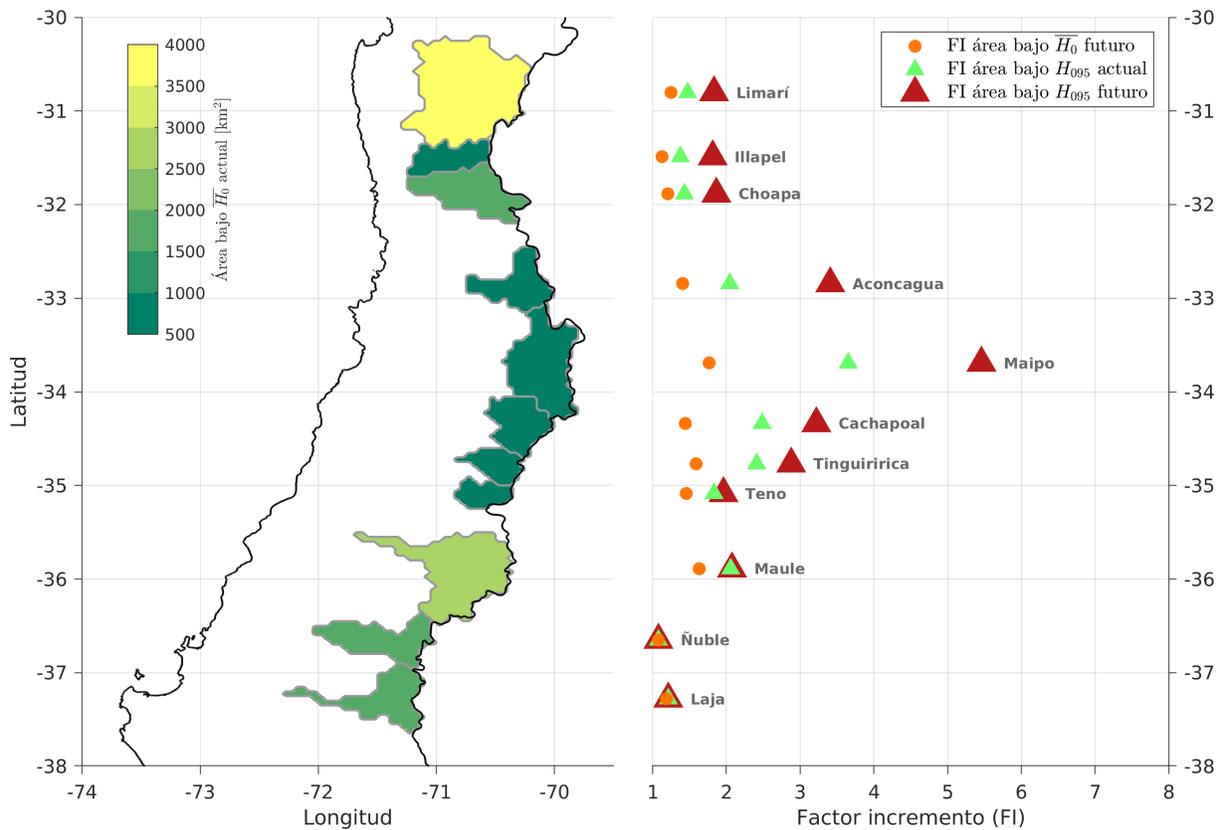


Figura 4.29: Panel izquierdo) Área (km^2) sobre 1000 m.s.n.m y bajo el promedio actual de la distribución de H_0 . Panel derecho) Factor de incremento del área sobre 1000 m.s.n.m y bajo H_0 , con respecto al área bajo el promedio actual de H_0 .

Al calcular un factor de incremento de las áreas ahora con respecto al área bajo el promedio actual, se obtuvo el panel derecho de la Figura (4.29). Este factor de

incremento presentó claramente un máximo en la cuenca de Maipo en el Manzano con un valor aproximado de 1.8 en el caso del promedio futuro de H_0 , es decir el área se incrementará 1.8 veces dado este aumento de $\overline{H_0}$. Para el resto de las cuencas este valor muestra poca variación, manteniéndose entre 1 y 1,7. En relación a los extremos, en la actualidad el área bajo el percentil 95 representa cerca de 3.6 veces el área bajo el promedio, sin embargo para los extremos en el futuro este factor alcanzaría cerca de 5.5 veces esta área. Este factor de incremento del área puede traducirse directamente en un factor de incremento en los caudales a lo largo de las quebradas al multiplicar el área por un valor de precipitación. Esta estimación de caudales se presenta en la siguiente sección.

Una representación de los cambios en el área debido al aumento de H_0 en la cuenca más afectada, Maipo en el Manzano, se puede observar en la Figura 4.30. Es muy claro el impacto que tienen los cambios de H_0 en esta cuenca, donde para un evento con el $\overline{H_0}$ actual el área aportante de la cuenca es comparable con el área de la zona urbana adyacente, mientras que para un extremo en el futuro (línea roja, 5 % de los casos) el tamaño del área aportante es condiserablemente más grande que el de la zona urbana. Es importante mencionar que los extremos actuales (línea verde) son los que ocurrirán en torno al 20 % de los casos totales con precipitación en el futuro.

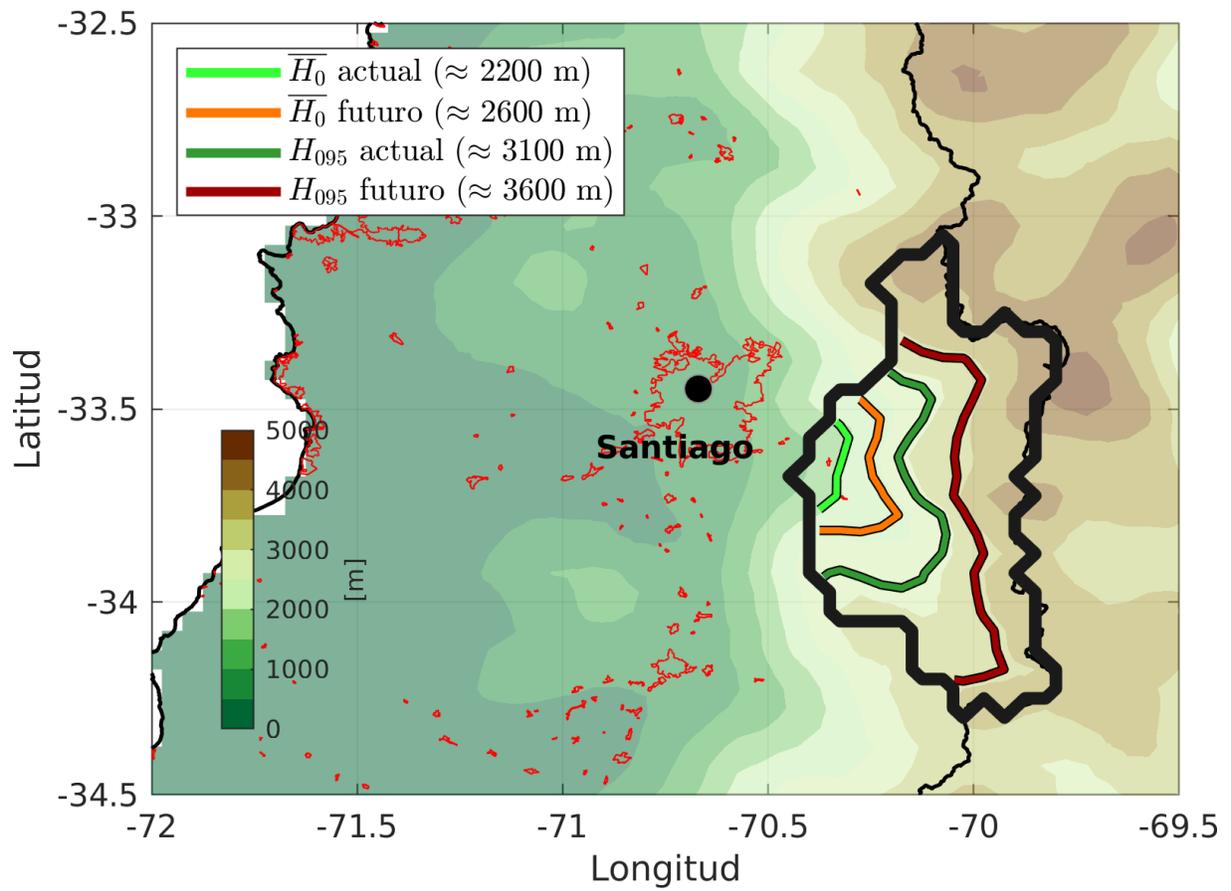


Figura 4.30: Topografía entorno a la Región Metropolitana y contornos de H_0 para la cuenca del Maipo en el Manzano. Los contornos negros gruesos indican el límite de la cuenca del Maipo en el Manzano. Los contornos de colores indican los valores de H_0 . Los contornos rojos indican las zonas urbanas.

4.5.2. Estimación de caudales futuros

El caudal instantáneo estimado en la cuenca de Maipo en el Manzano es presentado en la Figura (4.31), calculado con el área bajo cada H_0 para distintos valores de precipitación. Es notable como con el $\overline{H_0}$ actual se necesitan valores de precipitación muy altos (cerca de 60 mm/día) para tener un caudal instantáneo que supere los 500 m³/s, el cual es considerado como peligroso en base al trabajo de [Bustos Cavada, 2011] para la región Metropolitana. Hay que destacar que estos valores son raramente observados en torno a Santiago, como lo muestra de forma esquemática la distribución de precipitación en el fondo. Si consideramos el $\overline{H_0}$ proyectado para el futuro notamos como disminuye considerablemente el monto de precipitación necesario para tener un caudal sobre los 500 m³/s, casi 20 mm/día menos de lo que se necesita en la actualidad con valores que si son más frecuentes.

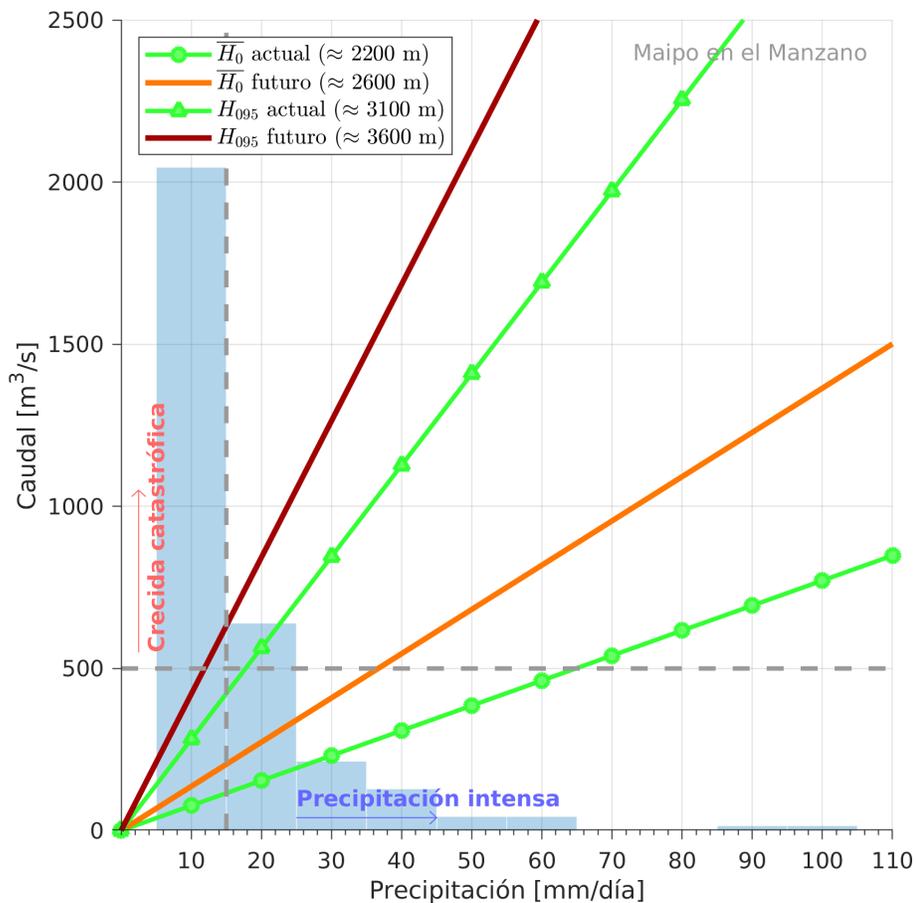


Figura 4.31: Caudal estimado para distintos valores de precipitación con un cierto nivel de H_0 en la cuenca del Maipo en el Manzano. El histograma en el fondo muestra la distribución de precipitación acumulada diaria sobre 5 mm/día con la estación DGF (con fines esquemáticos).

Con respecto a los extremos, para el valor de $H_{0.95}$ en la actualidad se necesitan cerca de 15 mm/día para alcanzar un caudal peligroso, mientras que en el futuro solo se necesitaría una precipitación de casi 10 mm/día, un valor incluso menor al promedio de precipitación para días lluviosos en esta zona. El mismo análisis se extendió para el resto de las cuencas de Chile central en la Figura (4.32), la cual muestra el monto de precipitación por latitud en la que se alcanza el caudal de $500 \text{ m}^3/\text{s}$ para cada valor de H_0 . Claramente las zonas más afectadas en relación a como varía el monto de precipitación respecto al cambio en H_0 están en torno a los 34°S .

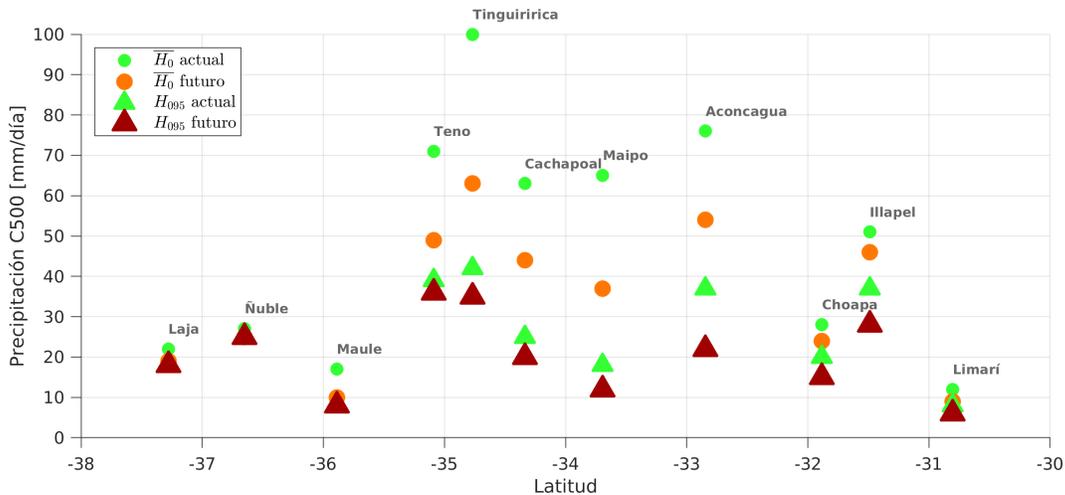


Figura 4.32: Precipitación necesaria para tener un caudal sobre $500 \text{ m}^3/\text{s}$ para las cuencas de Chile central. Cada símbolo representa el valor de precipitación asociado para los distintos valores de H_0 .

Lo anterior se debe a que en estas cuencas las curvas hipsométricas presentan una pendiente más empinada, por lo tanto son mas vulnerables a los cambios en el área producto de un cambio en la altura. Como consecuencia, en aquellas zonas este monto va disminuyendo considerablemente al aumentar H_0 y se vuelve alarmante para el caso de los extremos en el futuro, donde una tormenta con el valor del percentil 95 de H_0 en el futuro (entre 3500 m y 3800 m aproximadamente) necesitaría tan solo una precipitación de entre 10 a 20 mm/día para producir un caudal peligroso, el cual puede generar un desastre hidrometeorológico de gran magnitud. Hay que destacar el caso de la cuenca del Limarí, donde no hay mucha variación en los montos de precipitación, además de necesitar montos muy bajos. Lo anterior se debe a que el área pluvial en esta cuenca no es muy vulnerable a los cambios en la altura por tener una pendiente suave (ver Figura 6.12 en Anexos), pero al mismo tiempo es la cuenca con mayor área sobre los 1000 m.s.n.m. lo cual explica que la precipitación necesaria sea menor.

Capítulo 5

Discusión y conclusiones

5.1. Discusión

5.1.1. Diferencia H_0 entre días con y sin precipitación

La diferencia observada entre el $\overline{H_0}$ para días con y sin precipitación durante invierno muestra un patrón espacial con diferencia negativa para zonas de borde oriental en el océano. [Berry *et al.*, 2011] con una climatología de frentes atmosféricos mostró que los frentes fríos suelen ser más frecuentes en estas zonas durante invierno, mientras que los frentes cálidos y cuasi estacionarios suelen ser más frecuentes en latitudes más altas y zonas de convergencia. Por otro lado [Catto *et al.*, 2012] relacionó la precipitación global con los frentes atmosféricos, mostrando que en las zonas de borde oriental el mayor porcentaje de la precipitación anual se debe a frentes fríos (entre 40% y 50%). En latitudes más altas y las zonas de convergencia la mayoría de la precipitación se debe a frentes cálidos y cuasi estacionarios (en torno a un 40%). Esto podría explicar en gran parte el patrón espacial de las diferencias de $\overline{H_0}$ si consideramos los frentes como anomalías con respecto a los días sin lluvia, ya que según el tipo de frente asociado tendríamos una altura de H_0 menor o mayor, dependiendo si la precipitación se debe a un frente frío o cálido.

Siendo más precisos, como se mencionó brevemente en los resultados, la precipitación debería ser principalmente post-frontal para observar este efecto en la práctica. Para

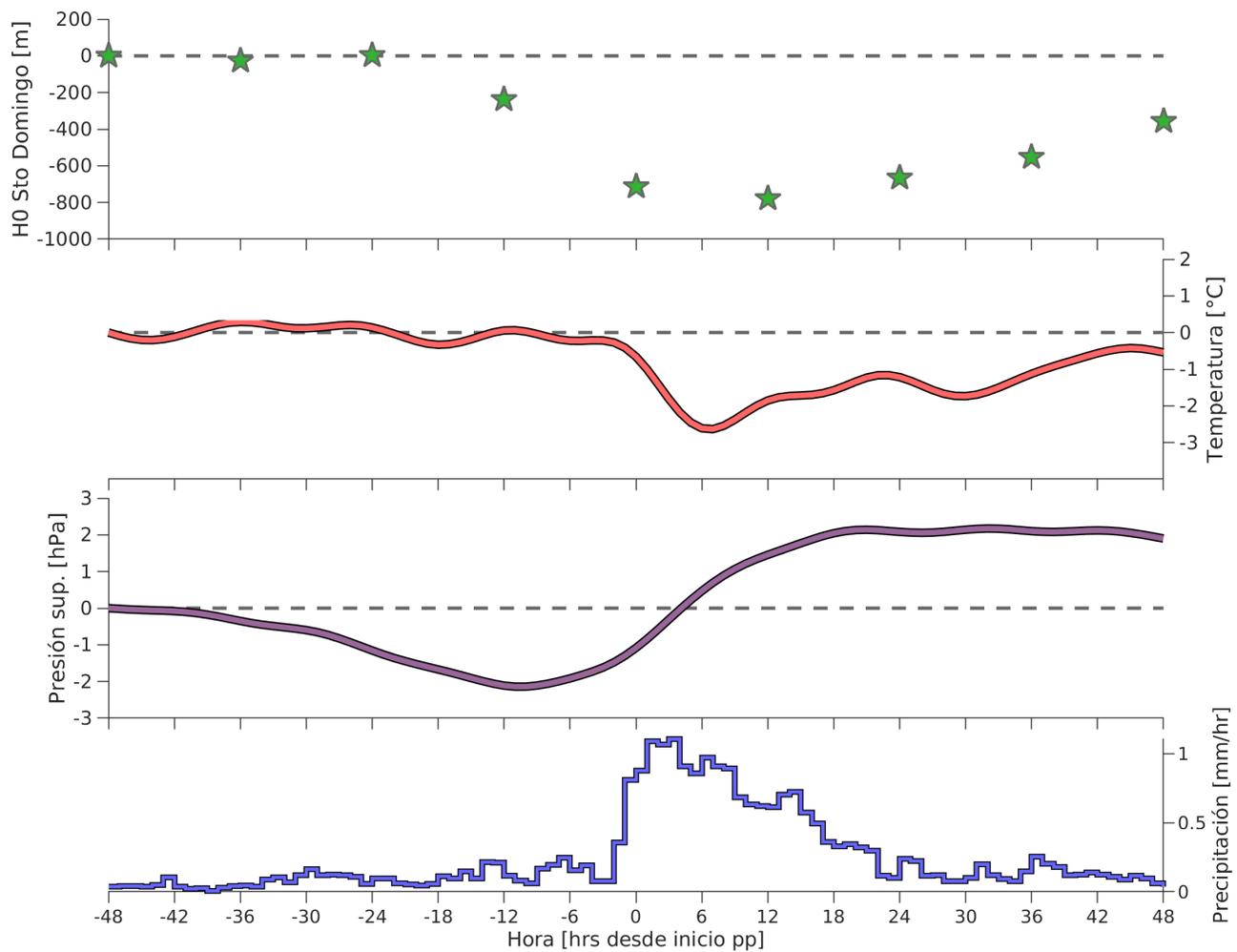


Figura 5.1: Compuesto de la evolución de H_0 , temperatura y presión superficial para eventos de precipitación iniciados a las 0000 o 12000 UTC en Santiago. Los datos de H_0 corresponden a los observados en Santo Domingo y el resto de las variables son obtenidas de la estación DGF.

confirmar si esto ocurre realmente, la Figura (5.1) muestra el compuesto para eventos de precipitación que comiencen a las 0000 o 12000 UTC de un cierto día, utilizando los datos de H_0 de Santo Domingo y el resto de variables desde la estación DGF. Se encontró un total de 76 eventos, de los cuales se presentan algunos a modo de ejemplo en las Figuras (6.6) a (6.11) del Anexo. Se muestra la evolución desde las 48 horas antes hasta las 48 horas después desde el inicio de la precipitación, para ver como evoluciona H_0 y demás variables desde un día sin lluvia a uno con lluvia, por lo que los valores de H_0 , temperatura y presión son relativos al valor 48 horas antes del inicio de esta. Notamos como un par de horas antes del inicio de la precipitación hay un mínimo de

presión superficial el cual nos sirve para marcar la llegada del frente. Una vez que pasa el frente frío disminuye la temperatura cerca de 2 °C debido a la advección de aire frío desde la parte trasera del frente, y comienza la precipitación. Estos cambios vienen acompañados de una disminución de H_0 , produciendo que esta se encuentre en torno a 800 m más baja durante un día con precipitación. Esta disminución comienza unas horas antes del inicio de la precipitación, lo cual se puede deber también a que Santo Domingo se encuentra en la costa, mientras que la estación DGF se ubica cerca de 100 km hacia el interior, por lo que el frente frío pasa unas horas antes en la primera estación. Lo anterior es evidencia suficiente para confirmar que efectivamente H_0 disminuye durante los días con precipitación en Chile central, lo cual se debe a que la precipitación se asocia al paso de frentes fríos y es principalmente post-frontal.

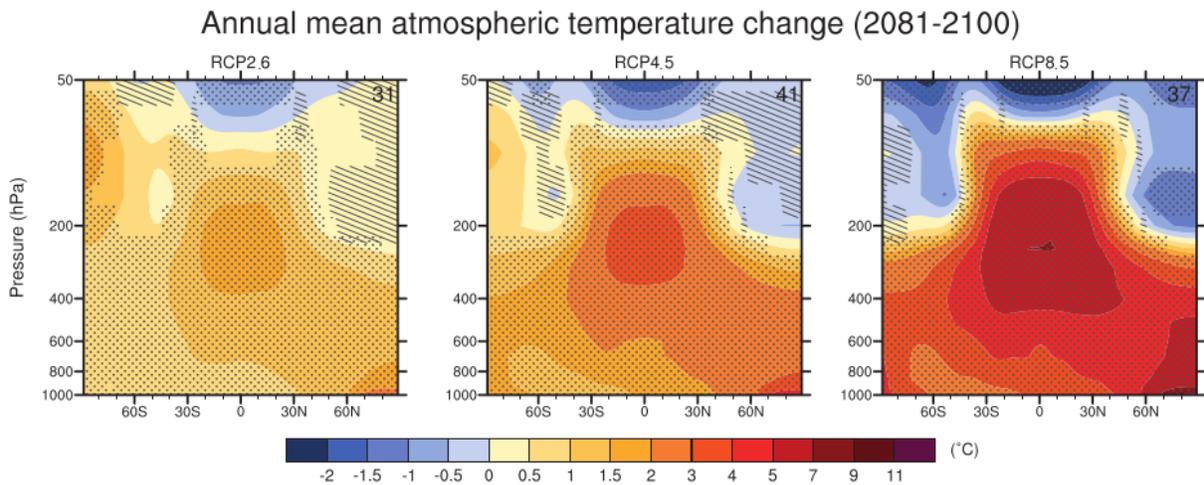


Figura 5.2: Promedio zonal del cambio anual de la temperatura atmosférica con modelos CMIP5, bajo los escenarios RCP2.6, RCP4.5 y RCP8.5. Figura tomada de [Collins *et al.*, 2013].

Esta diferencia de H_0 entre días con y sin precipitación también parece verse afectada para fines de siglo, proyectándose un aumento mayor para el H_0 en días sin lluvia, por lo cual aumentaría esta diferencia. La razón de esta diferencia en el incremento de H_0 no es clara. Una hipótesis al respecto se debe a que durante los días con precipitación la temperatura suele estar dominada por la advección de masas de aire frío, las cuales provienen de latitudes más altas. Si el aumento de temperatura es menor en

esas latitudes en comparación a Chile central, como se observa en la Figura entonces es esperable que durante los días con precipitación el aumento de H_0 sea menor, ya que finalmente son estas masas de aire las que determinan la temperatura y por lo tanto H_0 al momento de precipitar.

5.1.2. Disminución de H_0 en zonas cordilleranas

Como se alcanzó a observar en la Figura (4.12) de los resultados, hay una disminución del $\overline{H_0}$ a medida que nos acercamos hacia la cordillera. [Minder *et al.*, 2011] planteó y observó en su trabajo una serie de mecanismos que pueden generar una disminución de H_0 , con respecto a su valor corriente arriba, en zonas montañosas. Estos mecanismos corresponden a 1) incremento orográfico

de la precipitación lo cual resulta en un enfriamiento localizado del aire debido al derretimiento de nieve, 2) el incremento orográfico de la precipitación que genera hidrometeoros de mayor tamaño los cuales son capaces de recorrer más distancia y derretirse a menor altura, y 3) el enfriamiento adiabático bajo estratificación estable el cual produce temperaturas más frías en la montaña que en la zona corriente arriba. Estos factores en conjunto pueden explicar diferencias del orden de cientos de metros en H_0 en zonas cordilleranas y en particular explican el por que la línea de nieve se puede encontrar mucho más abajo que el H_0 observado corriente arriba. En Chile actualmente no se cuenta con la instrumentación necesaria para poder realizar estudios similares, por lo que solo se evaluó como cambian los resultados, en particular el impacto hidrológico en las cuencas, considerando una disminución de 300 m en las líneas base de H_0 de la Figura 4.28. Esta disminución es un límite inferior más que razonable para H_0 en base a lo mencionado por [Minder *et al.*, 2011]. Las Figuras (5.3) y (5.4) muestran los resultados obtenidos considerando esta disminución de 300 m. En primer lugar notamos como lógicamente disminuyó el área bajo el $\overline{H_0}$ actual en relación a la Figura (4.29), a excepción de las cuencas en torno a 34° donde no variaron mucho y el área se sigue manteniendo entre 500 y 1000 km².

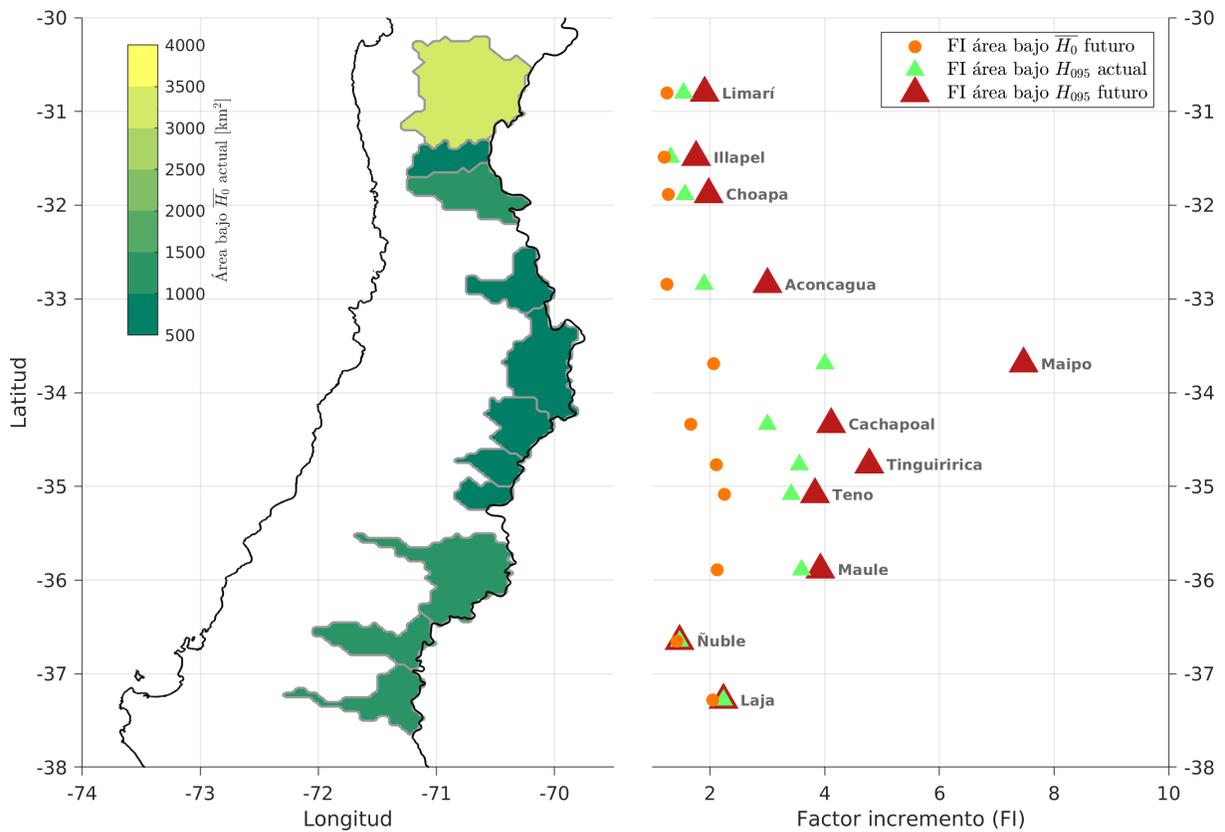


Figura 5.3: Panel izquierdo) Área (km^2) sobre 1000 m.s.n.m y bajo el promedio actual de la distribución de H_0 considerando una disminución de 300 m. Panel derecho) Factor de incremento del área sobre 1000 m.s.n.m y bajo H_0 , con respecto al área bajo el promedio actual de H_0 considerando una disminución de 300 m.

Por otra parte es muy notorio como aumenta el factor de incremento en todas las cuencas, en particular para la cuenca de Maipo en el Manzano, donde el factor de incremento para los extremos futuros de H_0 se dispara alcanzando un valor en torno a 7.5 veces sobre el área promedio bajo $\overline{H_0}$ actual (\approx factor 5.5 originalmente). Con respecto a la precipitación necesaria para obtener un caudal de $500 \text{ m}^3/\text{s}$, la Figura (5.4) muestra como aumentan estos montos considerando la disminución de H_0 , particularmente para el $\overline{H_0}$ actual y futuro. Este aumento es cerca del doble de lo obtenido originalmente en la Figura (4.32). Sin embargo, para el caso de los extremos de H_0 en el futuro no varían mucho los resultados ya que se siguen necesitando valores relativamente bajos, entre 10 a 20 mm/día, para obtener caudales capaces de producir desastres hidrometeorológicos.

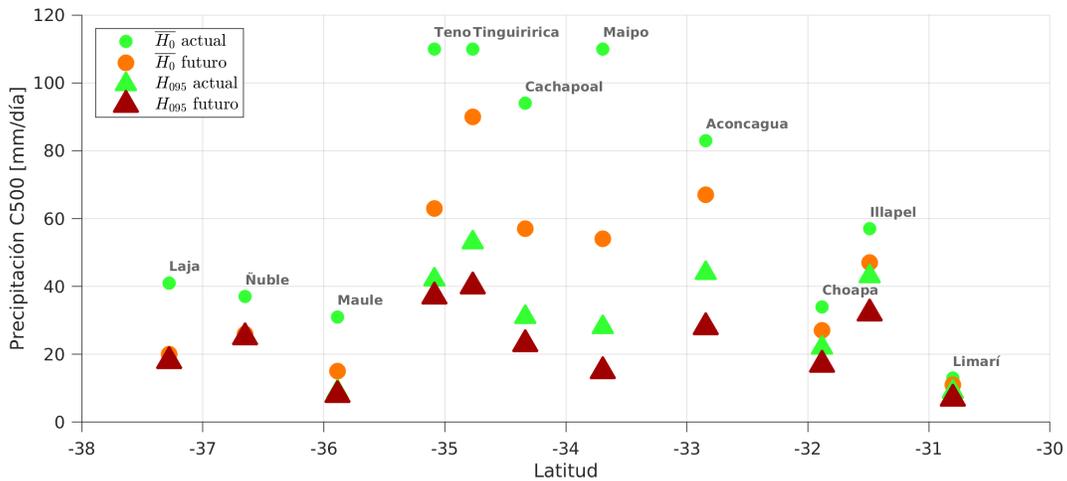


Figura 5.4: Precipitación necesaria para tener un caudal sobre $500 \text{ m}^3/\text{s}$ para las cuencas de Chile central considerando una disminución de 300 m en las líneas base de H_0 . Cada símbolo representa el valor de precipitación asociado para los distintos valores de H_0 .

5.1.3. Contexto global de los cambios en Chile central

Existen otros estudios que utilizan salidas de los modelos CMIP5 para analizar las variaciones de H_0 , como el de [Schauwecker *et al.*, 2017] para las cordilleras de Perú y [Drewes *et al.*, 2018] para Los Andes centrales de Argentina. En ambos el enfoque está principalmente en estudiar el impacto sobre la criosfera, pero sus resultados indican también un aumento de H_0 para fines de siglo en torno a 850 m (2081-2100) y 500 m (2061-2080), con el escenario RCP8.5, para ambas zonas respectivamente. Sin embargo, en estos trabajos no se realizó la separación entre días con y sin precipitación, analizando directamente los promedios estacionales de H_0 y el promedio total del periodo en el caso de [Drewes *et al.*, 2018]. Sin perjuicio de lo anterior, los resultados obtenidos en este trabajo son comparables en magnitud y consistentes con lo observado en los trabajos anteriores.

A pesar de que las variaciones a lo largo de Chile central puedan tener una magnitud menor que en otras zonas, la importancia de estas radica en que nos encontramos en una zona única debido a la presencia de la cordillera de Los Andes, la cual es la cadena montañosa más extensa del planeta y se encuentra densamente poblada. En esta región las personas dependen directamente del agua dulce proporcionada de las montañas por el derretimiento de hielo o nieve acumulada en invierno ([Barnett *et al.*, 2005]), por lo tanto la variación de un parámetro tan importante como H_0 , en particular un aumento

durante los días con y sin precipitación, tendrá un impacto mucho mayor que en otras zonas ya que estaría limitando también la disponibilidad de agua para el futuro al tener una menor cubierta de nieve. Esto se explica debido a que al aumentar H_0 durante los días con precipitación se acumulará menos nieve y hielo en las cuencas, la cual además será derretida a una mayor tasa posteriormente debido al aumento de H_0 para los días sin precipitación.

Uno de los enfoques más importantes de este estudio el cual no ha sido abordado por trabajos anteriores fue determinar el impacto hidrológico de las variaciones de H_0 en particular para días con precipitación y con énfasis en los eventos extremos. Esto permitió observar que además de los problemas asociados a la disponibilidad de agua, tendremos que convivir con extremos cada vez más frecuentes al estar rodeado de una cadena montañosa, lo cual no ocurrirá en otras zonas del planeta donde por más que se tenga un aumento de H_0 no sufrirán estas consecuencias al no tener cuencas que puedan verse afectadas por estas variaciones. Es importante mencionar que el aumento conjunto de H_0 tanto para días con y sin precipitación, genera condiciones más desfavorables aún para los eventos extremos, ya que al tener menos cobertura de nieve antes de un evento de precipitación, menor es la retención de agua durante las crecidas ([Garreaud, 1992]).

5.1.4. Factibilidad de escenario RCP8.5

El escenario RCP8.5 es un escenario futuro en el cual no se llevan a cabo políticas explícitas para la mitigación del cambio climático, representando el escenario RCP más alto en términos de concentración de gases de efecto invernadero ([Riahi *et al.*, 2011]). Bajo este escenario las emisiones y concentraciones de gases de efecto invernadero aumentan considerablemente con el tiempo, llevando a un forzamiento radiativo de 8.5 W/m² para fines de siglo, equivalente a una concentración de CO₂ en torno a las 1370 ppm ([Van Vuuren *et al.*, 2011]). Este escenario se caracteriza por asumir tasas lentas de desarrollo económico y tecnológico, junto a un rápido incremento de la población mundial. Se asume también que la principal fuente de energía seguirán siendo los combustibles fósiles. Por otro lado la electricidad seguirá siendo la principal forma de consumo de energía en el sector residencial e industrial, de la cual un importante porcentaje será provista desde fuentes no fósiles después del 2050. Uno de las suposiciones más controversiales de este escenario es el retorno al carbón como principal fuente de energía, incluso más allá de lo que se extrae actualmente, lo cual ha sido cuestionado abiertamente por otros estudios debido a que trata de un recurso limi-

tado ([Ritchie y Dowlatabadi, 2017], [Mohr y Evans, 2009]). Sin embargo, es necesario recordar que el escenario RCP8.5 representa una trayectoria de concentración/forzamiento radiativo y no una trayectoria de emisiones, por lo que distintas trayectorias de emisiones pueden llevarnos al mismo forzante radiativo para fines de siglo. Según el [IPCC, 2013] para el escenario RCP8.5 este rango de emisiones acumuladas desde 2012-2100 varía entre 1415 y 1910 GtC.

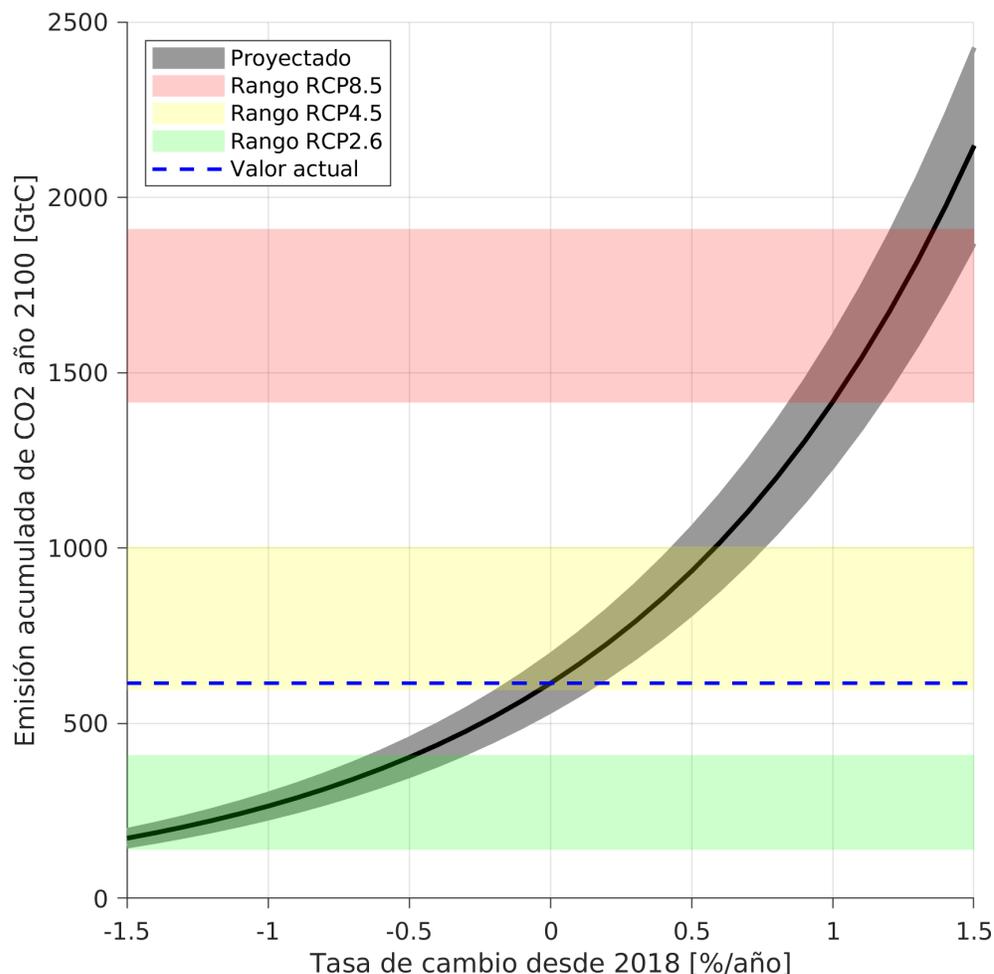


Figura 5.5: Emisión acumulada de CO₂ para el año 2100 en base a una variación por año hipotética a partir del valor en el año 2018 (615 ± 80 GtC). Las áreas verde, amarilla y roja representan el rango de emisiones para los escenarios RCP2.6, RCP4.5 y RCP8.5, respectivamente, según el [IPCC, 2013].

Actualmente vamos en 615 ± 80 GtC acumulados entre los años 1870-2017, con una tendencia de aumento en las emisiones de combustibles fósiles del 1% entre 2000-2017 y un aumento proyectado de 2.7% para el 2018 [Le Quéré *et al.*, 2018], lo que nos aleja cada vez más de los escenarios de mitigación RCP2.6 y RCP4.5 los cuales proyectan emisiones acumuladas entre 140-410 GtC y 595-1005 GtC respectivamente [IPCC, 2013].

Para ejemplificar esto de mejor forma, se consideró un caso hipotético en el cual las emisiones acumuladas varían un cierto porcentaje por año a partir desde el 2018, como se puede observar en la Figura (5.5).

En primer lugar notamos que si incluso se mantiene constante el valor actual, este ya se encuentra dentro del rango de emisiones que nos pueden llevar al forzamiento radiativo del escenario RCP4.5, además de que claramente ya se vuelve necesaria una disminución de una tasa cercana al 1% por año para estar dentro del rango de las emisiones del escenario RCP2.6 en 2100. Por otro lado notamos que con una tasa de aumento del 1% por año ya se logra entrar dentro del rango de emisiones del escenario RCP8.5, lo cual es una tasa similar, e incluso menor, a las observadas durante las últimas décadas ([Le Quéré *et al.*, 2018]). En base al análisis anterior el escenario RCP8.5 se vuelve un escenario perfectamente posible a pesar de que las suposiciones que utiliza puedan parecer controversiales o exageradas.

5.2. Conclusiones

El hecho de promediar diariamente los datos de H_0 induce una ligera sobrestimación de este valor, en torno al 10%, al calcular los parámetros de la distribución. Este sobrestimación se da principalmente para el caso de los días con precipitación y se asoció principalmente al hecho de que los eventos de precipitación no suelen durar un día completo en Chile central, por lo tanto al hacer el promedio diario estamos incluyendo horas donde no precipitó en las cuales H_0 suele ser mayor.

El reanálisis CFSR es una buena herramienta para realizar análisis de H_0 al menos para Chile central, donde se obtuvo un $r^2 = 0,97$ y $r^2 = 0,93$ para los días sin y con precipitación respectivamente. Hubo un error del 16% para representar los días con lluvia en el reanálisis, mientras que para los días sin lluvia este error fue del 5%. Al considerar el promedio y los percentiles se notó, en general para días con precipitación, una pequeña sobreestimación de estos valores utilizando CFSR.

El análisis global de H_0 actual presentó un patrón que varía en forma latitudinal para días sin precipitación, el cual cambia para días con precipitación particularmente en las zonas de borde oriental de los océanos, donde se observó una diferencia negativa (H_0 menor para días con precipitación). Para latitudes más altas la diferencia es positiva (mayor para días sin precipitación). Esta diferencia se relacionó al tipo de frentes que

suelen llegar a esas zonas (fríos y cálidos).

Los modelos no son capaces de reproducir con exactitud el patrón espacial de precipitación en Chile central. Esto se debe a la resolución gruesa de los modelos, los cuales no representan bien la cordillera y la línea de costa real. Se consideró la línea de costa en base a la orografía de cada modelo. Todos los modelos sobreestiman el $\overline{H_0}$ para días con precipitación (5 % en promedio), del cual el que tuvo el mejor desempeño fue el modelo CMCC-CM con un error cercano al 1 %. Por otro lado el número de días con precipitación también es sobreestimado por los modelos (170 % en promedio), donde el mejor resultado lo tuvo el modelo CNRM-CM5 que los sobrestima un 40 %. Para días sin precipitación los modelos subestiman $\overline{H_0}$ en promedio un 9 %, de los cuales el mejor desempeño lo tuvo el modelo MRI-CGCM3 con un error cercano al 3 %.

A pesar de la incertidumbre propia de los modelos, existe un consenso de un aumento de $\overline{H_0}$ para fines de siglo bajo el escenario RCP8.5 de aproximadamente 400 m para días con precipitación y 600 m para días sin precipitación. Para el valor de $H_{0_{95}}$ este aumento es mayor aún, en torno a 500 m para días con lluvia y 600 m para días sin lluvia. Estos valores representan el promedio de los modelos.

Con respecto a la ocurrencia de eventos extremos se determinó que estos serán entre un 15 % y 30 % más frecuentes que en la actualidad en Chile central para fines de siglo (20 % en torno a Santiago) siendo mayor este porcentaje hacia el norte. En relación al número de días con precipitación los modelos indican una disminución de estos en el futuro de aproximadamente 15 y 5 días por año (menor hacia el norte, 10 en torno a Santiago). Es decir, que lloverá una menor cantidad de días, pero los eventos extremos serán más frecuentes y podrían ser aún más extremos debido al desplazamiento del $H_{0_{95}}$.

El impacto de estas variaciones se traduce en un incremento del área pluvial y por lo tanto en el volumen de agua disponible para todas las cuencas de Chile central durante las tormentas, excepto algunas más al sur en torno a donde el aumento de H_0 no tiene un efecto directo debido a que se encuentra sobre la topografía. Las cuencas más afectadas serán aquellas en torno a 34°S con un factor de incremento de entre 3 a 6 veces sobre el área pluvial bajo el promedio actual de H_0 para los extremos futuros. Con las estimaciones de caudal se determinó que en el futuro se necesitarán montos relativamente bajos de precipitación (entre 10 a 20 mm/día) en comparación a la actualidad para producir desastres hidrometeorológicos, incluso suponiendo que las líneas base de H_0 se encuentren 500 m más abajo.

Bibliografía

- [Alvarez-Garreton *et al.*, 2018] Alvarez-Garreton, Camila and Mendoza, Pablo A and Boisier, Juan P and Addor, Nans and Galleguillos, Mauricio and Zambrano-Bigiarini, Mauricio and Lara, Antonio and Cortes, Gonzalo and Garreaud, Rene and McPhee, James and others (2018). The camels-cl dataset: catchment attributes and meteorology for large sample studies-chile dataset. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11):5817–5846.
- [Barnett *et al.*, 2005] Barnett, T. P., Adam, J. C., y Lettenmaier, D. P. (2005). Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 438(7066):303.
- [Barrett *et al.*, 2009] Barrett, B. S., Garreaud, R., y Falvey, M. (2009). Effect of the andes cordillera on precipitation from a midlatitude cold front. *Monthly Weather Review*, 137(9):3092–3109.
- [Barros *et al.*, 2015] Barros, V. R., Boninsegna, J. A., Camilloni, I. A., Chidiak, M., Magrín, G. O., y Rusticucci, M. (2015). Climate change in argentina: trends, projections, impacts and adaptation. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 6(2):151–169.
- [Berry *et al.*, 2011] Berry, G., Reeder, M. J., y Jakob, C. (2011). A global climatology of atmospheric fronts. *Geophysical Research Letters*, 38(4).
- [Blázquez y Nuñez, 2013] Blázquez, J. y Nuñez, M. N. (2013). Analysis of uncertainties in future climate projections for south america: comparison of wcrp-cmip3 and wcrp-cmip5 models. *Climate dynamics*, 41(3-4):1039–1056.
- [Boisier *et al.*, 2016] Boisier, J. P., Rondanelli, R., Garreaud, R. D., y Muñoz, F. (2016). Anthropogenic and natural contributions to the southeast pacific precipitation decline

- and recent megadrought in central chile. *Geophysical Research Letters*, 43(1):413–421.
- [Bozkurt *et al.*, 2017] Bozkurt, D., Rojas, M., Boisier, J., y Valdivieso, J. (2017). Climate change impacts on hydroclimatic regimes and extremes over andean basins in central chile. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss*, 2017:1–29.
- [Bradley *et al.*, 2004] Bradley, R. S., Keimig, F. T., y Diaz, H. F. (2004). Projected temperature changes along the american cordillera and the planned gcos network. *Geophysical research letters*, 31(16).
- [Bustos Cavada, 2011] Bustos Cavada, D. (2011). Cambio climático y eventos de emergencia en el suministro de agua potable en el gran santiago.
- [Cabré *et al.*, 2014] Cabré, F., Solman, S., y Núñez, M. (2014). Climate downscaling over southern south america for present-day climate (1970-1989) using the mm5 model. mean, interannual variability and internal variability. *Atmósfera*, 27(2):117–140.
- [Carrasco *et al.*, 2005] Carrasco, J. F., Casassa, G., y Quintana, J. (2005). Changes of the 0 c isotherm and the equilibrium line altitude in central chile during the last quarter of the 20th century/ changements de l’isotherme 0 c et de la ligne d’équilibre des neiges dans le chili central durant le dernier quart du 20ème siècle. *Hydrological Sciences Journal*, 50(6).
- [Catto *et al.*, 2012] Catto, J., Jakob, C., Berry, G., y Nicholls, N. (2012). Relating global precipitation to atmospheric fronts. *Geophysical Research Letters*, 39(10).
- [Center, 2006] Center, N. G. D. (2006). 2-minute gridded global relief data (etopo2) v2.
- [Collins *et al.*, 2013] Collins, Matthew and Knutti, Reto and Arblaster, Julie and Dufresne, Jean-Louis and Fichet, Thierry and Friedlingstein, Pierre and Gao, Xuejie and Gutowski, William J and Johns, Tim and Krinner, Gerhard and others (2013). Long-term climate change: projections, commitments and irreversibility. En *Climate Change 2013-The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pp. 1029–1136. Cambridge University Press.
- [Drewes *et al.*, 2018] Drewes, J., Moreiras, S., y Korup, O. (2018). Permafrost activity

and atmospheric warming in the argentinian andes. *Geomorphology*, 323:13–24.

[Falvey y Garreaud, 2007] Falvey, M. y Garreaud, R. (2007). Wintertime precipitation episodes in central chile: Associated meteorological conditions and orographic influences. *Journal of Hydrometeorology*, 8(2):171–193.

[Falvey y Garreaud, 2009] Falvey, M. y Garreaud, R. D. (2009). Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast pacific and along the west coast of subtropical south america (1979–2006). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D4).

[Garreaud, 1992] Garreaud, R. (1992). Estimación de la altura de la linea de nieve en cuencas de chile central. *Rev. Chil. Ing. Hidraul*, 7:21–32.

[Garreaud, 2013] Garreaud, R. (2013). Warm winter storms in central chile. *Journal of Hydrometeorology*, 14(5):1515–1534.

[Garreaud y Rutllant, 1996] Garreaud, R. y Rutllant, J. (1996). Análisis meteorológico de los aluviones de antofagasta y santiago de chile en el periodo 1991-1993. *Atmósfera*, 9(4):251–271.

[IPCC, 2013] IPCC (2013). *Summary for Policymakers*, book section SPM, p. 1–30. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

[Le Quéré *et al.*, 2018] Le Quéré, C., Andrew, R. M., Friedlingstein, P., Sitch, S., Hauck, J., Pongratz, J., Pickers, P. A., Korsbakken, J. I., Peters, G. P., Canadell, J. G., Arneeth, A., Arora, V. K., Barbero, L., Bastos, A., Bopp, L., Chevallier, F., Chini, L. P., Ciais, P., Doney, S. C., Gkritzalis, T., Goll, D. S., Harris, I., Haverd, V., Hoffman, F. M., Hoppema, M., Houghton, R. A., Hurtt, G., Ilyina, T., Jain, A. K., Johannessen, T., Jones, C. D., Kato, E., Keeling, R. F., Goldewijk, K. K., Landschützer, P., Lefèvre, N., Lienert, S., Liu, Z., Lombardozzi, D., Metzl, N., Munro, D. R., Nabel, J. E. M. S., Nakaoka, S.-I., Neill, C., Olsen, A., Ono, T., Patra, P., Peregón, A., Peters, W., Peylin, P., Pfeil, B., Pierrot, D., Poulter, B., Rehder, G., Resplandy, L., Robertson, E., Rocher, M., Rödenbeck, C., Schuster, U., Schwinger, J., Séférian, R., Skjelvan, I., Steinhoff, T., Sutton, A., Tans, P. P., Tian, H., Tilbrook, B., Tubiello, F. N., van der Laan-Luijkx, I. T., van der Werf, G. R., Viovy, N., Walker, A. P., Wiltshire, A. J., Wright, R., Zaehle, S., y Zheng, B. (2018). Global carbon budget 2018. *Earth System Science Data*, 10(4):2141–2194.

- [Minder *et al.*, 2011] Minder, J. R., Durran, D. R., y Roe, G. H. (2011). Mesoscale controls on the mountainside snow line. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 68(9):2107–2127.
- [Mohr y Evans, 2009] Mohr, S. H. y Evans, G. M. (2009). Forecasting coal production until 2100. *Fuel*, 88(11):2059–2067.
- [Moss *et al.*, 2010] Moss, Richard H and Edmonds, Jae A and Hibbard, Kathy A and Manning, Martin R and Rose, Steven K and Van Vuuren, Detlef P and Carter, Timothy R and Emori, Seita and Kainuma, Mikiko and Kram, Tom and others (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282):747.
- [Riahi *et al.*, 2011] Riahi, K., Rao, S., Krey, V., Cho, C., Chirkov, V., Fischer, G., Kindermann, G., Nakicenovic, N., y Rafaj, P. (2011). Rcp 8.5—a scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change*, 109(1-2):33.
- [Ritchie y Dowlatabadi, 2017] Ritchie, J. y Dowlatabadi, H. (2017). Why do climate change scenarios return to coal? *Energy*, 140:1276–1291.
- [Saavedra y Foppiano, 1992] Saavedra, N. y Foppiano, A. (1992). Monthly mean pressure model for chile. *International Journal of Climatology*, 12(5):469–480.
- [Saha *et al.*, 2010] Saha, Suranjana and Moorthi, Shrinivas and Pan, Hua-Lu and Wu, Xingren and Wang, Jiande and Nadiga, Sudhir and Tripp, Patrick and Kistler, Robert and Woollen, John and Behringer, David and others (2010). The ncep climate forecast system reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(8):1015–1058.
- [Schauwecker *et al.*, 2017] Schauwecker, S., Rohrer, M., Huggel, C., Endries, J., Montoya, N., Neukom, R., Perry, B., Salzmann, N., Schwarb, M., y Suarez, W. (2017). The freezing level in the tropical andes, peru: An indicator for present and future glacier extents. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(10):5172–5189.
- [Taylor *et al.*, 2012] Taylor, K. E., Stouffer, R. J., y Meehl, G. A. (2012). An overview of cmip5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4):485–498.
- [Valenzuela y Garreaud, 2019] Valenzuela, R. A. y Garreaud, R. D. (2019). Extreme daily rainfall in central-southern chile and its relationship with low-level horizontal

water vapor fluxes. *Journal of Hydrometeorology*, (2019).

- [Van Vuuren *et al.*, 2011] Van Vuuren, Detlef P and Edmonds, Jae and Kainuma, Miki-ko and Riahi, Keywan and Thomson, Allison and Hibbard, Kathy and Hurtt, George C and Kram, Tom and Krey, Volker and Lamarque, Jean-Francois and others (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic change*, 109(1-2):5.
- [Viale y Nuñez, 2011] Viale, M. y Nuñez, M. N. (2011). Climatology of winter orographic precipitation over the subtropical central andes and associated synoptic and regional characteristics. *Journal of Hydrometeorology*, 19(2).
- [White *et al.*, 2010] White, A. B., Gottas, D. J., Henkel, A. F., Neiman, P. J., Ralph, F. M., y Gutman, S. I. (2010). Developing a performance measure for snow-level forecasts. *Journal of Hydrometeorology*, 11(3):739–753.
- [Zazulie *et al.*, 2018] Zazulie, N., Rusticucci, M., y Raga, G. B. (2018). Regional climate of the subtropical central andes using high-resolution cmip5 models. part ii: future projections for the twenty-first century. *Climate dynamics*, 51(7-8):2913–2925.
- [Zhu y Newell, 1998] Zhu, Y. y Newell, R. E. (1998). A proposed algorithm for moisture fluxes from atmospheric rivers. *Monthly weather review*, 126(3):725–735.

Capítulo 6

Figuras

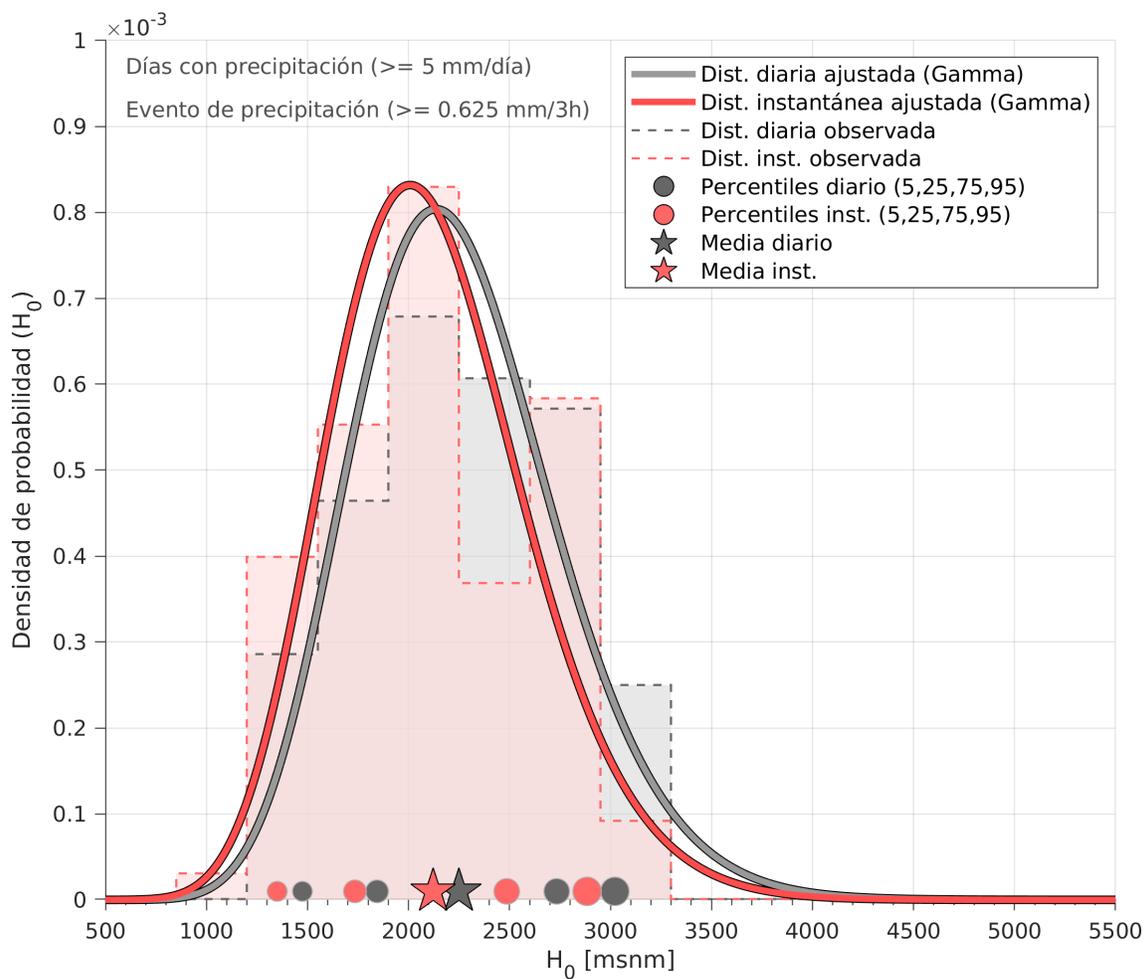


Figura 6.1: Distribución de probabilidad de H_0 observado en Santo Domingo para días y eventos con precipitación en Junio-Julio. En rojo se presenta la distribución con los valores instantáneos de H_0 a las 1200UTC y 0000UTC. En gris se presenta la distribución con los promedios diarios de H_0 . Las estrellas representan el promedio de las distribuciones y los círculos los percentiles 5,25,75 y 95.

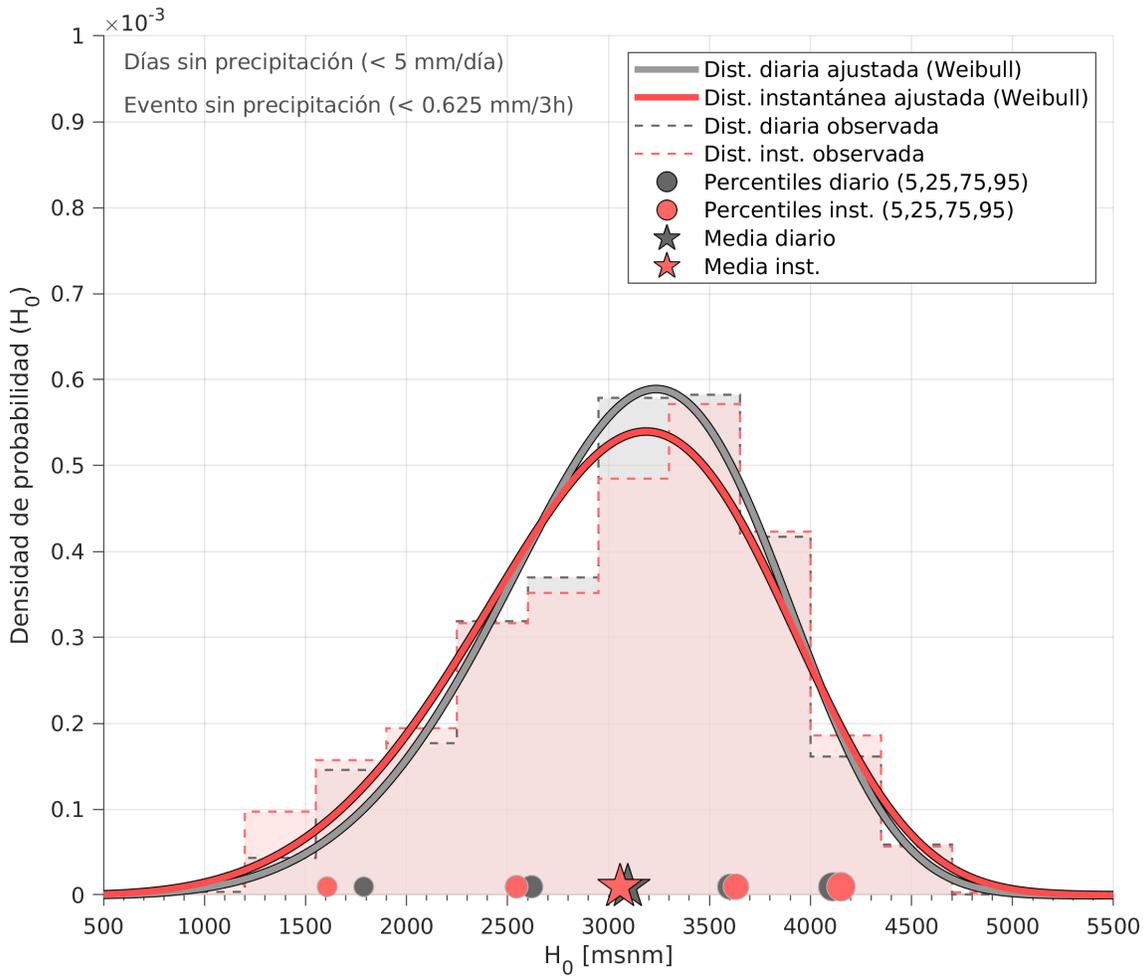


Figura 6.2: Distribución de probabilidad de H_0 observado en Santo Domingo para días y eventos sin precipitación en Junio-Julio. En rojo se presenta la distribución con los valores instantáneos de H_0 a las 12UTC y 00UTC. En gris se presenta la distribución con los promedios diarios de H_0 . Las estrellas representan el promedio de las distribuciones y los círculos los percentiles 5,25,75 y 95.

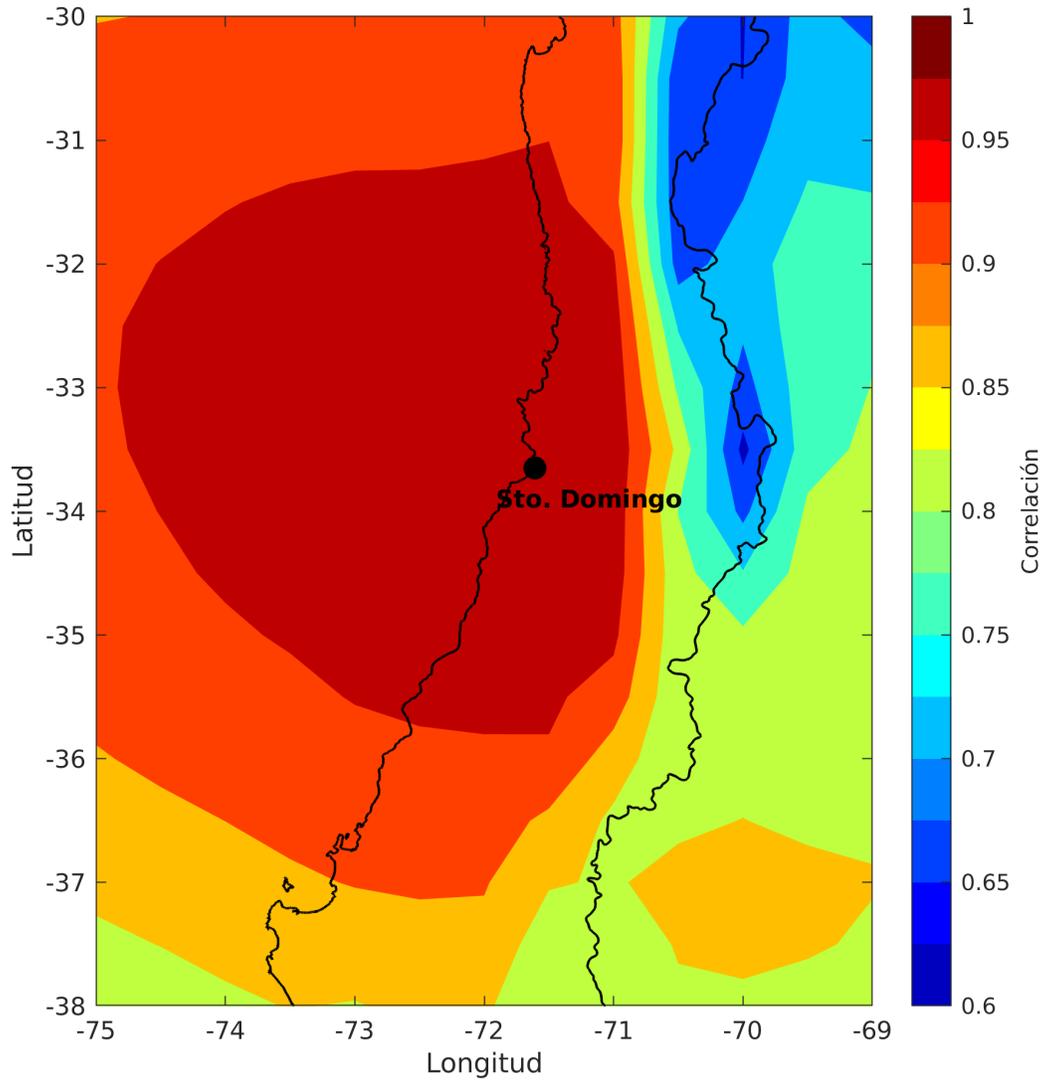


Figura 6.3: Correlación punto a punto entre H_0 observada en Santo Domingo y de CFSR.

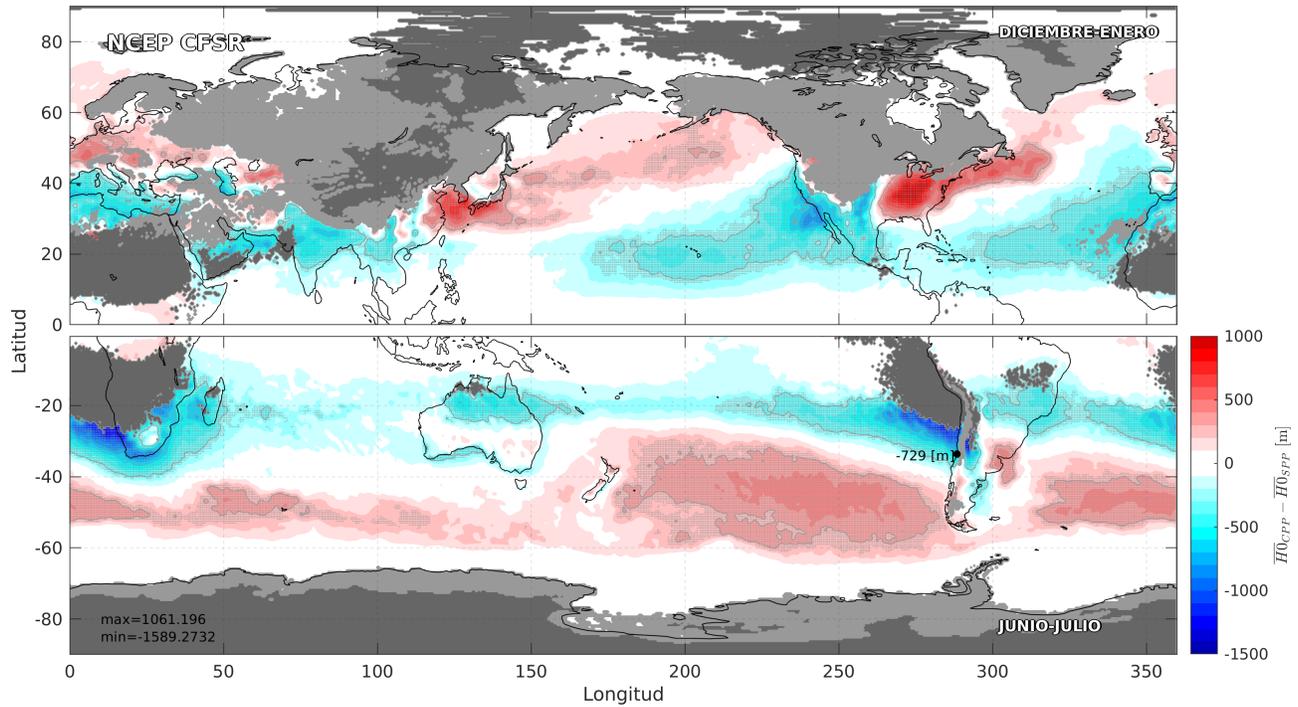


Figura 6.4: Diferencia del $\overline{H_0}$ entre días con y sin precipitación (CPP-SPP durante Diciembre-Enero en el hemisferio norte y Junio-Julio en el hemisferio sur) con CFSR. Las zonas en gris claro representan aquellas donde $\overline{H_0}$ intersecta con la topografía. Las zonas en gris oscuro indican las zonas muy áridas (< 1 vez al año cada 5 años).

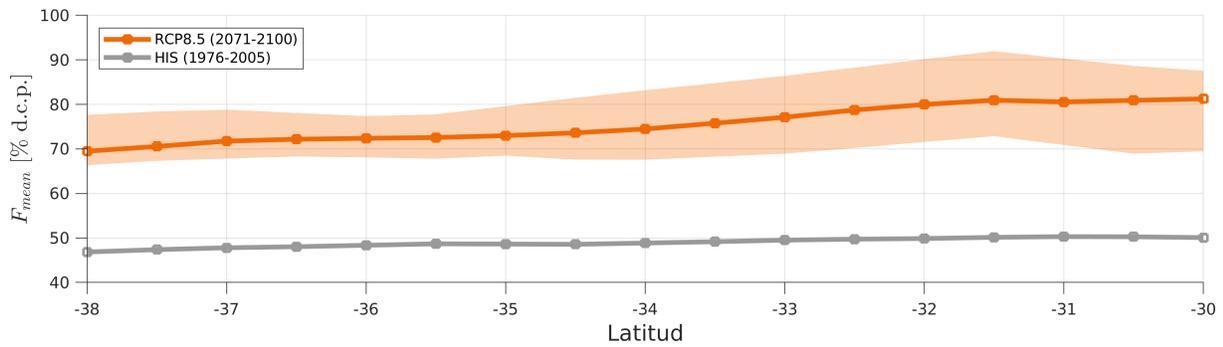


Figura 6.5: Frecuencia de eventos sobre el promedio actual de H_0 (histórico). El área sombreada representa el intervalo (mínimo y máximo) proyectado por los modelos.

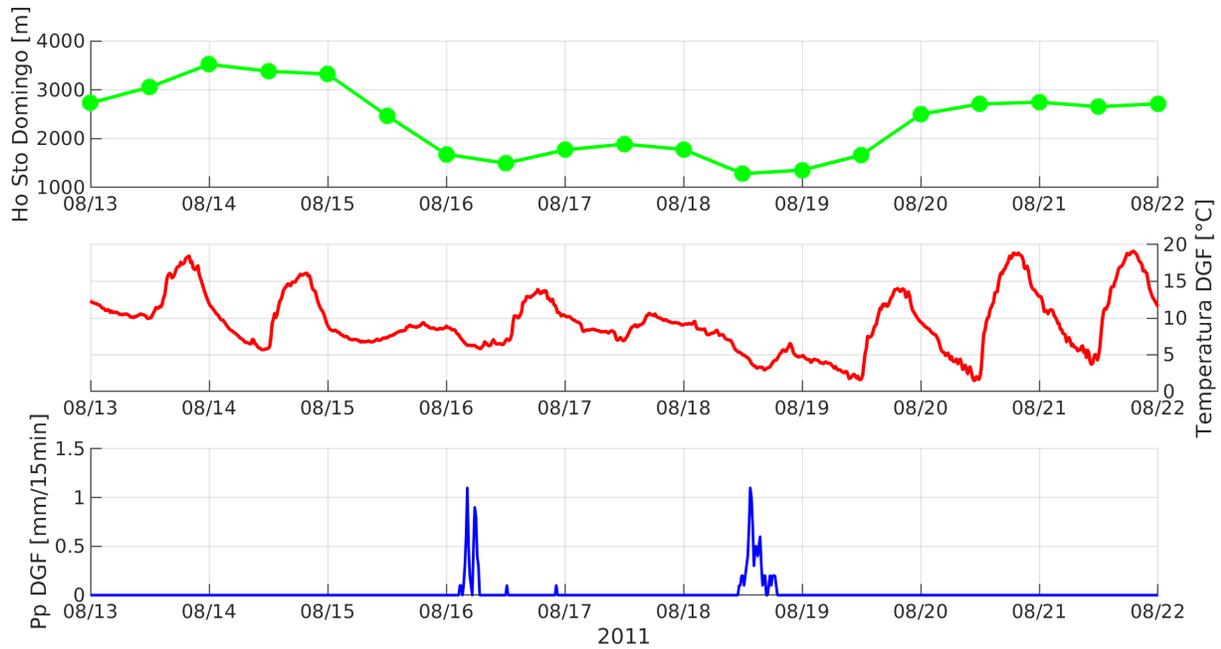


Figura 6.6: H_0 , temperatura y precipitación acumulada durante un evento de lluvia en Santiago.

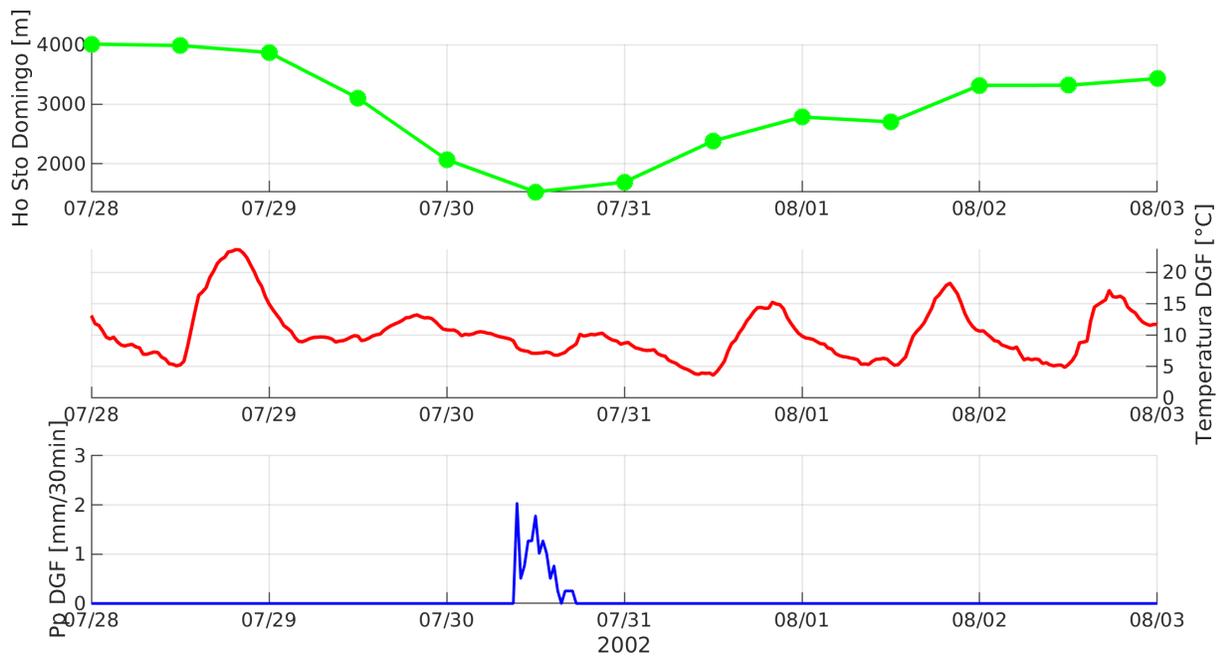


Figura 6.7: H_0 , temperatura y precipitación acumulada durante un evento de lluvia en Santiago.

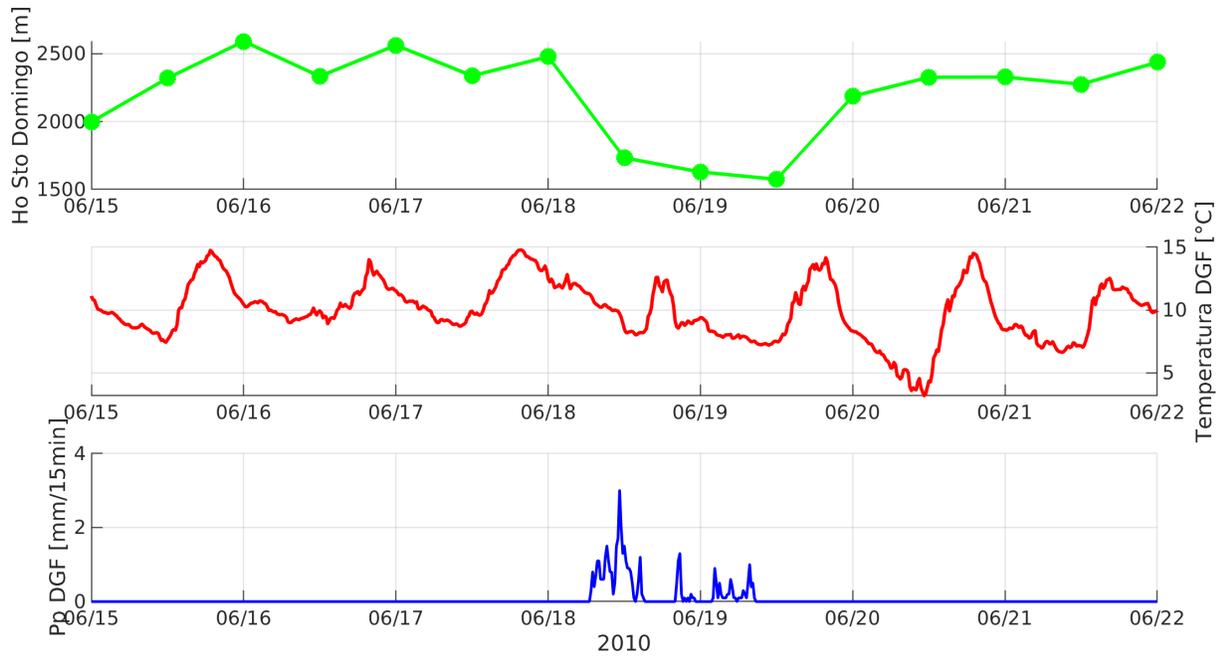


Figura 6.8: H_0 , temperatura y precipitación acumulada durante un evento de lluvia en Santiago.

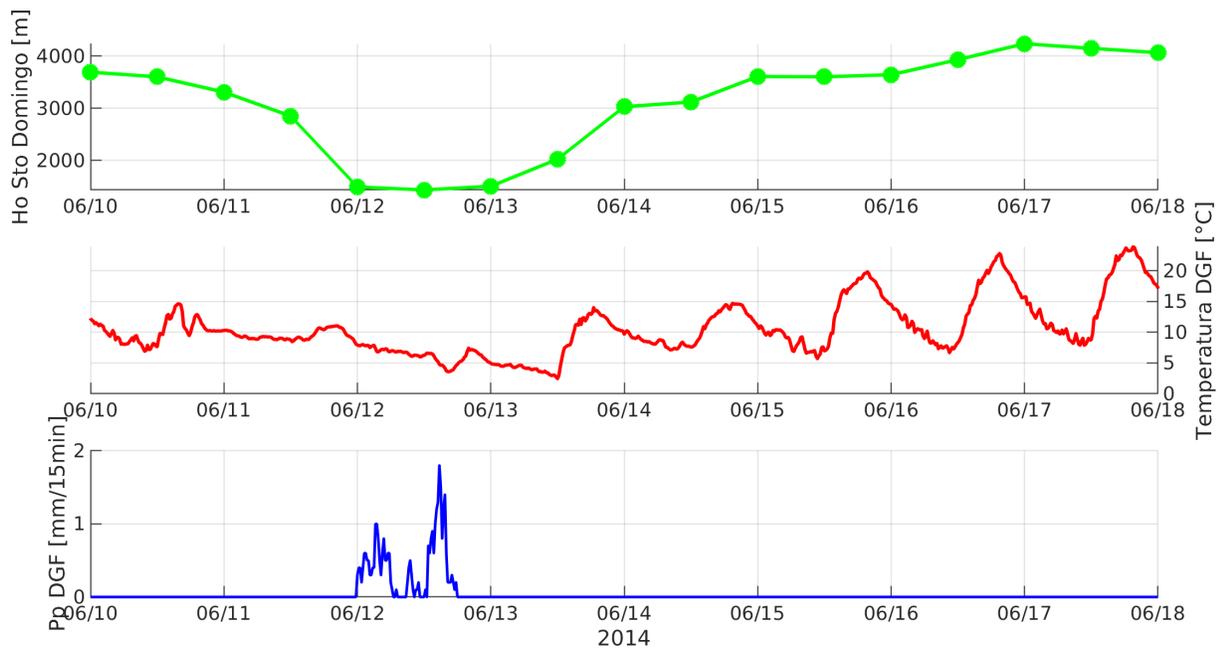


Figura 6.9: H_0 , temperatura y precipitación acumulada durante un evento de lluvia en Santiago.

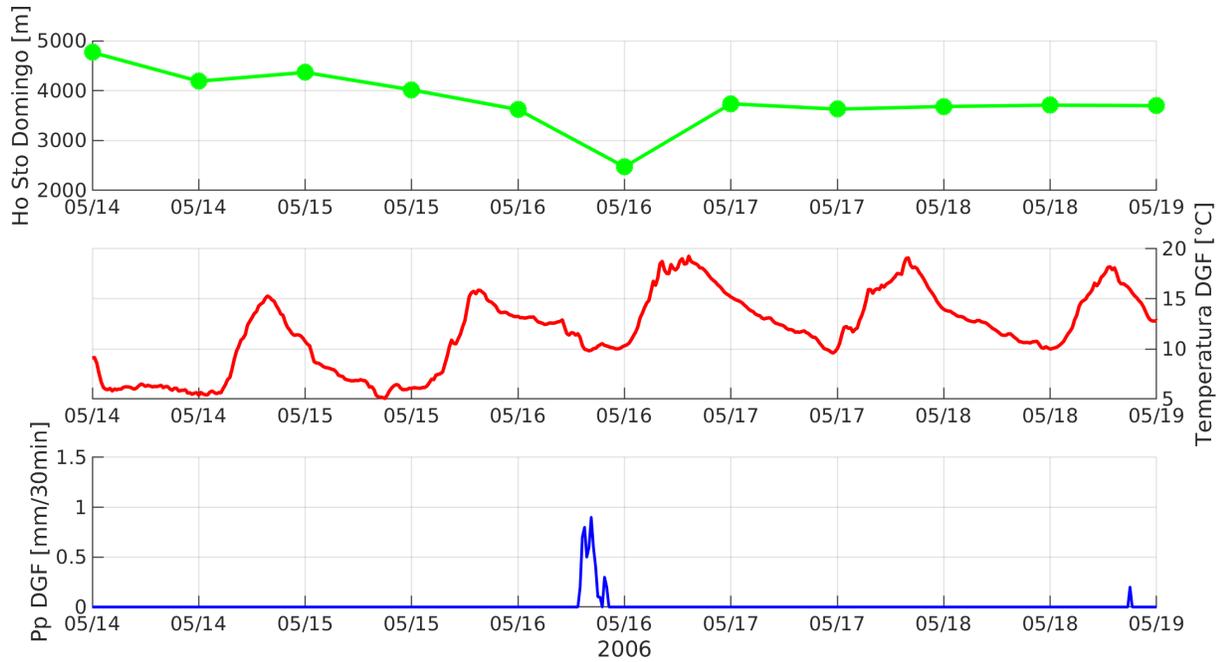


Figura 6.10: H_0 , temperatura y precipitación acumulada durante un evento de lluvia en Santiago.

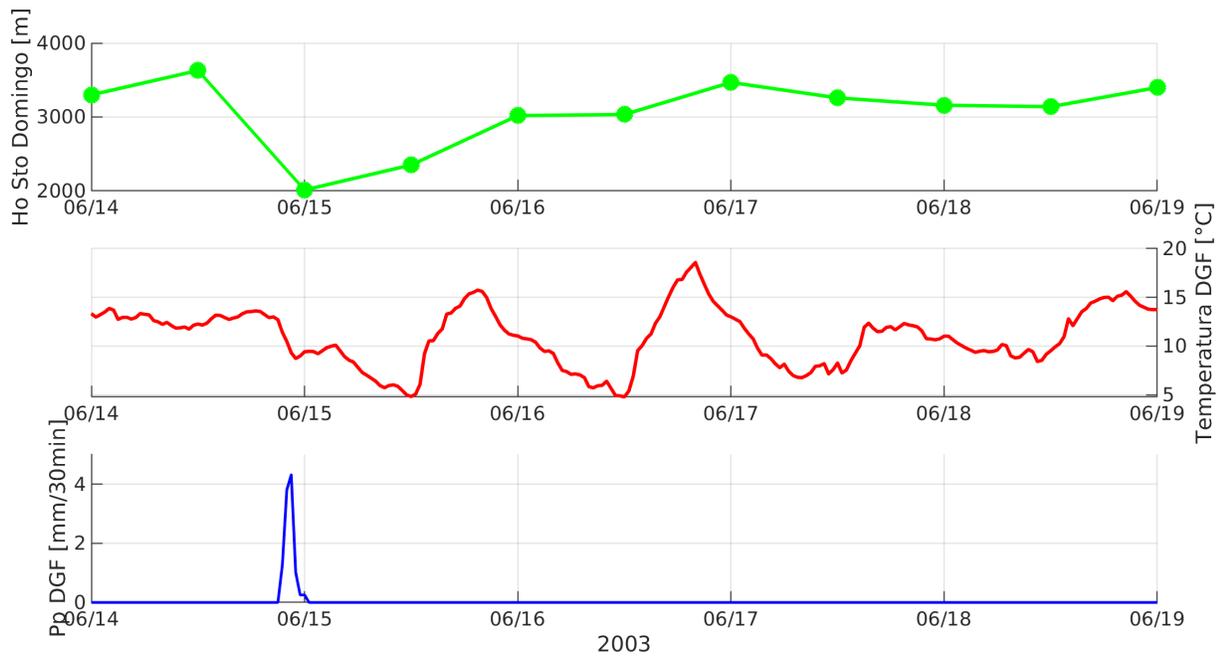


Figura 6.11: H_0 , temperatura y precipitación acumulada durante un evento de lluvia en Santiago.

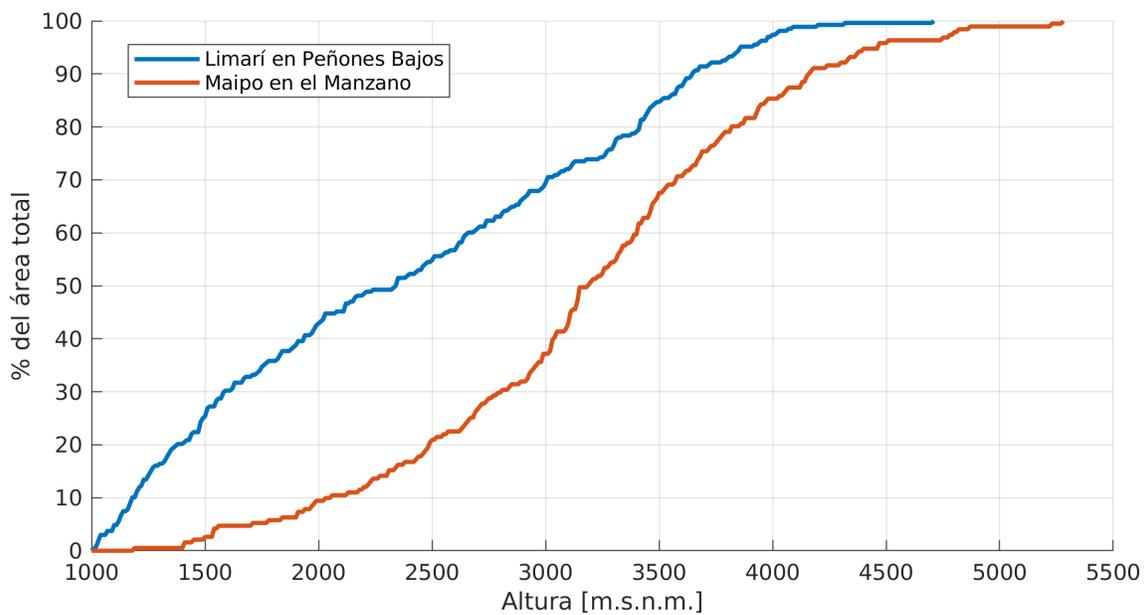


Figura 6.12: Curvas hipsométricas de las cuencas de Limarí en Peñones Bajos (azul) y Maipo en el Manzano (rojo).