

# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA AGRONÓMICA Y DEL MEDIO NATURAL

Máster en Ingeniería de Montes



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



Vicerrectoría de Investigación

**CENTRO DE MODELACIÓN Y  
MONITOREO DE ECOSISTEMAS**

## **Evaluación de las predicciones climáticas de modelos globales en Chile**

Autor: Francisco Javier Gironés Mompó

Tutor UPV: María del Carmen González Sanchis

Tutor UM: Christian Salas Eljatib

Santiago de Chile, septiembre 2019

## **“Evaluación de las predicciones climáticas de modelos globales en Chile”**

### **Resumen**

Las variables climáticas son fundamentales para el entendimiento científico y la toma de decisiones. Sin embargo, los datos climáticos más utilizados a nivel mundial provienen de distintos modelos climáticos globales, el problema es que estos datos no son totalmente reales. Es por lo anterior que el objetivo principal del estudio es evaluar las predicciones climáticas de modelos globales en Chile.

Para esto, se compararán las predicciones de dos grillas climáticas globales de amplio uso en el mundo (WorldClim y Terraclimate) con datos climáticos (in situ) situados a la largo de Chile.

Se realizará un análisis estadístico de las predicciones en un gradiente latitudinal de más de 4200 Km, para determinar patrones de sobre o subestimación de las variables precipitación y temperatura media mensual, así como también de buen comportamiento predictivo.

### **Palabras clave**

Clima, modelos globales, predicciones, precipitación, temperatura, Chile

## **“Evaluation of climate predictions of global models in Chile”**

### **Abstract**

Climatic variables are fundamental for scientific understanding and decision making. However, the climatic data most used worldwide come from different global climate models, the problem is that these data are not totally real. Therefore, the main objective of the study is to evaluate the climate predictions of global models in Chile.

For this, the predictions of two global climatic grids of wide use in the world (WorldClim and Terraclimate) will be compared with climatic data (in situ) located throughout Chile.

A statistical analysis of the predictions will be made in a latitudinal gradient of more than 4200 km, to determine patterns of over or underestimation of the variables precipitation and monthly average temperature, as well as good predictive behavior.

### **Keywords**

Climate, global models, predictions, precipitation, temperature, Chile

## DEDICATORIAS Y AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realiza a partir del deseo por conocer un nuevo país, una nueva cultura, una nueva ciudad y universidad, todo ello gracias a la beca Promoe. Todo este proyecto de estudio se inicia en la Universidad Mayor, en el centro de modelación y monitoreo de ecosistemas, en la capital del país, Santiago de Chile.

Gracias a todas las personas que me han apoyado a seguir en mis estudios, por supuesto a mi familia que me ha ayudado a convertirme en la persona que soy en la actualidad.

Agradecer a mi tutor de TFM y director del CEM, Christian Salas Eljatib, a Francisco Zambrano y Cynnamon Dobbs profesores e investigadores de la Universidad Mayor, por sus aportaciones y recomendaciones que me ayudaron a la hora de encaminar y realizar el trabajo.

Muchos gracias a mis compañeros de trabajo en el CEM, Tomas Cayul y en especial a Joaquín Riquelme, que mas que un compañero ya es un amigo.

# ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN .....	5
1.1. Cambio climático .....	5
1.2. Riesgos a nivel nacional .....	6
1.3. Problemática .....	6
1.4. Objetivo.....	7
1.5. Modelos Climáticos Globales.....	7
1.6. Estudios de Evaluación de Modelos Climáticos Globales .....	9
2. ÁREA DE ESTUDIO .....	10
2.1. Situación y Geografía .....	10
2.2. División Político-administrativa .....	11
2.3. Diversidad Climática .....	11
2.3.1.Tendencias climáticas observadas .....	12
2.3.2.Clasificación climática .....	13
2.4. Diversidad Territorial .....	14
2.5. Demografía .....	15
3. Materiales y métodos .....	17
3.1. Datos .....	17
3.1.1.Selección de las estaciones meteorológicas .....	17
3.1.2.Preparación y análisis de datos.....	18
3.2. Predicciones modelos climáticos .....	20
3.3. Evaluación de los modelos a escala local.....	21
4. RESULTADOS.....	23
4.1. Número de estaciones .....	23
4.2. Distribución de las estaciones.....	23
4.3. Variables por Modelo y observaciones.....	25
4.4. Evolución temporal.....	29
4.5. Estadísticos de comparación .....	32
5. DISCUSIÓN .....	39
6. CONCLUSIONES.....	41
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	42

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Cambio climático

Los cambios que la sociedad ha realizado sobre el medio ambiente han ocurrido desde el origen mismo de propia humanidad. El clima ha ido variando de distintas maneras desde el inicio de la historia del planeta. Sin embargo, las transformaciones que se han experimentado en el último siglo, tanto en la naturaleza como en el clima, no tienen precedentes por la velocidad con la que ocurren, lo cual pone en riesgo el propio futuro de la sociedad.

El cambio climático es un problema con características únicas, ya que es de naturaleza global, sus mayores impactos serán a largo plazo e implica a procesos naturales (ecológicos y climáticos) y procesos sociales, económicos y políticos a escala mundial.

La evidencia de los efectos del cambio climático a nivel global, son altamente consistentes con el calentamiento observado en décadas recientes a nivel mundial. Los avances en la investigación sobre el calentamiento global han permitido caracterizar la vulnerabilidad a este proceso, en un amplio rango de sistemas ecológicos y humanos y a cambios de mayor magnitud proyectados para el siglo XXI. El cambio esperado en la frecuencia, la intensidad y la persistencia de extremos climáticos, así como el cambio en la variabilidad climática natural (ENOS), son elementos determinantes del impacto y de la vulnerabilidad de los países en el futuro (IPCC, 2001; 2007).

De acuerdo con los reportes del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), los mayores impactos estarán relacionados con cambios en el ciclo hidrológico. Un escenario posible se basa en el hecho de que el fenómeno ENOS sea más frecuente e intenso. Bajo esta suposición es probable que la señal del cambio climático sea una marcada transición entre años con lluvias intensas y periodos con déficit severo de lluvia (IPCC, 2001; 2007; Magaña, 2004).

La precipitación y la temperatura son los parámetros clave para el monitoreo del clima, especialmente para localizar eventos climáticos extremos que afectan a la mayoría de la población. Es probable que el cambio en los patrones de precipitación junto con el aumento sostenido de la temperatura global desde 1880 y los factores antropogénicos debido a las actividades humanas (aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, el cambio en el uso de la tierra, etc.) cambien la frecuencia e intensidad de los desastres naturales en todo el mundo (IPCC, 2013).

Desde que existen las estaciones meteorológicas que registran diariamente distintas variables meteorológicas (temperatura, precipitaciones, humedad...) se pueden realizar estudios relacionados con el clima, para esto se utilizan las series climáticas de datos durante periodos largos (al menos 30 años), estos se han convertido en una fuente fundamental para el estudio del clima.

De hecho, son las series climáticas las que nos permiten valorar mediante cálculos estadísticos el estado climático una localización determinada. Además, comparando distintas series climáticas se ha podido avanzar en el estudio de la evolución del clima, los cambios climáticos y en el conocimiento de los factores climáticos.

## 1.2 Riesgos a nivel nacional

Los riesgos vinculados a la manifestación extrema de los elementos climáticos han pasado a ocupar una parcela importante en los estudios de cambio climático, la actual modelización climática esta señalando que algunas regiones del mundo, entre ellas las situadas en latitudes mediterráneas, podrían verse afectadas por un incremento en la frecuencia de aparición de los fenómenos atmosféricos de rango extraordinario, especialmente los derivados de extremos pluviométricos y extremas sequías, ello puede agravar el grado de riesgo ya existente en los territorios (Olcina Cantos, J. 2009).

En el caso particular del territorio de Chile, cabe destacar que en la actualidad se encuentra inmersa en uno de los fenómenos atmosféricos más extremos que existen, una mega sequía en la zona central del país que ya llevan soportando casi una década, con una disminución promedio de las precipitaciones entre un 20 y un 40%. (Garreaud, René D., et al.2019)

Por lo tanto, se puede mencionar que en Chile los problemas relacionados con la incertidumbre que pueden aportar los distintos modelos pueden llegar a ser de mayor índole, debido a la escasez de datos climáticos de las estaciones meteorológicas y de la gran variabilidad climática que se existe en el país, y al gran cambio climático en el que se encuentra lo que a priori puede parecer que aportara mayor error en sus predicciones respecto a otros países.

## 1.3 Problemática

El trabajo realizado pretende dar soluciones respecto a un problema a nivel mundial, el mal uso de las predicciones climáticas de modelos globales, estas predicciones son un auténtico desafío en muchas partes del mundo, que a menudo tienen un número limitado de estaciones meteorológicas y / o registros de datos históricos.

Debido a la creciente demanda de información climática espacial de alta resolución por parte de investigadores ha llevado a la creación de varios productos de datos de clima histórico cuadrículado (GHC). Estos productos están disponibles gratuitamente y se incorporan fácilmente en los sistemas de información geográfica (SIG) y se están utilizando ampliamente para mapear y estimar las condiciones climáticas a escalas local y regional.

Existen algunos problemas con el uso de este tipo de productos GHC, los usuarios básicos de este tipo de productos pueden desconocer la incertidumbre asociada a estos productos, estos son salidas de modelos que generalmente tiene una incertidumbre creciente a resoluciones más altas, además de que no son uniformes en el espacio o el tiempo (Daly, C, 2006). Aunque estos se generan utilizando técnicas para evaluar la incertidumbre, pocos reciben sus estimaciones de error en la resolución de la cuadrícula (Wang, T, 2012).

En vez de tratar estos productos como salidas del modelo con incertidumbre asociada, parece que muchos usuarios de GHC los tratan como información climática "verdadera", es decir, una variable

independiente medida con precisión, en modelos estadísticos, espaciales y de simulación. Por lo que usar las predicciones de los modelos sin ser validados previamente, puede ser debido a que los investigadores que lo emplean no tienen conocimiento sustancial acerca de los patrones espaciales del clima y asumen como cierto las superficies de datos climáticos que el modelo ofrece. Por tanto, podrían tener errores graves en la interpretación de sus resultados, en sus conclusiones y en las decisiones que tomen a partir de ellos.

Muchos de los estudios que utilizan modelos climáticos globales, usan las predicciones climáticas que estos aportan como confiables, pero realmente no se sabe la incertidumbre de estos y además existen muy pocos estudios que hayan comparado estos modelos con los datos históricos de estaciones climatológicas a nivel de Chile.

#### **1.4 Objetivo**

El presente trabajo tiene como objetivo principal desarrollar una comparación estadística de datos históricos de estaciones climatológicas con las predicciones de los modelos globales a lo largo de Chile, para evaluar la precisión, la exactitud y la aplicabilidad de estos modelos en el país.

Además del objetivo principal, en este estudio se van a realizar otros estudios más específicos como:

- Un análisis predictivo de las tres variables sobre las cuales se va a realizar el estudio, precipitación media mensual, temperatura máxima media mensual y temperatura mínima media mensual.
- Un análisis de la evolución temporal de las tres variables desde el 1970 hasta los datos más actuales.
- Una comparación de los resultados obtenidos divididos por zonas climáticas según la clasificación climática actualizada de Köppen-Geiger (Sarricolea, P, et al. 2017).

#### **1.5 Modelos Climáticos Globales**

Son modelo de tipo matemático basados en ecuaciones que sirven para describir el comportamiento de los factores que impactan sobre el clima, estos factores incluyen la dinámica de la atmósfera, océanos, superficie de la Tierra, seres vivos, hielo marino, y energía del Sol.

Los modelos climáticos globales son la mejor herramienta para proyectar escenarios probables de alteraciones climáticas, permitiendo que se simulen probables escenarios de evolución del clima, estos desarrollan representaciones matemáticas del sistema climático, la factibilidad de estos modelos depende de que tan acertadas hayan sido sus hipótesis y que tan adecuadas las herramientas científicas y de cálculo que se usaron.

Estos modelos han ido progresando a lo largo de los últimos años, al desarrollarse la ciencia en la que se basan, aumentan y mejorarse la base de datos sobre la que se respaldan e incrementar las herramientas de cálculo que emplean. Todo ello ha proporcionado incluir un mayor número de factores climáticos y mejorar la malla espacial sobre la que se hacen los cálculos.

Los modelos que van a ser objeto de estudio en este trabajo para posteriormente realizar las comparaciones oportunas son:

- **TerraClimate**

Es una plataforma que proporciona predicciones de clima mensual y balance hídrico climático para superficies terrestres globales desde 1958-2017. Utiliza la interpolación asistida por el clima, combinando las normales climatológicas de alta resolución espacial del conjunto de predicciones de WordClim, con datos de otras fuentes (Unidad de Investigación del Clima versión 4.0 (CRU Ts4.0), el Reanalysis japonés de 55 años (JRA55), GHCN, SNOTEL, RAWS Y FLUXNET) para producir un conjunto de predicciones mensuales de precipitación, temperatura máxima y mínima, velocidad del viento, presión de vapor y radiación solar (Abatzoglou et al., 2018).

Estas predicciones son importantes para estudios ecológicos e hidrológicos a escala global que requieren una alta resolución espacial y datos de balance climático y clima que varía en el tiempo.

Las predicciones tienen una resolución temporal mensual y una resolución espacial de 2,5 minutos de arco (4 km<sup>2</sup>). Las variables primarias incluidas son temperatura máxima y mínima, presión de vapor, acumulación de precipitación, radiación de onda corta de superficie descendente, velocidad del viento, además de muchas otras variables secundarias.

- **WordClim Versión 2.0**

Es otra plataforma que provee acceso a predicciones climáticas globales para modelos ecológicos y sistemas de información geográfica (GIS). Las capas se generaron mediante la interpolación de las predicciones climáticas mensuales promedio utilizando datos de entrada de una gran variedad de fuentes (GHCN, FAOCLIM 2.0, OMM, CIAT, R-HYDRONET, GSOD, LST, SRTM, GTOPO30).

La resolución espacial es de 30 segundos de arco, esto es equivalente a aproximadamente 0,86 km<sup>2</sup> en el ecuador y comúnmente se conoce como resolución espacial de 1 km<sup>2</sup>). Incluyen la temperatura mensual (mínima, máxima y media), precipitación, radiación solar, presión de vapor, velocidad del viento y 19 más variables bioclimáticas, agregadas en un rango temporal objetivo de 1970–2000, utilizando datos de entre 9000 y 60 000 estaciones meteorológicas (E. Fick, S. y J.Hijmans, R, 2017).



Diferencias entre ambos modelos Climáticos Globales:

Modelo	Fuentes de datos	Resolución espacial	VARIABLES	Periodo
WordClim	GHCN, OMM, FAOCLIM2.0, CIAT, ECAm, GSOD, LST, MOD09GA, SRTM, GTOPO 30	30 segundos de arco (0,86 km <sup>2</sup> )	Temperatura mensual (mínima, máxima y promedio), precipitación, radiación solar, presión vapor, velocidad del viento	1970-2000
Terraclimate	WordClim, Unidad de Investigación del Clima versión 4.0 (CRU Ts4.0), Reanalysis japonés de 55 años (JRA-55), GHCN, SNOTEL, RAWS y FLUXNET	2,5 minutos de arco (4 km <sup>2</sup> )	<p>Primarias</p> <p>Precipitación, temperatura máxima y mínima, velocidad del viento, presión de vapor, radiación solar</p> <p>Secundarias</p> <p>Evapotranspiración de referencia, escorrentía, evapotranspiración real, humedad del suelo, agua nieve equivalente, etc....</p>	1958-2015

## 1.6 Estudios de Evaluación de Modelos Climáticos Globales

Existen numerosos estudios en los que se evalúan este tipo de modelos climáticos en muchos países a lo largo del globo, los cuales pueden servir para ver como de diferentes son las predicciones aportadas y los errores que estas ocupan.

Algunos ejemplos en este tipo de evaluaciones son, (Bishop DA, & Beier CM. 2013) realizado en Estados Unidos, (Fernández, G., & Milla, D. 2018) en Venezuela, (OU, Tinghai, et al.2013) en China, (SU, Fengge, et al.2013) en Asia, (Perkins, S. E., et al. 2007) en Australia, (Zambrano et al. 2017) en Chile y (Soria-Auza et al,2010) en Bolivia.

Estos solo son unos pocos ejemplos de la totalidad de trabajos en los cuales se utilizan estos modelos climáticos en multitud de temas distintos.

## 2. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio es Chile continental que se extiende desde  $\sim 17^\circ$  S a  $\sim 56^\circ$  S. Chile tiene 16 regiones administrativas (Figura 3).

### 2.1 Situación y Geografía

Chile es un país situado a lo largo de la costa occidental de con sur de Sudamérica, entre la sección más alta de la cordillera de los Andes y el Océano Pacífico. Es uno de los países más largos del mundo con alrededor de 4.300 km de longitud, pero también uno de los más estrechos, con una amplitud promedio de solo 180 km. Goza de una costa de 6.435 km de longitud, además de poseer gran parte de los diversos climas existentes en el planeta. La superficie de Chile (continental, antártico e insular) es de 2.006.096 km<sup>2</sup>.



Figura 1: Situación Chile en Sudamérica



Figura 2: Ciudades importantes de Chile

Se puede dividir por tres zonas geográficas, en las que encontramos:

- **Chile continental**, comprende una franja en la costa occidental del Cono Sur que se extiende desde la ribera sudoriental del océano Pacífico hasta las cumbres más altas de la cordillera de los Andes.

Alcanza una longitud de 4.270 km, un ancho máximo de 445 km y un ancho mínimo de 90 km. Limita con Perú al norte, Bolivia al nordeste y Argentina al este.

- **Chile insular**, que corresponde a un conjunto de islas de origen volcánico en el océano Pacífico Sur: el archipiélago de Juan Fernández y las islas Desventuradas, pertenecientes a Sudamérica; la isla Salas y Gómez; y la isla de Pascua, ubicadas en Oceanía.
- **Territorio Chileno Antártico**, la cual es una zona de la Antártica de 1.250.257,6 km<sup>2</sup> entre los meridianos 53° O y 90° O sobre la cual Chile reclama soberanía, prolongando su límite meridional hasta el Polo Sur.

## 2.2 División Político-administrativa

Para el cumplimiento de los objetivos de gobierno y administración, el país se divide en dieciséis unidades territoriales menores llamadas Regiones, su capital se encuentra situada en la Región Metropolitana de Santiago, siendo ésta Santiago de Chile (Figura 3).

Las regiones se dividen, a su vez, en provincias y éstas finalmente se dividen en comunas.



Figura 3. División político-administrativa de Chile

## 2.3 Diversidad Climática

Chile se caracteriza por la existencia y manifestación de una extensa variedad de climas que se ven alterados por numerosos factores ambientales, imprimiéndole características muy peculiares a la climatología del país. A lo largo del país se distinguen tres tipos de distribución en el año.

**La zona altiplánica del Norte** (con altitudes que exceden los 3000 m) se dan precipitaciones modestas (algunos centenares de mm al año) concentradas en verano, pero en cotas inferiores domina una extrema aridez desde el límite norte del país hasta los 27°S. Los climas son cálidos y secos, hay lugares donde jamás se han registrado lluvias, como en el Desierto de Atacama, y otros donde las esporádicas lluvias que caen en el invierno dan origen a una explosión de flores en primavera, conocido como "Desierto Florido". En el altiplano, la temperatura cae por debajo de los

0°C de noche, incluso en verano. Además, ocurre un fenómeno denominado "Invierno Boliviano", con ocasionales tormentas de lluvia y granizo.

**En la zona central y centro-sur** presenta un ciclo anual bien delimitado, propio de un régimen mediterráneo, que se manifiesta con un máximo invernal y un periodo estival con un aporte menor que va en aumento hacia el sur, abarca desde los 30°S hasta los 40°S aproximadamente. En estos lugares los veranos son secos y cálidos y los inviernos lluviosos y fríos, excepto en las altas cimas de la cordillera de los Andes, donde el clima es frío debido a la altura

**La zona austral**, que se desarrolla al oeste de las cumbres andinas se particulariza por una precipitación abundante en todos los meses del año, en la ladera oriental los aportes disminuyen en un orden de magnitud. El clima es estepárico frío, caracterizado por una gran amplitud térmica, bajas temperaturas y una mayor pluviosidad en verano. En los territorios Antárticos el clima predominante es el polar.

### **2.3.1 Tendencias climáticas observadas**

En este apartado se explican los resultados obtenidos en numerosos estudios relacionados con la evolución del cambio climático en Chile durante las últimas décadas. Estos relatan principalmente al régimen de precipitación (Aceituno et al., 1992; Quintana, 2004; Quintana y Aceituno, 2006), temperatura media a nivel de superficie (Aceituno et al., 1992; Rosenbluth et al., 1997), temperaturas máxima y mínima diaria (Rosenbluth et al., 1997; Boisier y Aceituno, 2006).

#### **Precipitación**

La Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) y el Departamento de la Universidad de Chile (DGF) percibieron una disminución importante de la precipitación en la región subtropical (Aceituno et al., 1992). En el estudio (Quintana, 2004) se muestra que la evolución de la precipitación en Chile, al sur de 30°S, está condicionada por una fuerte variabilidad en la escala de tiempo decadal, la cual se vincula a cambios en esa misma escala en la Oscilación del Sur, así como en las condiciones atmosféricas y oceánicas en toda la cuenca del Pacífico.

En la región entre 30°S y 39°S se aprecia el predominio de una tendencia negativa hasta aproximadamente 1970. El cambio a inviernos relativamente lluviosos en las décadas posteriores contribuyó a revertir la tendencia decreciente en esta región, estableciéndose una tendencia positiva que alcanzó su mayor intensidad hasta 1985.

La evolución de las precipitaciones en la región centro-sur y austral del país ha sido muy distinta, con una tendencia positiva en esta región hasta mediados de los años setenta, para dar paso en las últimas décadas a una tendencia negativa que se ha mantenido hasta ahora (Quintana y Aceituno, 2006).

En el periodo 1970 – 2000, la precipitación se mantuvo aproximadamente estacionaria en las regiones IV, V y Metropolitana (30°S – 33°S). Mas hacia el sur se aprecia la existencia de una tendencia negativa, particularmente bien definida entre las regiones VIII y XI (39°S - 45°S).

## Temperatura

Diversos estudios realizados a lo largo de la costa de Sudamérica durante la década de 1990 (Aceituno et al., 1992; Rosenbluth et al., 1997), mostraron que a partir de los años 40 estuvo determinado por un régimen térmico relativamente estacionario con excepción de la región centro-sur donde se observó un marcado descenso de la temperatura media.

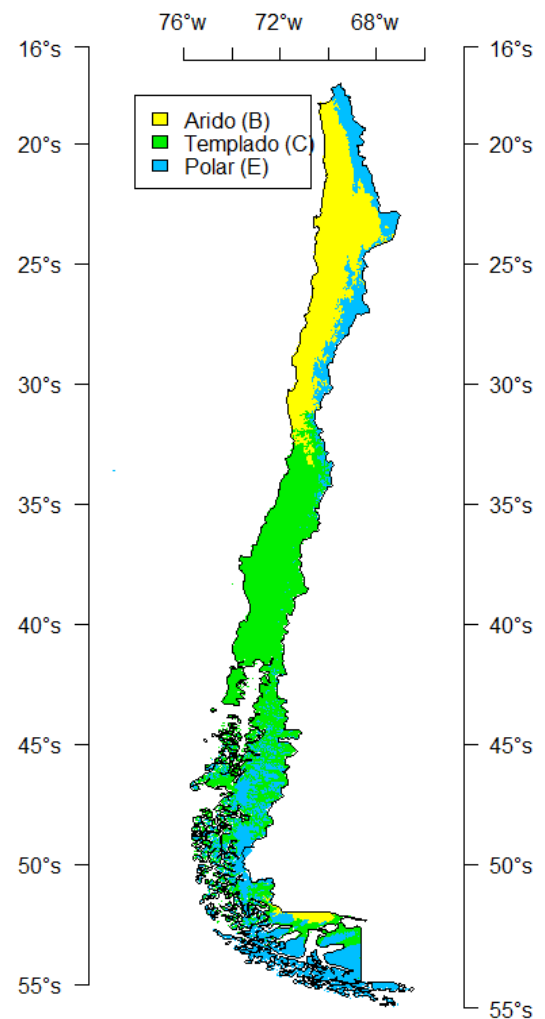
Esta situación fue interrumpida por un aumento relativamente abrupto a mediados de la década de 1970, que se asocia a un cambio de fase de la Oscilación Decadal del Pacífico.

### 2.3.2 Clasificación climática

Según indican los resultados de la clasificación climática actualizada de Köppen-Geiger para Chile continental, los climas son principalmente áridos (B), templados (C) y polares (E), este último debido a la elevación de los Andes.

Los climas predominantes son la alta tundra (ET) y el mediterráneo (Cs). Hemos concluido que el uso de superficies climáticas permite el desarrollo de nuevas clasificaciones e índices en función de la escala. Con respecto a la latitud, los climas del norte de Chile son áridos debido al desierto de Atacama, y los del sur de Chile son templados, desde el mediterráneo hasta la costa oeste marina. (Sarricolea et al., 2017).

La clasificación climática de Köppen-Geiger es una estructura jerárquica de al menos tercer orden. Los grupos de primer orden en cinco tipos de clima que siguen las bandas latitudinales según la temperatura y la disponibilidad de agua son: A (tropical), B (árido), C (templado), D (frío) y E (polar). El segundo criterio climático es de naturaleza pluviométrica. Los climas tropicales incluyen Af (precipitación del mes más seco por encima de 60 mm), Am (para sequía monzónica) y Aw (para climas de sabana). Para los climas C y D, el segundo orden indica una estación seca de verano con una 's' (Cs y Ds), 'w' en invierno (Cw y Dw) y 'f' para climas sin una estación seca (Cf y Df) Para los climas B y E, el segundo orden se capitaliza (W, S, T y F) y clasifica los climas en desierto (BW), semiárido (BS),



Mapa 1: Clasificación climática de Köppen-Geiger

tundra (ET) y capa de hielo (EF). El tercer orden es para criterios térmicos, y se usa en climas B, C y D; Los climas B pueden ser 'h' (cálido) (BWh y BSh) o 'k' (frío) (BWk y BSk); para climas templados, el tercer orden indica condiciones térmicas que son cálidas (a), cálidas (b) o suaves (c); y para climas D, el tercer orden incluye a, b y c, así como una variante fría (d).

A la hora de aplicar este sistema de clasificación climática a nuestro trabajo, se ha optado por realizarlo solo con los tres climas de primer orden (B, C y E), que se distribuyen por la totalidad del país. Como se puede ver en el (Mapa 1) el clima predominante, que se da en el 41% del territorio es el templado (C), seguido por el clima árido (B), que representa el 31% y, finalmente, un 28% para el clima polar (E).

## 2.4 Diversidad Territorial

El estado chileno cuenta con límites geográficos y climáticos, que inician por el norte en el Desierto de Atacama -el desierto más árido del mundo- y finalizan en los fiordos y campos de hielo Antárticos Patagónicos del sur.

Entre estos contrapuntos encontramos los fértiles valles vinícolas y paisajes mediterráneos de la zona central de Santiago, así como los lagos, ríos, volcanes y bosques nativos de la zona centro-sur del país. Debido a esta gran disparidad Chile presenta un relieve conformado por cuatro principales macroformas (Figura 4).

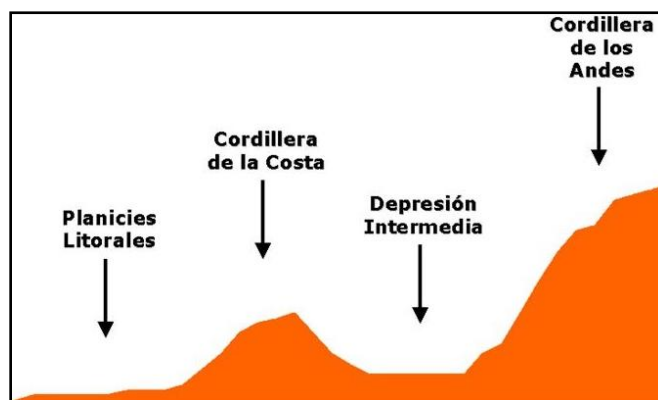


Figura 4: Macroformas Relieve Chileno

### Planicies litorales

Se encuentran entre el Océano Pacífico por el oeste y la Cordillera de la Costa por el este y entre el límite norte del país hasta la isla de Chiloé al sur. Son elevadas, muy estrechas y cortadas por acantilados en el norte, anchas en el Norte Chico, interrumpidas por acantilados en la Zona Central y muy anchas en el sur.

### Cordillera de la costa

Se inicia al sur de Arica. Forma una cadena montañosa alta y continua en el norte, en la Zona Central comienza a disminuir en altitud, para volver a elevarse nuevamente al sur del Biobío. A medida que va avanzando en latitud, comienza a perder homogeneidad como unidad orográfica hasta fundirse en los canales australes.

### Depresión intermedia

Se extiende entre la Cordillera de la Costa por el oeste y la Cordillera de los Andes por el este y desde el extremo norte hasta la región de Los Lagos. Es árida en el norte y más fértil en el área

austral. Su extensión como rasgo continuo facilita el asentamiento de gran parte de la población nacional.

### Cordillera de los Andes

Recorre todo el territorio chileno. Sus características cambian según la zona en la que nos encontremos, en el norte dominan las depresiones salares, donde se encuentra la cima más alta del país, el Nevado Ojos del Salado (6.893 m). Esta cordillera comienza a desmembrarse en el océano originando islas e islotes hasta desaparecer en él, para luego reaparecer en la Antártica con el nombre de Antartandes.

## 2.5 Demografía

Es importante destacar como esta distribuida la población en el país, ya que en los lugares donde existe mayor porcentaje de la población, es más fácil contar con abundantes registros de datos climatológicos históricos, cosa muy importante a la hora de realizar este trabajo. Según el Instituto Nacional de Estadísticas (INE), el último censo nacional de población (2017), confirma que la población total del país asciende a 17.574.003 personas.

- Densidad poblacional

La densidad de población de Chile alcanzó a los 9,0 habitantes por kilómetro cuadrado. La región que concentró mayor cantidad de población del territorio nacional fue la Metropolitana con 7.112.808 habitantes, lo que representa el 40,6% del total del país. Esta misma región, presenta la menor superficie del territorio nacional, razón por la que exhibe la mayor densidad de Chile (474,8 habitantes/km<sup>2</sup>).



Mapa 2: Ciudades más pobladas de Chile

A nivel nacional, las tres regiones con mayor cantidad de habitantes son, Región Metropolitana de Santiago, Región del Biobío y la Región de Valparaíso.

Por el contrario, las regiones con menor cantidad de habitantes son: Aysén, Magallanes y Arica y Parinacota.

Esto indica que alrededor del 63% de la población se concentra en tres regiones, estas se encuentran localizadas en la sección centro-sur del país. Existe una excepción que es la ciudad de Antofagasta, la cual se encuentra al norte del país (Mapa 2).

- Despoblación rural

Del total de la población de Chile, sólo el 12,7% vive en áreas rurales, lo que significa 2.276.604 habitantes. Las regiones que, proporcionalmente, tienen los mayores índices de población rural son Maule con 32,2% y La Araucanía con 31,7%, sobre el total de su población.



### **3. Materiales y métodos**

#### **3.1 Datos**

Para poder llevar a cabo el trabajo académico, lo primero que se realizó fue una búsqueda de las posibles bases de datos climáticas a nivel nacional, estas fuentes de datos se obtuvieron a través de distintas instituciones.

Las bases de datos históricas encontradas con mayor número de información fueron:

- La DGA (Dirección General de Aguas), es la red de estaciones meteorológicas más densa a través de Chile y con los registros históricos más largos también. La red consta de estaciones con observadores, que registran diariamente cada dato. Además, cuenta con un equipo de registro de datos para almacenar datos y transmitirlos a una base de datos central.

- La DMC (Dirección Meteorológica de Chile), es el organismo responsable del quehacer meteorológico en el país, cuyo propósito es satisfacer las necesidades de información y previsión meteorológica de todas las actividades nacionales. Su función es Proporcionar la información meteorológica básica y proveer servicios meteorológicos y climatológicos a las diferentes actividades socioeconómicas que requiere el país para su desarrollo.

- El GHCN (Red global de climatología histórica), es una base de datos integrada de resúmenes climáticos de estaciones terrestres en todo el mundo que han sido sometidos a un conjunto común de revisiones de garantía de calidad. Los datos se obtienen de más de 20 fuentes. Algunos datos tienen más de 175 años, mientras que otros tienen menos de una hora.

Las variables climáticas a utilizar eran las relacionadas con la temperatura y la precipitación, siendo las de mayor interés las medias mensuales de ambas variables, ya que iban a ser más fáciles de comparar con las predicciones aportadas por los modelos globales. De las bases de datos mencionadas anteriormente se desestimó utilizar la del GHCN, ya que los modelos globales con los que se va a realizar la comparación la utilizan como fuente de entrada para la obtención de sus predicciones.

Una vez se obtuvieron las bases de datos, se realizó una inspección de los registros, donde se observó que las estaciones con series climáticas largas y continuas eran las más escasas, y además presentan datos mensuales faltantes. Estas bases de datos fueron descargadas de la base de datos del Centro de Investigación del Clima y Resiliencia (CR2) de la Universidad de Chile (<http://www.cr2.cl>).

##### **3.1.1 Selección de las estaciones meteorológicas**

Se seleccionaron aquellas estaciones que tuviesen registros dentro de los distintos periodos a analizar, que depende de la variable estos son un poco distintos, debido a la diferencia entre los datos.

En el caso de la precipitación, la base de datos consistió en 878 estaciones de todo Chile con datos mensuales de lluvia recolectados entre 1900 y 2019. Se componen de registros de datos consolidados de la DGA y la DMC para su uso en investigación. Del total de 878 estaciones meteorológicas disponibles con datos in situ, 844 de la DGA y 34 de la DMC, finalmente solo se seleccionaron 355 estaciones para su análisis, en este estudio con base en el criterio la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2011), la selección de estaciones meteorológicas debería calcularse solo cuando estén disponibles los valores de al menos un 80% de los años registrados y no falten los valores de más de tres años consecutivos en una misma serie climática, por lo que para este estudio se sigue esta recomendación y además solo se analizaran las estaciones con menos del 10 % de datos faltantes para que los resultados sean lo más cercanos a la realidad posibles.

En el caso de la temperatura, la base de datos se reduce considerablemente aportando datos de 384 estaciones de todo Chile con datos mensuales de temperatura máxima y mínima recolectados entre 1900 y 2017. Del total de 384 estaciones meteorológicas disponibles con datos in situ, 350 de la DGA y 34 de la DMC, finalmente solo se seleccionaron 72 y 73 estaciones respectivamente para su análisis, se siguió el mismo criterio mencionado anteriormente.

La reducción dramática en el número de estaciones que pueden usarse en este análisis ilustra la falta relativa de registros de precipitación y temperatura a largo plazo y temporalmente completos que están disponibles en Chile.

### **3.1.2 Preparación y análisis de datos**

#### **- Cálculo de datos de la precipitación media mensual para cada periodo y estación**

Se partía de los datos observados mensuales de enero de 1970 hasta diciembre del 2018, el primero paso fue reducir el número de las estaciones a 355 estaciones para realizar el análisis de los datos, y el segundo paso fue una división de los datos en tres periodos climáticos: Periodo 1970-2000, Periodo 1980-2010, Periodo 1990-2018.

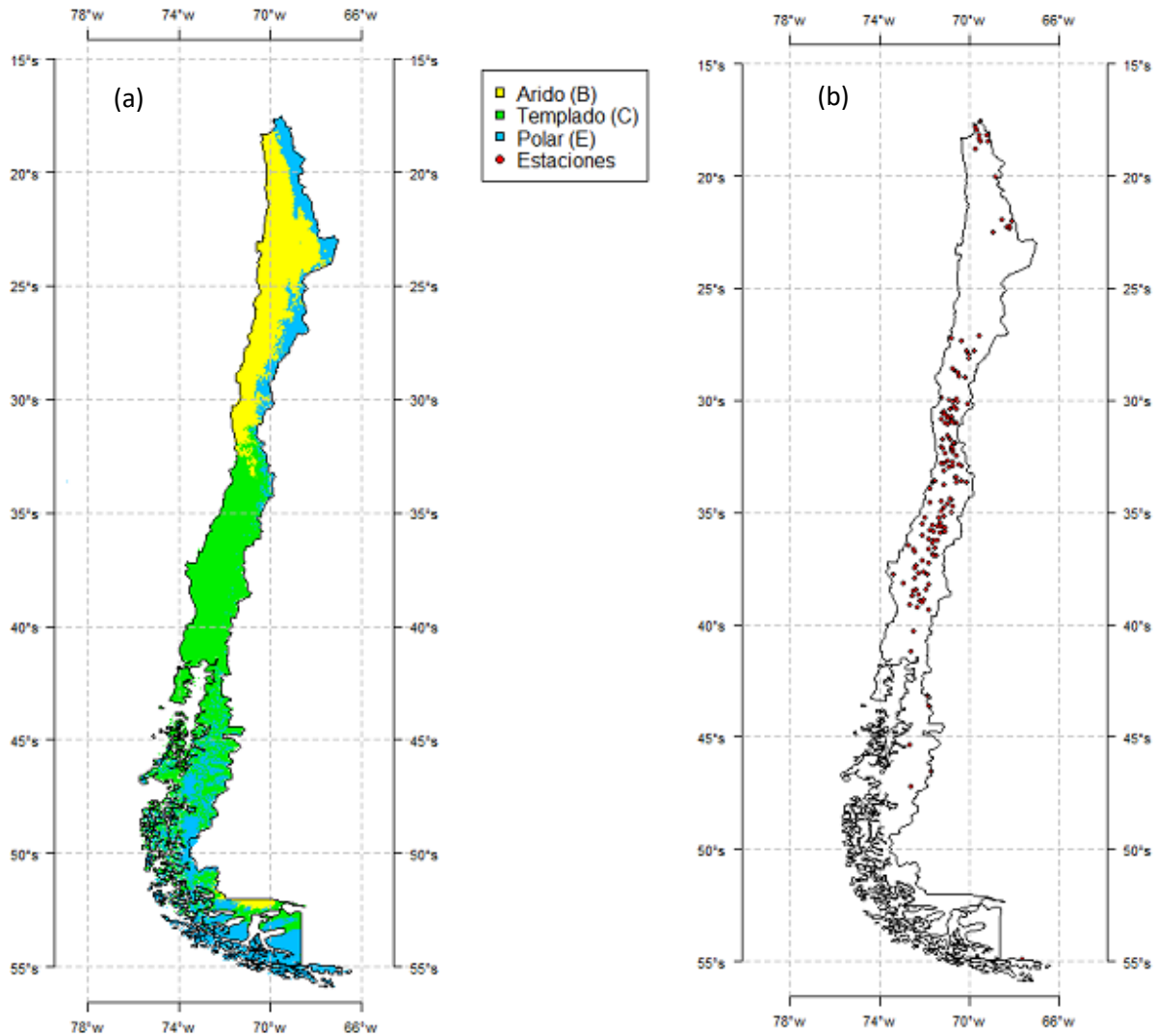


Figura 5. Mapa de clasificación climática de Köppen-Geiger (a), mapa de distribución de estaciones para precipitación en el periodo 1970-2000 con 150 estaciones meteorológicas (b).

Una vez obtenida esta base de datos se calculó la media aritmética mensual, para obtener datos mensuales promedios por cada periodo, obteniéndose 12 datos por periodo y estación para cada una de las variables a analizar.

- **Cálculo de datos de las temperaturas máxima y mínima media mensual para cada periodo y estación**

En este caso también se partía de datos mensuales, pero cambiaban el número de años aportados por la base de datos, ya que en este caso obtuvimos datos desde enero de 1970 hasta diciembre del 2016, se siguieron los mismos pasos que los realizados en la otra variable, obteniendo un número

de 72 y 73 estaciones respectivamente, y 3 periodos climáticos: Periodo 1970-2000, Periodo 1980-2010, Periodo 1990-2016.

### 3.2 Predicciones modelos climáticos

- **Estimación de las predicciones de las variables precipitación media mensual, temperatura máxima y mínima media mensual para los distintos periodos y para cada estación con modelo WorldClim V2.0.**

Se generó una capa de puntos georreferenciados, en donde cada entidad representa cada una de las estaciones seleccionadas. A continuación, se introdujo los 12 archivos en formato ráster generados por el modelo WorldClim V2.0 (cada uno correspondiente a una variable con la predicción media mensual para 1970-2000) disponible en <http://WorldClim.org>.

Mas tarde, mediante la función (extract) se le asignó a cada uno de los puntos georreferenciados los valores que le corresponden según el píxel en donde se sitúa, obteniéndose de esta manera 12 estimaciones para el periodo 1970 -2000 para cada variable y estación.

Este proceso se repitió un total de tres veces, para poder obtener el total de 36 estimaciones, 12 para cada una de las distintas variables mencionadas anteriormente.

Se sabe que WorldClim 2.0 solo aporta predicciones para el periodo climático 1970-2000, pero también se puede observar que se sigue utilizando sus predicciones en multitud de trabajos actuales de diferentes ámbitos, ya sea para mejoras de clasificaciones climáticas (BECK, Hylke E., et al. 2018), sequia (Aadhar, S., & Mishra, V. 2017) , distribución de especies (ELITH\*, Jane, et al. 2006), índices de sitio (Salas-Eljatib, C. 2011), etc.

Por lo tanto, se considero utilizar las predicciones del modelo para los tres periodos descritos anteriormente y ver como se comportan frente a los datos climatológicos actuales.

- **Estimación de las predicciones de las variables precipitación media mensual, temperatura máxima y mínima media mensual para los distintos periodos y para cada estación con el modelo Terraclimate.**

Al igual que con el modelo anterior se generó una capa de puntos georreferenciados, en donde cada entidad representa cada una de las estaciones seleccionadas.

El modelo Terraclimate aporta predicciones desde 1958 hasta 2018 incluido, se introdujeron un total de 732 archivos ráster, 12 por cada uno de los 60 años en los que el modelo aporta sus predicciones, todos estos archivos están disponibles en <http://www.climatologylab.org/terraclimate.html>.

En este caso se tuvo que realizar otro paso más, ya que las estimaciones aportadas por Terraclimate son medias mensuales por año para cada variable, se realizó una media aritmética para obtener una media mensual por periodos y así tener la misma forma en ambos modelos y poderlos comparar más fácilmente.

Este proceso se repitió un total de tres veces, al igual que en el modelo anterior para poder obtener el total de 36 estimaciones, 12 para cada una de las distintas variables mencionadas anteriormente.

Todos estos cálculos se realizaron con el programa R (R Core Team. 2019). Los paquetes más importantes utilizados en el programa fueron “raster” (Robert J. Hijmans. 2019), y “over” (Pebesma, E.J., R.S. Bivand. 2005).

### **3.3 Evaluación de los modelos a escala local**

Probar las predicciones del modelo es un paso crítico en la ciencia. Los diagramas de dispersión de los valores pronosticados frente a los observados (o viceversa) es una de las alternativas más comunes para evaluar las predicciones del modelo.

Sin embargo, no está claro si los modelos deben evaluarse regresando los valores pronosticados en las ordenadas (eje  $y$ ) frente a los valores observados en las abscisas (eje  $x$ ) (PO), o regresando los valores observados en las ordenadas frente a los valores pronosticados en las abscisas (OP).

Para todos los cálculos posteriores de nuestro trabajo serán considerados como variable  $X$  las estimaciones de los modelos y a la variable  $Y$  los datos observados, ya que investigaciones como las de (Piñeiro et al., 2008) han demostrado que la evaluación del modelo basado en regresiones lineales se debe hacer la colocación de los valores observados en el eje  $Y$  y los valores predichos en el eje  $X$  (Observadas vs Predichas.).

La evaluación del modelo basada en la regresión opuesta conduce a estimaciones incorrectas tanto de la pendiente como de la intersección con el eje  $y$ . La subestimación de la pendiente y la sobreestimación de la intersección y aumenta a medida que disminuyen los valores de  $r^2$ .

Los datos se analizaron utilizando gráficos de diagrama de caja y mapas de calor, así como estadísticas resumidas que incluyeron la media, la mediana ( $X$  50%), el primer cuartil ( $X$  25%), tercer cuartil ( $X$  75%) y el valor máximo, para comprobar las diferencias entre los datos observados y las predicciones obtenidas a partir de los modelos.

También se realizó un análisis de la evolución temporal de las distintas variables para sus periodos de estudio, a partir de los datos mensuales aportados por las estaciones se calculó un dato anual

medio, para aportar información del cambio climático que está experimentando el territorio, además de tener la máxima información a la hora de entender los errores de los modelos con las observaciones obtenidas por las estaciones meteorológicas en cada periodo.

Para evaluar y comparar las diferencias entre los modelos se decidió realizar un análisis predictivo, calculando seis estadísticos de exactitud y precisión. Los estadísticos que se calcularon fueron: la diferencia agregada (AD), la diferencia agregada porcentual (AD %), la diferencia absoluta (AAD), la diferencia absoluta porcentual (AAD %), la Desviación de la media cuadrática porcentual (RMSD), la Desviación de la media cuadrática porcentual (RMSD %).

Estadístico	Formula
Diferencia agregada (AD)	$AD = \frac{\sum_{i=1}^n e_i}{n}$
Diferencia agregada (AD%)	$AD \% = \left(\frac{AD}{Y}\right) \times 100$
Diferencia absoluta (AAD)	$AAD = \frac{\sum_{i=1}^n  e_i }{n}$
Diferencia absoluta (AAD%)	$AAD \% = \left(\frac{AAD}{Y}\right) \times 100$
Desviación de la media cuadrática (RMSD)	$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{n}}$
Desviación de la media cuadrática (RMSD%)	$RMSD \% = \left(\frac{RMSD}{Y}\right) \times 100$

Tabla 1. Estadísticos utilizados para evaluar WorldClim y Terraclimate.

Estos estadísticos se calcularon a partir de las diferencias del promedio mensual para cada uno de los periodos entre los datos observados y las predicciones de los modelos. Con estos se pudo medir el nivel de sobreestimación o subestimación que existía entre estos. Para evaluar el comportamiento durante los periodos, los estadísticos se calcularon mensualmente, obteniendo 648 estadísticas (es decir, 12 meses × 3 estadísticos × 2 modelos × 3 variables × 3 climas).

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Número de estaciones

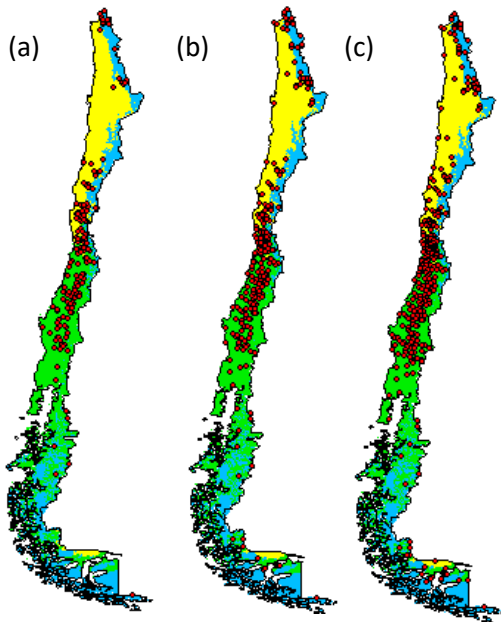
Una vez analizados los registros meteorológicos, se obtuvo el número de estaciones seleccionadas para cada variable y cada periodo, que se incluye en la tabla 2.

Variable	Periodos		
	1970-2000	1980-2010	1990-2018
Precipitación	150	255	320
Variable	Periodos		
	1970-2000	1980-2010	1990-2016
Temperatura mínima	31	57	59
Temperatura máxima	31	58	58

Tabla 2. Numero de estaciones utilizadas para hacer el estudio por variable y periodo.

### 4.2 Distribución de las estaciones

En los siguientes mapas se puede observar las distribuciones de las estaciones de las distintas variables a lo largo de Chile, divididas en los climas de Köppen-Geiger, citados en el Mapa 1. A continuación se observa la distribución de las estaciones de la variable precipitación.



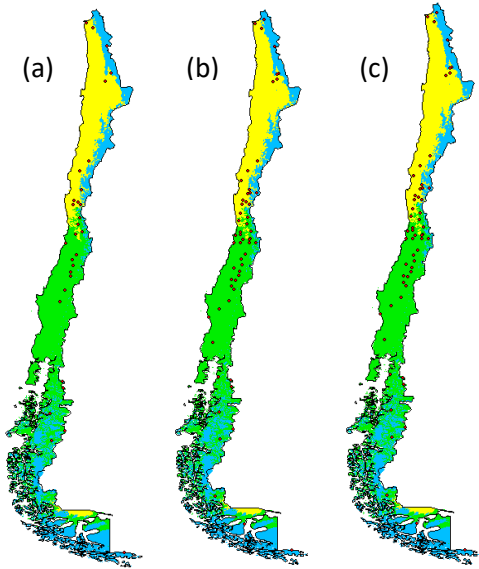
Como se puede observar en el Mapa 3, las estaciones se encuentran en mayor número en la parte central del país que se encuentra situada en clima templado, por lo que el número de estaciones es mayor en este clima.

Periodo	Templado	Polar	Árido	Total
1970-2000	84	12	54	150
1980-2010	134	21	101	255
1990-2018	181	24	116	320

Tabla 3. Número de estaciones de precipitación para los distintos tipos de clima

Mapa 3. Mapa del área de estudio y distribución de las estaciones meteorológicas a lo largo de Chile. (a) Periodo 1970-2000 con 150 estaciones, (b) Periodo 1980-2010 con 255 estaciones, (c) Periodo 1990-2018 con 320 estaciones.

En los siguientes mapas se puede observar las distribuciones de las estaciones de temperatura máxima a lo largo de Chile.



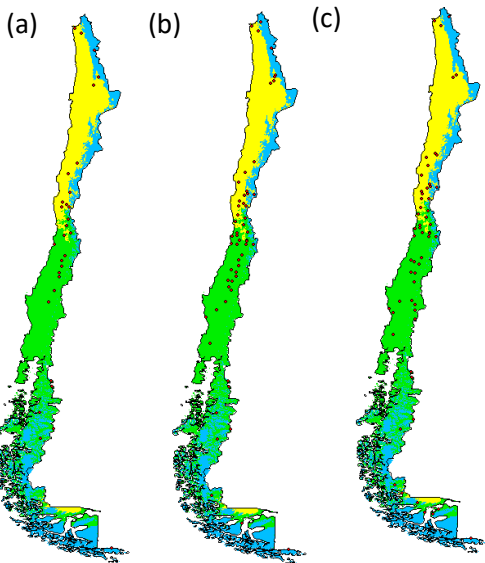
Mapa 4. Mapa del área de estudio y distribución de las estaciones meteorológicas de temperatura máxima. (a) Periodo 1970-2000 con 31 estaciones, (b) Periodo 1980-2010 con 58 estaciones, (c) Periodo 1990-2016 con 58 estaciones.

Como en el caso anterior las estaciones se encuentran en mayor número en la parte central del país por lo que el mayor número corresponde a estaciones situadas en el clima templado.

Periodo	Templado	Polar	Árido	Total
1970-2000	15	3	13	31
1980-2010	32	4	22	58
1990-2016	33	3	22	58

Tabla 4. Número de estaciones de temperatura máxima para los distintos tipos de clima.

Por último, se representan los mapas de las distribuciones de las estaciones de temperatura mínima a lo largo de Chile.



Mapa 5. Mapa del área de estudio y distribución de las estaciones meteorológicas de temperatura mínima. (a) Periodo 1970-2000 con 31 estaciones, (b) Periodo 1980-2010 con 57 estaciones, (c) Periodo 1990-2016 con 59 estaciones.

Periodo	Templado	Polar	Árido	Total
1970-2000	15	3	13	31
1980-2010	31	4	22	57
1990-2016	34	3	22	59

Tabla 5. Número de estaciones de temperatura mínima para los distintos tipos de clima.



### 4.3 Variables por Modelo y observaciones

El resumen de las variables promedio mensuales y la comparación de distribución para las estaciones meteorológicas seleccionadas con las estimaciones aportadas por los modelos se presentan en las Tablas 6, 7 y 9 y Figuras 6 (a, b, c), 7 (a, b, c) y 8 (a, b, c).

- Para la variable precipitación:

Periodo	Clima	Modelo	Media	X25 %	X50 %	X75 %	X max
1	Arido	Terraclimate	11,02	0	2,99	13,00	118,00
1	Arido	WorldClim	10,96	1	3	12,25	118
1	Arido	Observada	12,67	0,48	3,43	15,79	144,67
1	Polar	Terraclimate	25,03	0	3,46	51,00	113,00
1	Polar	WorldClim	25,31	0,75	4	50	115
1	Polar	Observada	23,56	1,68	6,16	40,87	132,94
1	Templado	Terraclimate	89,37	21,01	60,99	135,00	388,01
1	Templado	WorldClim	89,90	21	61	136	421
1	Templado	Observada	102,75	20,40	66,24	150,93	554,78
2	Arido	Terraclimate	11,65	0	2,15	13,66	111,55
2	Arido	WorldClim	11,12	0	2	14	118
2	Arido	Observada	12,67	0,27	2,43	15,64	138,48
2	Polar	Terraclimate	19,87	0	1,72	39,18	103,62
2	Polar	WorldClim	21,11	0	3	40,25	115
2	Polar	Observada	19,33	1,40	4,67	34,30	128,09
2	Templado	Terraclimate	81,32	17,48	53,73	125,57	400,97
2	Templado	WorldClim	82,31	18	54	122,25	421
2	Templado	Observada	90,74	16,56	56,79	134,53	598,94
3	Arido	Terraclimate	10,33	0	2,16	12,71	108,73
3	Arido	WorldClim	10,85	0	2	13	118
3	Arido	Observada	10,99	0,28	2,38	14,16	140,86
3	Polar	Terraclimate	23,15	0	2,49	47,92	109,46
3	Polar	WorldClim	23,79	0	3,50	48	115
3	Polar	Observada	22,22	1,24	4,73	42,83	133,01
3	Templado	Terraclimate	77,31	17,73	51,53	113,57	393,48
3	Templado	WorldClim	82,58	20	53	118	421
3	Templado	Observada	82,71	17,18	50,62	119,10	605,34

Tabla 6. Resumen de datos observados de precipitación en estaciones meteorológicas y predicciones de Terraclimate y WorldClim, dividido en tres zonas climáticas de Chile y para tres periodos de tiempo distintos. Primer cuartil (X 25%), mediana (X 50%), tercer cuartil (X75%) y máximo (X max). Los periodos de tiempo son 1 (1970-2000), 2 (1980-2010), 3 (1990-2018).

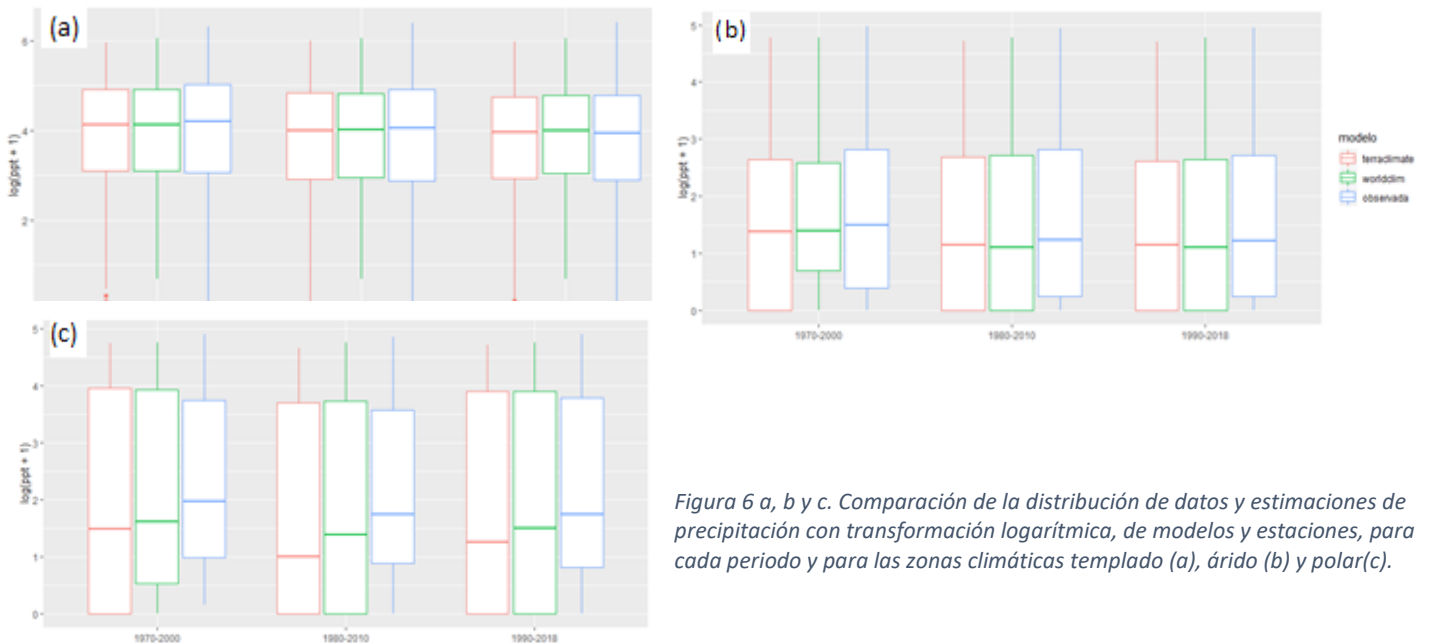


Figura 6 a, b y c. Comparación de la distribución de datos y estimaciones de precipitación con transformación logarítmica, de modelos y estaciones, para cada periodo y para las zonas climáticas templado (a), árido (b) y polar(c).

Los gráficos de caja de la Figura 6 comparan la distribución estadística de datos de lluvia promedios entre los datos observados y las estimaciones de los modelos para las tres zonas climáticas. En general las predicciones de ambos modelos son más bajas que las observadas por las estaciones por lo que se puede decir que los modelos subestiman la precipitación.

En los climas templado (figura 6a) y árido (figura 6b) se observan distribuciones de precipitación similares entre los modelos y las medidas observadas en las estaciones, mientras que en el clima polar (figura 6c), las distribuciones de precipitación se distribuyen de manera muy distinta respecto, a los climas anteriores siendo las diferencias entre estas mayores.

También se puede observar en la Tabla 6, como las medias de precipitación van disminuyendo en cada una de las zonas climáticas a medida que avanzamos en los periodos climáticos.

Respecto a los datos que se observan para el primer cuartil (X 25%), en general se aprecia como en muchos de los casos en las zonas climáticas árido y polar, las estimaciones de los modelos son de 0 mm, cuando el dato observado indica un número positivo de precipitación, aun siendo bajo, por lo que en ese sentido se puede decir que ambos modelos subestiman también en este apartado y respecto a la precipitación máxima en clima templado que es donde mayor cantidad de lluvia se obtiene, existen diferencias de hasta más de 200 mm entre los valores estimados por el modelo y los observados por las estaciones.

-Para temperatura máxima:

Periodo	Clima	Modelo	Media	X25 %	X50 %	X75 %	X max
1	Arido	Terraclimate	19,53	16,58	19,48	22,45	28,37
1	Arido	WorldClim	20,17	17,45	20,20	22,92	27,50
1	Arido	Observada	23,66	20,77	24,03	26,62	31,44
1	Polar	Terraclimate	7,37	2,67	9,41	12,81	16,07
1	Polar	WorldClim	7,99	2,68	8,95	12,83	18,90
1	Polar	Observada	7,84	1,83	9,45	13,38	18,35
1	Templado	Terraclimate	17,97	13,11	17,68	23,18	31,04
1	Templado	WorldClim	17,95	14,10	17,75	22,00	32,20
1	Templado	Observada	18,10	13,83	17,69	22,32	30,68
2	Arido	Terraclimate	19,08	16,22	19,18	22,15	30,85
2	Arido	WorldClim	19,65	17,00	19,95	22,80	29,40
2	Arido	Observada	22,96	20,05	23,14	26,34	31,43
2	Polar	Terraclimate	9,68	4,09	11,96	15,33	18,54
2	Polar	WorldClim	10,31	4,00	11,90	16,85	19,90
2	Polar	Observada	9,66	3,81	12,60	15,50	18,10
2	Templado	Terraclimate	18,19	13,68	17,69	23,34	31,36
2	Templado	WorldClim	18,03	14,17	17,85	22,20	32,20
2	Templado	Observada	18,32	14,23	17,64	22,82	30,73
3	Arido	Terraclimate	19,38	16,57	19,57	22,37	31,22
3	Arido	WorldClim	19,92	17,30	20,15	23,03	29,40
3	Arido	Observada	23,78	21,04	24,30	27,21	31,58
3	Polar	Terraclimate	6,66	2,62	8,14	12,06	13,49
3	Polar	WorldClim	7,25	2,68	8,90	12,10	16,50
3	Polar	Observada	6,44	1,46	8,98	11,68	13,62
3	Templado	Terraclimate	17,24	12,64	16,92	22,13	31,41
3	Templado	WorldClim	16,80	13,00	16,70	20,60	30,90
3	Templado	Observada	17,32	12,68	16,91	21,85	31,91

Tabla 7. Resumen de datos observados de temperatura máxima en estaciones meteorológicas y predicciones de Terraclimate y WorldClim, dividido en tres zonas climáticas de Chile y para tres periodos de tiempo distintos. Primer cuartil (X 25%), mediana (X 50%), tercer cuartil (X75%) y máximo (X max). Los periodos de tiempo son 1 (1970-2000), 2 (1980-2010), 3 (1990-2016).

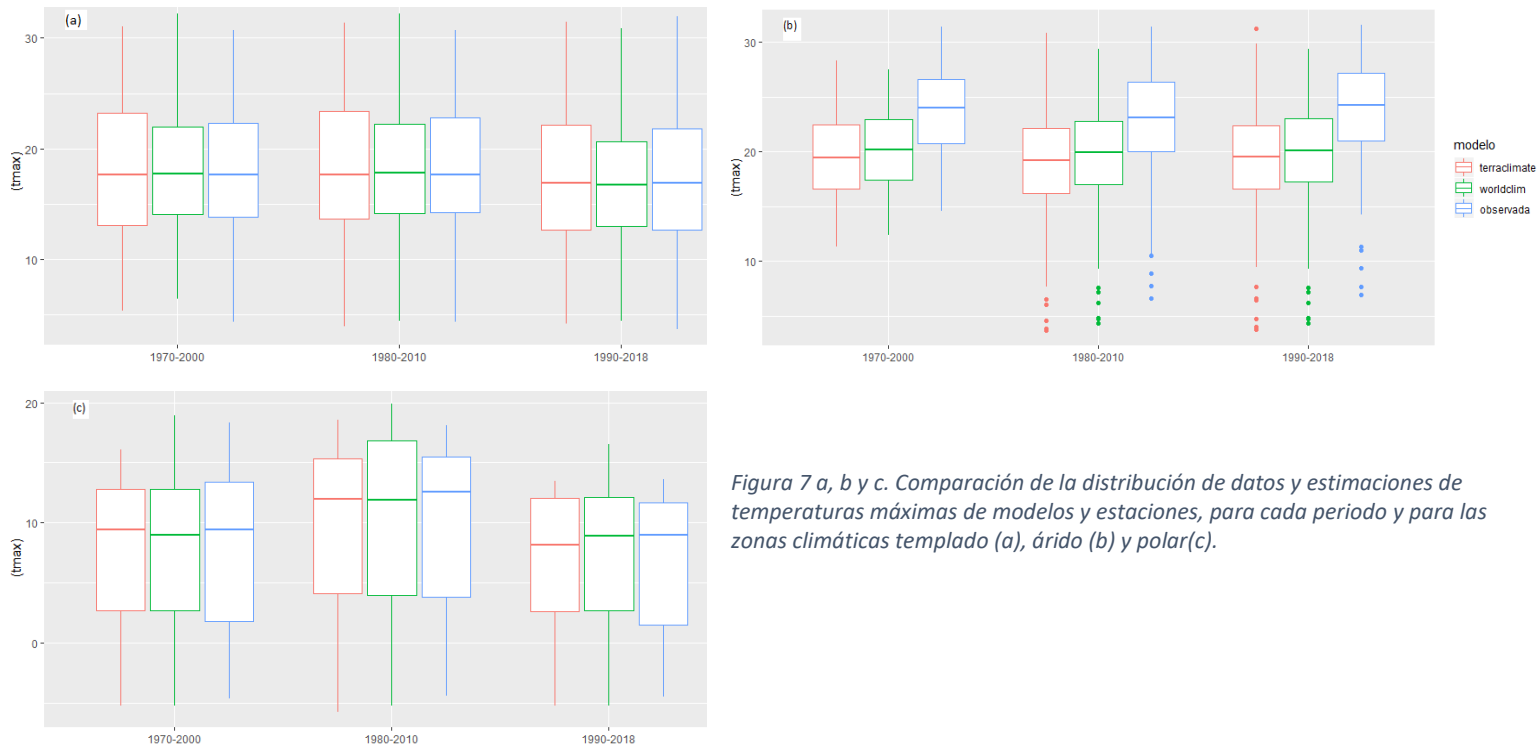


Figura 7 a, b y c. Comparación de la distribución de datos y estimaciones de temperaturas máximas de modelos y estaciones, para cada periodo y para las zonas climáticas templado (a), árido (b) y polar(c).

Los gráficos de caja de la Figura 7 comparan la distribución estadística de datos promedios de temperatura máxima entre los datos observados y las estimaciones de los modelos para las tres zonas climáticas.

En general las predicciones de ambos modelos son más bajas que las observadas por las estaciones por lo que se puede decir que los modelos subestiman la temperatura máxima.

Si miramos más específicamente los resultados por tipo de climas, se puede observar que en el clima árido (figura 7b) se observan las distribuciones más distintas entre los modelos y las medidas observadas en las estaciones, llegando a tener unas diferencias de hasta 3°C, siendo la estimación de WordClim más cercana a la observada que la de TerraClimate.

Respecto a los datos que se observan en la Tabla 7 para las temperaturas máximas (X max), en general se aprecia como las estimaciones del TerraClimate son más cercanas en casi la totalidad de predicciones a las observadas que las aportadas por el WorldClim.

-Para temperatura mínima:

Periodo	Clima	Modelo	Media	X25 %	X50 %	X75 %	X max
1	Arido	terraclimate	6,84	4,14	6,66	9,77	17,18
1	Arido	worldclim	7,32	4,30	7,25	10,40	17,90
1	Arido	Observada	8,90	6,59	9,19	11,96	17,13
1	Polar	Terraclimate	-2,32	-5,49	-2,01	0,32	4,60
1	Polar	WorldClim	-2,67	-6,27	-2,70	-0,58	7,20
1	Polar	Observada	-2,50	-6,62	-1,57	0,49	5,64
1	Templado	Terraclimate	5,95	2,92	5,61	8,92	15,28
1	Templado	WorldClim	6,56	2,30	6,65	10,70	16,30
1	Templado	Observada	5,91	3,53	5,90	8,28	12,52
2	Arido	Terraclimate	6,37	3,58	6,50	9,74	17,41
2	Arido	WorldClim	6,64	3,55	6,60	10,20	17,90
2	Arido	Observada	7,88	5,73	8,39	11,35	17,08
2	Polar	Terraclimate	-1,89	-4,41	-1,69	0,80	4,58
2	Polar	WorldClim	-0,41	-4,72	-1,55	3,03	12,40
2	Polar	Observada	-0,97	-4,92	-0,16	2,78	6,22
2	Templado	Terraclimate	6,34	3,46	6,35	9,25	15,63
2	Templado	WorldClim	6,65	2,77	6,60	10,63	16,30
2	Templado	Observada	6,48	4,35	6,37	8,89	14,03
3	Arido	Terraclimate	7,28	4,49	7,54	10,33	17,56
3	Arido	WorldClim	7,36	4,57	7,35	10,63	17,90
3	Arido	Observada	8,56	6,57	8,67	11,45	17,04
3	Polar	Terraclimate	-3,16	-6,51	-2,34	-0,79	4,54
3	Polar	WorldClim	-1,31	-7,23	-4,20	5,83	12,40
3	Polar	Observada	-1,29	-4,24	-0,88	0,48	6,26
3	Templado	Terraclimate	5,38	2,53	5,28	8,21	15,46
3	Templado	WorldClim	5,78	2,10	5,70	9,60	16,20
3	Templado	Observada	5,52	3,05	5,53	8,13	14,35

Tabla 8. Resumen de datos observados de temperatura mínima en estaciones meteorológicas y predicciones de Terraclimate y WorldClim, dividido en tres zonas climáticas de Chile y para tres periodos de tiempo distintos. Primer cuartil (X 25%), mediana (X 50%), tercer cuartil (X75%) y máximo (X max). Los periodos de tiempo son 1 (1970-2000), 2 (1980-2010), 3 (1990-2016).

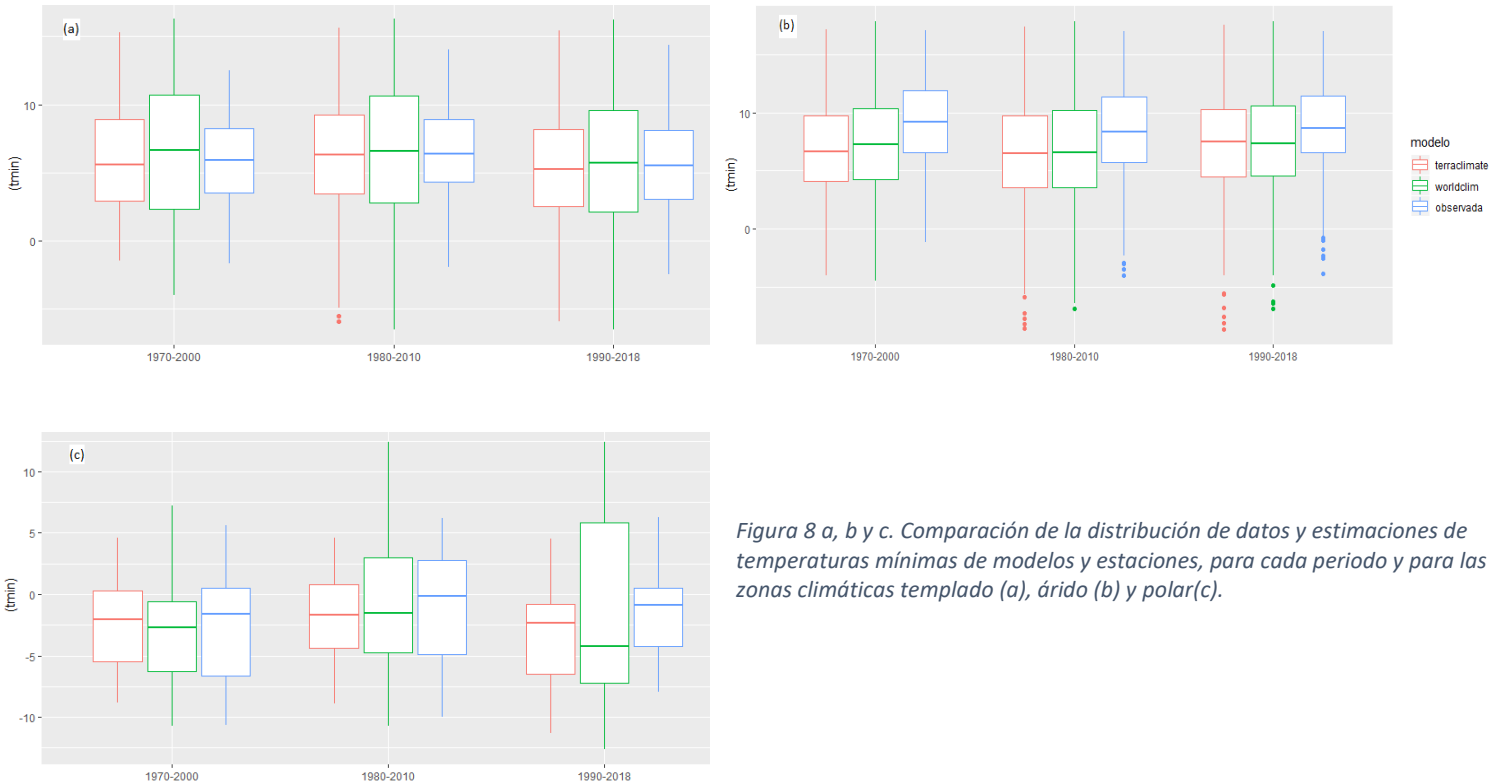


Figura 8 a, b y c. Comparación de la distribución de datos y estimaciones de temperaturas mínimas de modelos y estaciones, para cada periodo y para las zonas climáticas templado (a), árido (b) y polar(c).

Al igual que en el resto de las variables a analizar la distribución de ambos modelos son más bajas que las observadas por las estaciones por lo que se puede decir que los modelos subestiman la temperatura mínima.

Aunque se pueden ver que estas distribuciones son distintas dependiendo del clima que se este analizando, siendo las más variables en el caso del clima polar (figura 8c) y si entramos en tipo de modelo, el Terraclimate mas cercano a el dato observado.

Respecto a los datos de la Tabla 8, se aprecia como las diferencias en las medias, son mayores en los climas árido y polar que en clima templado, llegando a observarse diferencias superiores a los 2 °C entre los modelos y las observaciones. En el caso de la temperaturas mínimas (X max), en general se aprecia al igual que en caso anterior que las distribuciones del Terraclimate son más cercanas a las observadas que las aportadas por el WorldClim.

#### 4.4 Evolución temporal

Para poder analizar la evolución temporal de la variable precipitación, en los distintos periodos estudiados observamos la Figura 9.

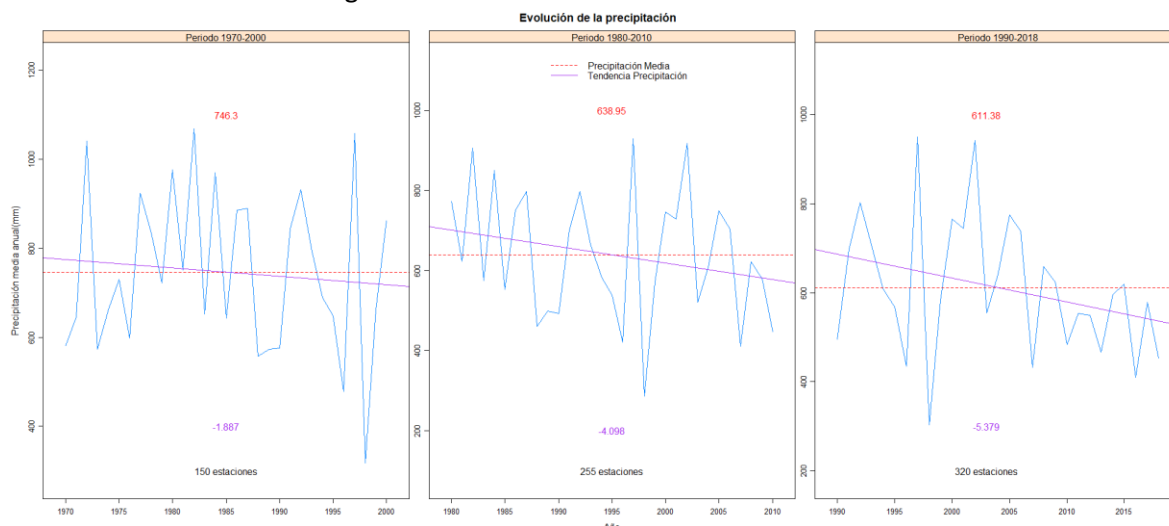


Figura 9. Evolución de la precipitación desde el año 1970 hasta el año 2018, separado por los 3 periodos establecidos.

Aquí se puede ver como la media de precipitación va disminuyendo periodo tras periodo, iniciando en 746 mm para el periodo 1970- 2000 y llegando a 611 mm para el periodo 1990-2018, eso significa una reducción total de más de 130 mm de precipitación en menos de 50 años. Además, cabe destacar que la tendencia de la precipitación para el último periodo es la más negativa, obteniendo una pérdida anual de precipitación de casi 5,4 mm.

Si entramos en más detalle, dividiendo las estaciones por el clima donde se encuentran obtenemos una información mas específica de los distintos cambios que se están produciendo a nivel de precipitación en el país (Figura 10).

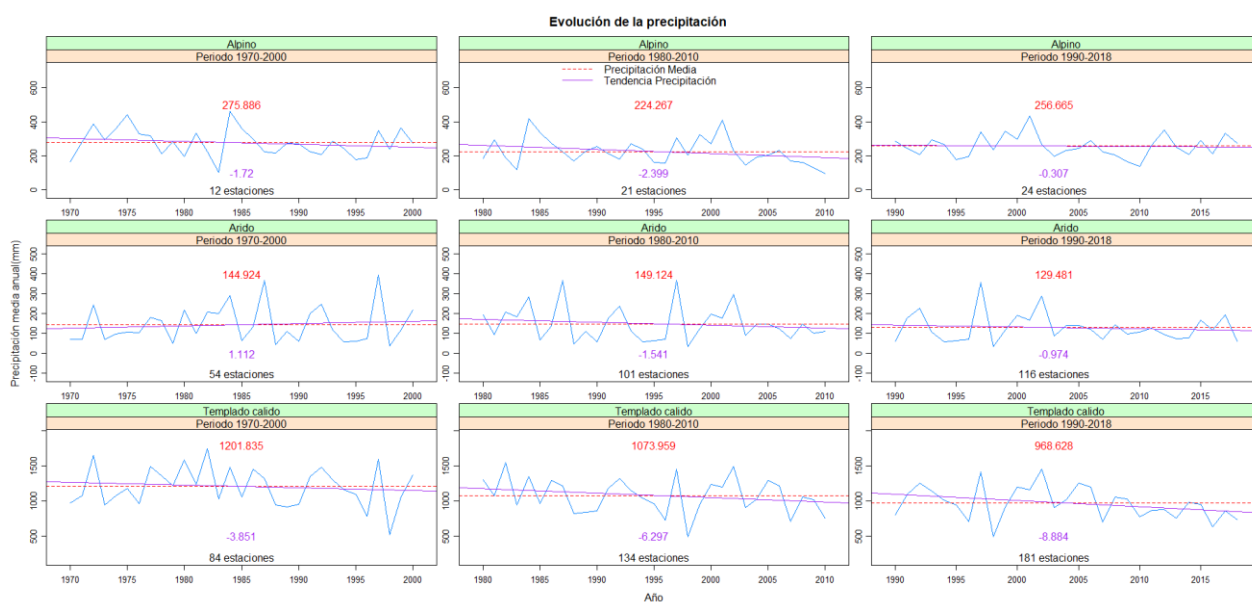


Figura 10. Evolución de la precipitación dividida por zonas climáticas desde el año 1970 hasta el año 2018.

Los gráficos de la Figura 10, nos indican que la zona climática donde están ocurriendo los mayores descensos de la precipitación es en la zona templada, ya que en este caso se reducen en más de 300 mm en menos de 50 años, obteniendo una tendencia negativa de casi 9 mm de lluvia por año para el periodo 1990-2018. En el caso de las otras dos zonas climáticas, la evolución también es a la baja, pero de manera mucho más lenta, reduciéndose unos 20 mm de media a lo largo de los años.

En el caso de las temperaturas, no ha habido un cambio tan notorio como en la variable anterior, a evolución temporal de la temperatura máximas, se obtuvo la Figura 11.

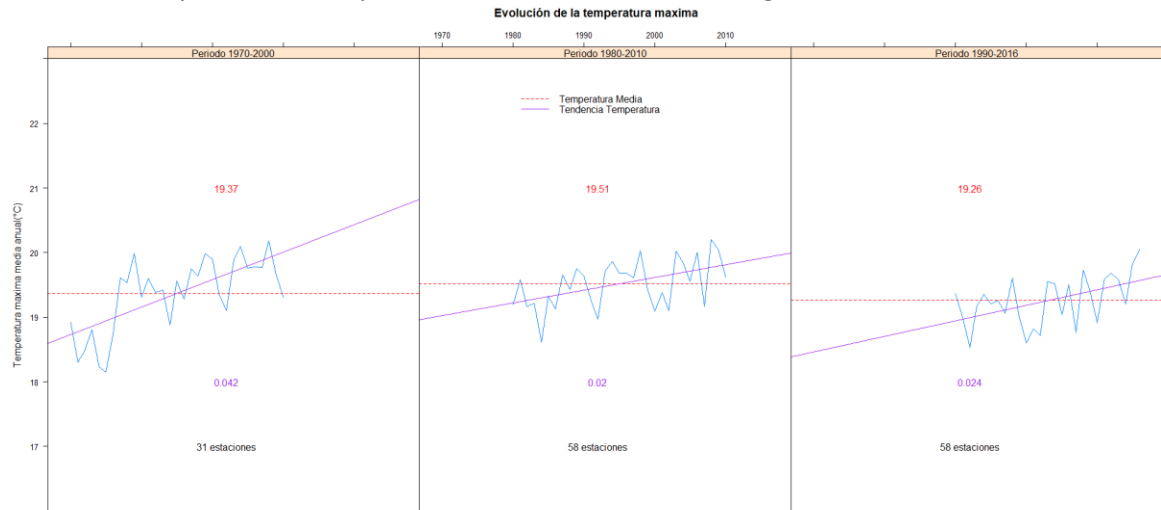


Figura 11. Evolución de la temperatura máxima desde el año 1970 hasta el año 2016.

En esta, se observa un aumento de la tendencia de las temperaturas máximas en todos los periodos, por lo que se han obtenido unos aumentos de temperaturas máximas promedio que van desde 0.02 °C a 0.04 °C al año.

Si se divide en zonas climáticas (Figura 12), se observan distintas tendencias.

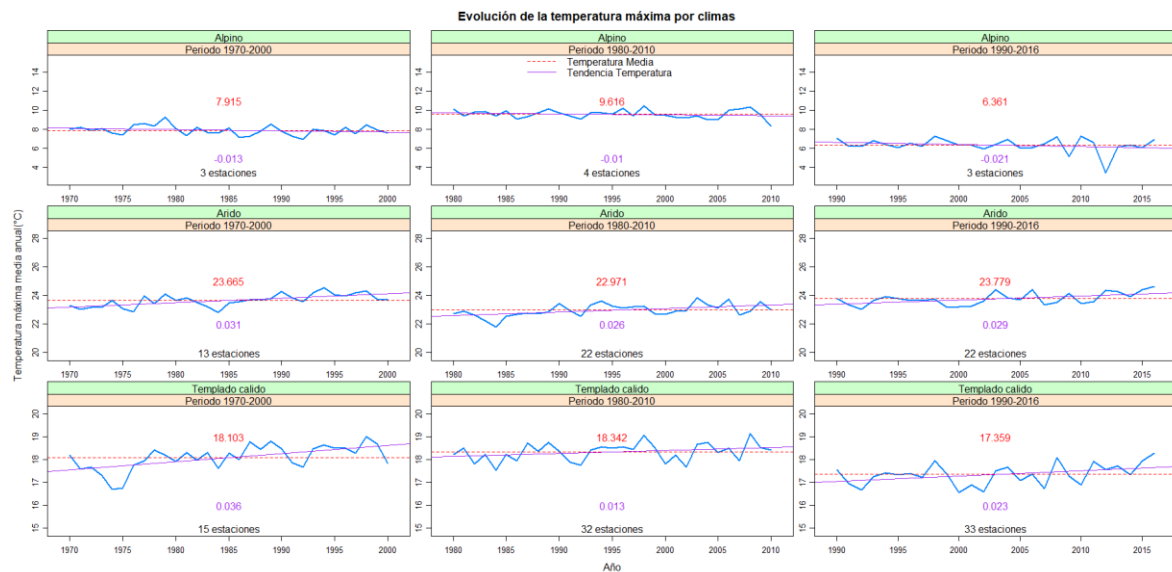


Figura 12. Evolución de la temperatura máxima dividida por climas desde el año 1970 hasta el año 2016.

En este ultima figura aporta datos que en el clima polar se observan disminuciones en las tendencias de las temperaturas máximas (-0,021 °C entre 1990-2016), mientras que en el clima templado y árido las tendencias son positivas (entre 0,023 y 00.29 para 1990-2016).

En el caso de la evolución de la temperatura mínima (Figura 13), se observan aumentos de las temperaturas a nivel general aunque no son muy altos (0,004°C para el 1990-2016), a nivel de zonas climáticas se observa como en el caso del clima árido se da un pequeña disminución de esta, al contrario de lo que ocurre en los climas polar y templado en los que se evidencia un aumento de las temperaturas mínimas en cada uno de los periodos analizados.

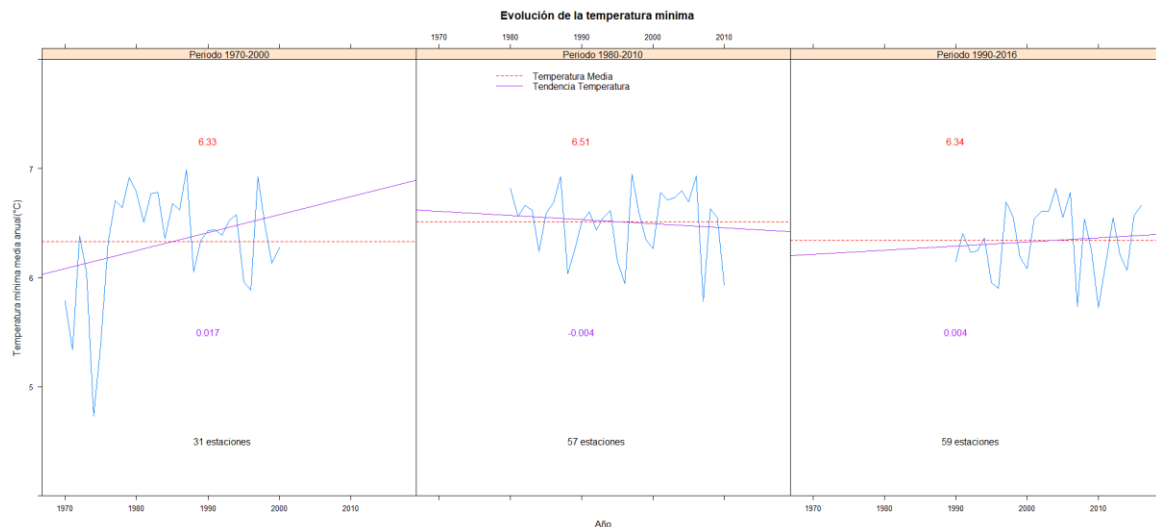


Figura 13. Evolución de la temperatura mínima dividida por climas desde el año 1970 hasta el año 2016.

#### 4.5 Estadísticos de comparación

Los estadísticos utilizados para comparar los diferentes datos de precipitación se calcularon para cada una de las estaciones meteorológicas y los valores promedio de las predicciones de los modelos que se presentan en la Tabla 9.

Los resultados de los estadísticos no revelaron diferencias muy significativas entre los modelos Terraclimate y WordClim entre los periodos 1970-2000, 1980-2010 y que en el ultimo periodo analizado el 1990-2018, sí que se podían observar diferencias entre las predicciones de ambos modelos.

Estas diferencias son más notorias cuando los que se comparan son los errores aportados por los modelos a nivel mensual, es decir la media anual del error no es muy distinta entre los modelos para cada uno de los estadísticos.

Por ejemplo, en el periodo 1 (1970-2000), la diferencia agregada indica que los errores en ambos modelos son, en promedio de prácticamente 0 mm a 24 mm, siendo más altos en los meses de invierno, lo cual coincide con la temporada de más lluvias, estos errores van disminuyendo a medida que se analizan los siguientes periodos (1980-2010 y 1990-2018). Lo mismo ocurre con el resto de los estadísticos, mejoran en los errores a medida que se avanza en el tiempo analizando los periodos más actuales y a su vez se reducen los % de error. Aunque hay que destacar algunos errores como los aportados por el RMSD y RMSD %, los cuales son superiores en algunos meses de invierno (junio y julio) superiores a 50 mm, llegando incluso a superar los 70 mm, y con unos porcentajes de error entre el 50 y el 70 %.



		Diferencia Agregada		Diferencia Agregada %		Diferencia Absoluta		Diferencia Absoluta %		Rmsd		Rmsd %	
		terraclimate	worldclim	terraclimate	worldclim	terraclimate	worldclim	terraclimate	worldclim	terraclimate	worldclim	terraclimate	worldclim
P 1	General	8,02	7,72	12,47	12,01	15,78	15,51	24,54	24,12	37,87	37,07	58,89	57,65
	1	0,34	-0,24	1,71	-1,20	4,80	4,75	23,86	23,65	9,11	8,79	45,31	43,72
	2	0,89	0,36	4,64	1,86	4,36	4,67	22,82	24,45	7,96	8,01	41,70	41,93
	3	1,81	1,78	7,95	7,82	4,87	4,75	21,42	20,88	8,60	8,58	37,80	37,73
	4	9,53	9,41	19,96	19,71	12,46	12,24	26,09	25,65	24,95	24,57	52,27	51,46
	5	17,56	16,76	14,19	13,55	30,97	30,55	25,02	24,68	63,76	61,55	51,52	49,73
	6	24,04	24,43	15,71	15,97	36,61	36,63	23,92	23,94	73,19	72,54	47,83	47,40
	7	20,12	19,58	14,43	14,05	34,83	34,07	25,00	24,45	63,37	62,37	45,47	44,76
	8	0,18	0,29	0,21	0,33	21,20	20,67	24,17	23,57	33,62	32,84	38,33	37,44
	9	10,82	10,48	16,95	16,41	15,23	14,66	23,86	22,96	30,11	29,04	47,16	45,49
	10	8,01	7,69	18,21	17,46	11,66	11,15	26,50	25,34	24,60	23,38	55,89	53,12
	11	1,25	0,97	4,47	3,47	7,24	7,05	25,90	25,22	13,50	13,04	48,33	46,67
	12	1,65	1,20	7,40	5,36	5,13	4,94	23,00	22,12	10,29	9,61	46,10	43,07
P 2	General	5,31	4,89	9,76	8,99	13,02	12,99	23,93	23,88	30,85	29,45	56,70	54,14
	1	1,26	-0,97	7,10	-5,45	5,31	5,38	29,86	30,29	13,59	12,07	76,49	67,92
	2	1,03	0,78	5,64	4,29	4,71	4,78	25,85	26,27	9,66	9,38	53,06	51,51
	3	2,58	4,16	11,17	17,97	6,13	6,25	26,51	27,01	12,46	13,56	53,87	58,61
	4	6,59	9,45	15,23	21,81	10,90	11,96	25,18	27,61	23,45	25,38	54,14	58,60
	5	10,89	9,07	10,81	9,00	22,93	22,92	22,75	22,73	47,18	43,28	46,81	42,94
	6	15,66	16,17	12,09	12,48	28,52	28,26	22,03	21,82	58,59	56,41	45,25	43,56
	7	12,17	5,62	10,95	5,06	25,80	25,51	23,22	22,96	45,81	43,08	41,23	38,77
	8	-2,32	8,07	-2,76	9,59	20,63	18,66	24,54	22,20	33,79	33,16	40,19	39,44
	9	7,25	3,80	14,61	7,65	11,34	10,61	22,85	21,39	24,25	21,46	48,88	43,27
	10	6,77	4,89	18,94	13,66	9,33	9,79	26,08	27,36	24,06	23,37	67,25	65,33
	11	0,69	-1,10	3,14	-4,99	5,93	6,00	26,84	29,87	13,87	13,72	62,75	62,05
	12	1,11	-1,23	6,37	-7,04	4,66	5,19	26,71	29,75	13,29	11,83	76,23	67,87
P 3	General	3,21	-0,01	6,12	-0,01	12,01	12,92	22,87	24,60	28,12	27,36	53,55	52,10
	1	-0,08	-3,16	-0,46	-18,97	4,70	5,55	28,24	33,38	10,01	9,48	60,13	56,94
	2	-0,46	-0,61	-2,51	-3,36	4,84	4,92	26,72	27,18	8,56	8,41	47,29	46,45
	3	0,93	2,04	3,97	8,71	6,34	6,06	27,09	25,89	11,25	11,04	48,09	47,21
	4	4,74	6,17	11,09	14,43	10,21	10,25	23,87	23,96	22,13	22,31	51,74	52,16
	5	8,27	-8,10	9,35	-9,16	18,92	23,71	21,39	26,80	38,87	37,99	43,95	42,95
	6	13,27	11,46	10,23	8,84	26,98	28,04	20,80	21,62	56,24	52,32	43,36	40,34
	7	5,90	-16,55	6,27	-17,59	20,61	28,32	21,90	30,09	38,87	42,06	41,31	44,70
	8	-4,04	6,40	-4,67	7,40	21,27	18,41	24,59	21,28	35,74	34,85	41,33	40,30
	9	4,97	1,14	10,01	2,29	10,63	9,82	21,42	19,78	22,56	19,90	45,44	40,09
	10	4,85	4,00	13,06	10,75	8,48	8,17	22,80	21,97	20,42	18,93	54,92	50,92
	11	-0,31	-2,50	-1,33	-10,78	5,85	6,77	25,29	29,28	13,01	12,55	56,24	54,24
	12	0,51	-0,35	2,51	-1,69	5,29	5,02	25,79	24,44	11,93	11,12	58,12	54,17

Tabla 9. Resumen de los estadísticos para los modelos Terraclimate y WorldClim, divididos por los tres periodos climáticos y por los 12 meses dentro de cada periodo para la variable precipitación.

Analizando algunos de los estadísticos, por ejemplo, la diferencia agregada en el periodo 3 (1990-2018), se observan que las diferencias fueron más grandes entre los modelos en los meses de mayo, junio, julio y agosto que corresponde con el invierno que es el momento de mayores precipitaciones, en los que se pueden llegar a ver diferencias de hasta 20 mm de precipitación entre los modelos como en Julio del periodo 3 (Figura 14). Sin embargo, para poder apreciar la verdadera magnitud del error mensual, se debe revisar estos mismos errores de manera relativa, ya que la diferencia agregada esta dimensionada. En la tabla 9, se aprecia que el error más grande de la diferencia agregada para ambos modelos en el periodo 1 (1970-2000) es en junio, con unos 24 mm, pero esto no cuadra con los errores % de este mismo estadístico, ya que estos se dan en los meses de mayo y noviembre con un % de error entre 17 y 20%.

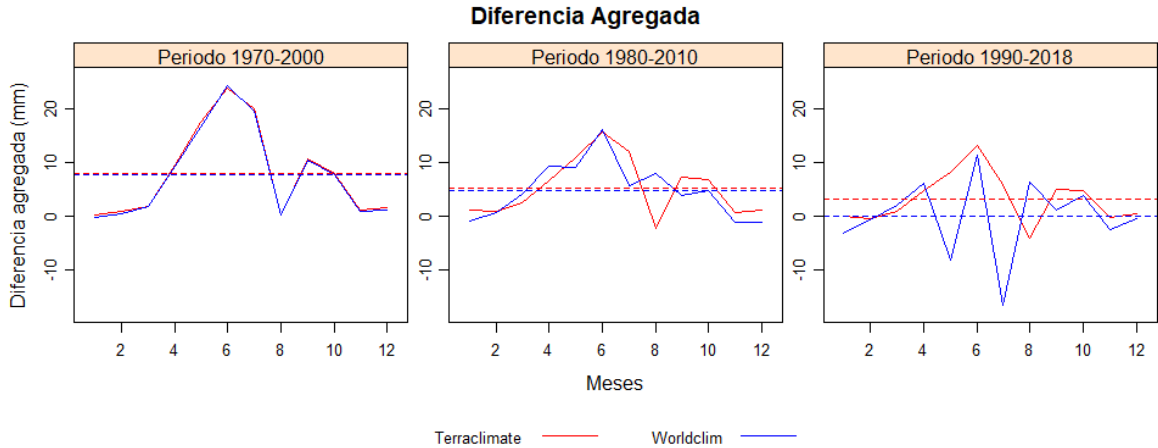


Figura 14. Gráficos de la diferencia agregada para los modelos Terraclimate y WorldClim.

También se calcularon estos mismos estadísticos dividiéndolos además por las zonas climáticas descritas en el Mapa 1, en los que se comprobó que los mayores errores ocurren donde existen mayores cantidades de precipitación, que corresponden con el clima templado, llegando a observarse errores de hasta 40 mm, además de verse como el modelo WorldClim tiene unas predicciones más variables, en la zonas climáticas árido y templado, en algunos meses presenta subestimaciones y otros sobrestimaciones, principalmente en el periodo climático 1990-2018 (Figura 15).

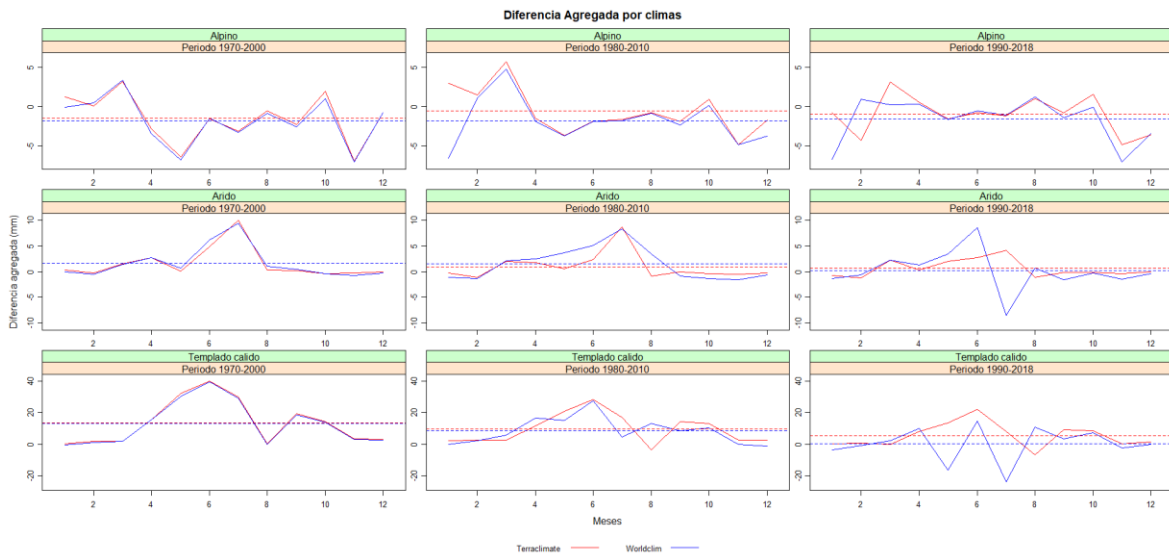


Figura 15. Gráficos de la diferencia agregada para los modelos Terraclimate y WorldClim, divididos por zonas climáticas.

Los valores de los estadísticos de la temperatura máxima se presentan en la Tabla 10.

		Diferencia Agregada		Diferencia Agregada %		Diferencia Absoluta		Diferencia Absoluta %		Rmsd		Rmsd %	
		terraclimate	worldclim	terraclimate	worldclim	terraclimate	worldclim	terraclimate	worldclim	terraclimate	worldclim	terraclimate	worldclim
P 1	General	1,83	1,52	9,44	7,81	2,37	2,57	12,21	13,21	3,49	3,33	17,97	17,14
	1	1,23	2,13	5,00	8,68	2,28	2,96	9,29	12,08	3,28	3,38	13,37	13,77
	2	1,44	2,45	5,90	10,05	2,32	3,16	9,50	12,95	3,26	3,60	13,36	14,72
	3	1,80	2,65	7,87	11,59	2,46	3,30	10,76	14,46	3,47	3,80	15,18	16,65
	4	1,69	2,36	8,53	11,93	2,24	2,80	11,33	14,14	3,44	3,52	17,38	17,81
	5	2,04	1,85	12,31	11,13	2,33	2,31	14,02	13,90	3,55	3,23	21,42	19,49
	6	2,30	1,60	16,29	11,34	2,48	2,20	17,54	15,59	3,60	3,10	25,45	21,90
	7	2,06	0,25	14,93	1,85	2,33	2,70	16,94	19,57	3,37	3,34	24,45	24,25
	8	2,37	0,81	15,58	5,31	2,60	2,60	17,06	17,04	3,74	3,43	24,51	22,53
	9	2,09	0,88	12,21	5,17	2,38	2,27	13,91	13,30	3,57	3,19	20,88	18,66
	10	1,95	1,13	10,00	5,80	2,46	2,30	12,60	11,76	3,77	3,36	19,28	17,20
	11	1,61	1,10	7,44	5,05	2,29	2,12	10,55	9,78	3,43	3,04	15,81	14,00
12	1,43	1,00	6,09	4,24	2,32	2,10	9,84	8,90	3,40	2,89	14,41	12,25	
P 2	General	1,54	1,37	7,92	7,04	2,11	2,45	10,81	12,58	3,21	3,27	16,47	16,79
	1	0,98	2,29	3,95	9,24	2,15	3,04	8,67	12,29	3,18	3,65	12,83	14,74
	2	1,26	2,63	5,12	10,66	2,19	3,25	8,88	13,17	3,12	3,87	12,68	15,69
	3	1,51	2,79	6,56	12,09	2,20	3,30	9,56	14,33	3,20	3,97	13,89	17,25
	4	1,51	2,24	7,62	11,31	1,97	2,55	9,93	12,88	3,15	3,35	15,90	16,93
	5	1,81	1,45	11,00	8,83	2,00	1,90	12,20	11,55	3,21	2,83	19,55	17,24
	6	2,06	1,39	14,50	9,79	2,24	1,96	15,80	13,80	3,35	2,88	23,60	20,31
	7	1,69	-0,13	12,29	-0,92	1,94	2,55	14,12	18,51	2,97	3,12	21,60	22,69
	8	2,04	0,54	13,35	3,51	2,19	2,39	14,33	15,65	3,35	3,22	21,97	21,09
	9	1,78	0,61	10,44	3,58	2,02	2,11	11,83	12,34	3,22	3,00	18,86	17,55
	10	1,57	0,90	8,06	4,61	2,19	2,20	11,20	11,25	3,44	3,23	17,65	16,57
	11	1,20	0,86	5,54	3,96	2,09	2,11	9,63	9,73	3,11	2,97	14,38	13,72
12	1,12	0,89	4,74	3,78	2,09	2,06	8,83	8,70	3,16	2,85	13,36	12,11	
P 3	General	1,70	1,72	8,85	8,94	2,31	2,64	12,03	13,73	3,49	3,48	18,19	18,12
	1	1,08	2,84	4,40	11,52	2,36	3,34	9,57	13,56	3,39	3,90	13,75	15,86
	2	1,50	3,09	6,14	12,64	2,32	3,52	9,48	14,42	3,31	4,06	13,57	16,63
	3	1,79	3,34	7,84	14,60	2,36	3,68	10,30	16,07	3,50	4,28	15,28	18,70
	4	1,62	2,61	8,31	13,38	2,20	2,84	11,29	14,56	3,40	3,60	17,45	18,45
	5	2,07	1,99	12,72	12,22	2,33	2,19	14,32	13,47	3,60	3,18	22,13	19,50
	6	2,07	1,67	14,95	12,01	2,42	2,00	17,42	14,39	3,60	3,10	25,96	22,37
	7	1,84	0,06	13,75	0,48	2,15	2,68	16,05	19,98	3,36	3,28	25,06	24,45
	8	2,17	0,75	14,52	5,02	2,35	2,47	15,75	16,58	3,64	3,37	24,43	22,58
	9	1,95	1,00	11,56	5,95	2,21	2,25	13,10	13,32	3,52	3,24	20,85	19,17
	10	1,69	1,09	8,81	5,70	2,38	2,30	12,44	12,03	3,71	3,33	19,37	17,41
	11	1,39	1,13	6,53	5,29	2,33	2,22	10,93	10,38	3,46	3,14	16,19	14,70
12	1,21	1,04	5,22	4,48	2,32	2,16	9,99	9,31	3,41	3,00	14,69	12,96	

Tabla 10. Resumen de los estadísticos para los modelos Terraclimate y WorldClim, divididos por los tres periodos climáticos y por los 12 meses dentro de cada periodo para la variable Temperatura máxima.

Tanto el modelo Terraclimate como el WorldClim, predijeron temperaturas máximas más bajas que las observadas a lo largo de Chile, durante los periodos analizados, con base a los promedios de errores mensuales y anuales calculados en las estaciones meteorológicas, por lo que se puede decir a nivel general que ambos modelos subestiman esta variable.

El error medio mensual (diferencia agregada) en algunos de los casos llega a ser superior a 3<sup>a</sup> C y las diferencias más grandes entre modelos se dan en el periodo 3 (1990-2016), en los meses de enero y julio donde superaban ampliamente los 1,5 °C, estas diferencias tan marcadas entre modelos en los distintos estadísticos se pueden observar fácilmente en el Figura 16, en los cuales se observa que durante los primeros meses del año el error de WorldClim es mayor al Terraclimate y a partir de la mitad del año en adelante cambia esa tendencia y pasan a ser inferiores. Respecto a los errores % se observa que los de mayor error se encuentran entorno al 25 %, dándose estos errores en los meses de junio y julio (invierno).

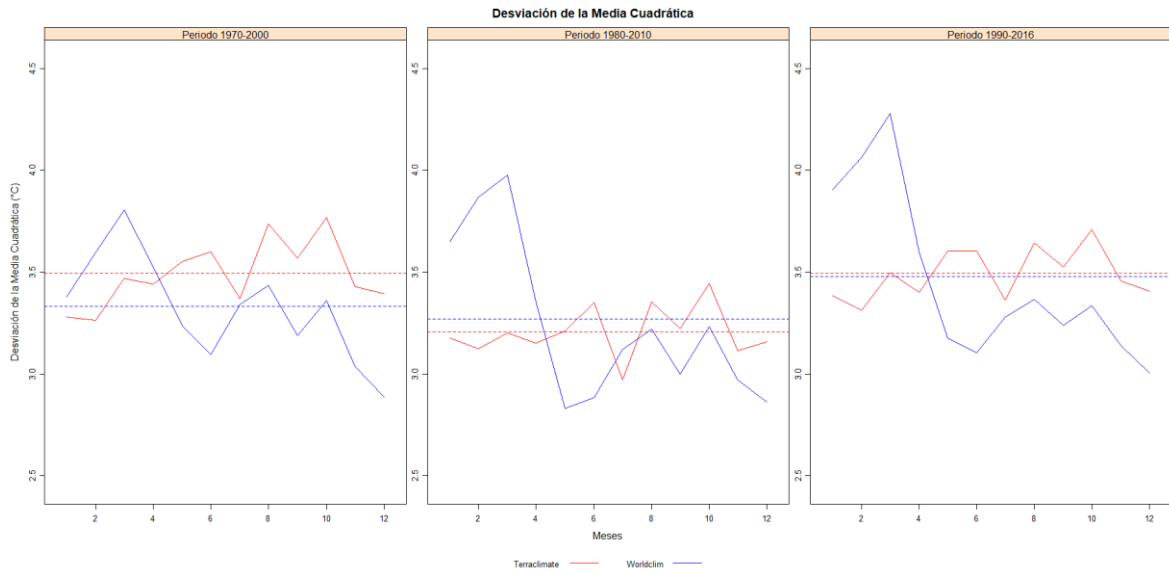


Figura 16. Gráficos de la desviación media cuadrática para los modelos Terraclimate y WorldClim.

Al calcular estos mismos estadísticos por zonas climáticas, se observa que los mayores errores ocurren en el clima árido, llegando a observarse en algunos estadísticos errores de más de 5 °C, además el modelo WorldClim funciona mejor que Terraclimate en el clima árido sea cual sea el periodo que se este analizando, pero en el caso de los climas polar y templado el Terraclimate funciona mejor que el WorldClim, las diferencias más grandes entre ambos modelos se dan el clima templado, llegando en algunos casos a superar los 2 °C (Figura 17).

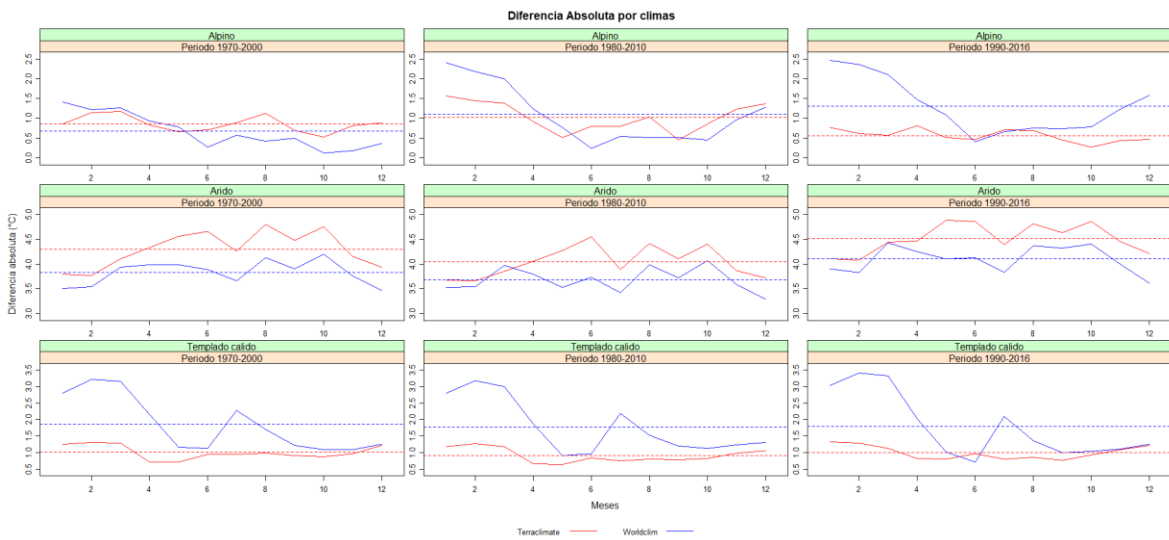


Figura 17. Gráficos de la diferencia absoluta para los modelos Terraclimate y WorldClim, divididos por zonas climáticas

Los valores de los estadísticos de la temperatura mínima se presentan en la Tabla 11.

	Diferencia Agregada		Diferencia Agregada %		Diferencia Absoluta		Diferencia Absoluta %		Rmsd		Rmsd %		
	terraclim	worldclim	terraclim	worldclim	terraclim	worldclim	terraclim	worldclim	terraclim	worldclim	terraclim	worldclim	
General	0,83	0,37	13,05	5,77	1,90	2,01	29,94	31,56	2,51	2,58	39,48	40,60	
1	0,03	-1,70	0,33	-16,90	1,56	2,61	15,51	25,92	2,06	3,16	20,50	31,38	
2	0,31	-1,55	3,14	-15,81	1,58	2,41	16,10	24,65	2,05	2,89	20,91	29,58	
3	0,64	-1,00	7,48	-11,63	1,82	2,20	21,21	25,72	2,35	2,58	27,49	30,13	
4	1,07	-0,34	16,58	-5,22	2,10	1,87	32,54	28,90	2,65	2,23	40,99	34,53	
5	1,30	0,80	26,55	16,24	2,15	1,60	43,76	32,48	2,71	2,14	55,22	43,62	
P1	6	1,56	1,55	44,96	44,71	2,11	1,76	60,64	50,75	2,81	2,52	80,97	72,50
7	1,42	2,53	50,10	89,40	2,17	2,83	76,55	100,02	2,81	3,33	99,25	117,71	
8	1,37	2,19	40,39	64,70	2,15	2,58	63,52	76,22	2,80	3,05	82,72	89,94	
9	1,02	1,43	23,20	32,33	2,00	2,04	45,35	46,20	2,61	2,55	59,03	57,79	
10	0,70	0,67	12,00	11,54	1,85	1,50	31,66	25,67	2,51	2,14	42,95	36,59	
11	0,36	0,06	4,91	0,75	1,75	1,35	23,67	18,21	2,41	1,95	32,47	26,39	
12	0,16	-0,25	1,71	-2,72	1,59	1,31	17,47	14,41	2,14	1,90	23,61	20,88	
General	0,72	0,35	11,09	5,34	1,91	2,07	29,34	31,82	2,54	2,60	39,04	39,97	
1	-0,07	-1,73	-0,67	-16,95	1,78	2,66	17,52	26,12	2,32	3,11	22,83	30,51	
2	0,24	-1,44	2,42	-14,42	1,80	2,45	18,05	24,57	2,33	2,86	23,36	28,62	
3	0,63	-0,78	7,06	-8,75	1,92	2,16	21,61	24,29	2,54	2,51	28,61	28,28	
4	1,11	-0,29	16,57	-4,31	2,09	1,88	31,34	28,13	2,73	2,26	40,96	33,95	
5	1,15	0,59	23,21	11,93	2,04	1,60	41,44	32,44	2,64	2,12	53,59	42,88	
P2	6	1,39	1,50	37,65	40,80	2,00	1,83	54,17	49,80	2,73	2,53	74,19	68,68
7	1,25	2,34	43,19	81,17	1,96	2,79	67,72	96,59	2,62	3,22	90,85	111,47	
8	1,31	2,24	36,17	61,67	1,98	2,70	54,60	74,37	2,64	3,11	72,69	85,67	
9	0,98	1,42	21,54	31,07	1,92	2,17	42,07	47,41	2,54	2,62	55,47	57,38	
10	0,50	0,67	8,36	11,27	1,81	1,64	30,38	27,53	2,47	2,26	41,33	37,95	
11	0,20	-0,01	2,70	-0,16	1,81	1,45	24,17	19,46	2,47	2,12	33,03	28,33	
12	-0,04	-0,36	-0,40	-3,99	1,75	1,47	19,29	16,17	2,34	2,06	25,75	22,64	
General	0,65	0,29	10,30	4,64	1,70	2,03	26,94	32,19	2,33	2,60	36,97	41,24	
1	0,01	-1,72	0,15	-17,14	1,65	2,68	16,38	26,67	2,15	3,17	21,42	31,56	
2	0,29	-1,56	2,95	-16,02	1,67	2,53	17,11	25,92	2,19	3,00	22,43	30,78	
3	0,60	-0,92	7,02	-10,66	1,75	2,25	20,33	26,16	2,38	2,68	27,60	31,09	
4	1,07	-0,41	16,51	-6,30	1,84	1,92	28,43	29,73	2,51	2,35	38,75	36,38	
5	1,01	0,57	20,79	11,84	1,78	1,57	36,74	32,43	2,41	2,12	49,76	43,77	
P3	6	1,03	1,29	29,52	36,93	1,79	1,66	51,15	47,63	2,49	2,42	71,39	69,33
7	1,06	2,29	39,31	84,86	1,77	2,70	65,64	100,10	2,50	3,16	92,79	117,02	
8	1,11	2,20	32,26	64,20	1,70	2,60	49,44	75,71	2,40	3,03	69,84	88,27	
9	0,83	1,50	18,51	33,63	1,66	2,08	37,16	46,57	2,29	2,59	51,31	58,03	
10	0,50	0,62	8,66	10,74	1,62	1,48	28,29	25,73	2,27	2,17	39,54	37,82	
11	0,23	-0,01	3,20	-0,15	1,64	1,41	22,64	19,48	2,24	2,07	30,87	28,48	
12	0,06	-0,34	0,63	-3,83	1,52	1,47	17,14	16,59	2,11	2,05	23,77	23,12	

Tabla 11. Resumen de los estadísticos para los modelos Terraclim y WorldClim, divididos por los tres periodos climáticos y por los 12 meses dentro de cada periodo para la variable Temperatura mínima.

En este caso, no existe una tendencia igual para ambos modelos a analizar, ya que predijeron temperaturas mínimas que en algunos meses eran mayores y en otros eran menores que las observadas a lo largo de Chile, cabe decir que en el caso del Terraclim, la gran mayoría de predicciones son subestimadas y más cercanas a las observadas que WorldClim y que este tiene número parecido de sobrestimaciones (enero a abril) y subestimaciones (mayo a octubre).

En general se puede decir que los errores son menores en el caso del modelo Terraclim, obteniendo un error medio (diferencia agregada) menor en 7-9 de los 12 meses dependiendo del periodo a analizar, en muchos de ellos el error es menor a 1 °C, en el caso de los errores %, se obtuvieron errores, independientemente del estadístico a analizar, de más del 50 % en muchos casos, llegando a casos extremos de errores del 117 % error.

Existen diferencias muy grandes entre los modelos, se dan en todos los estadísticos analizados y en los diferentes periodos (1990-2016), en algunos meses las diferencias son superiores a 1 °C, estas

se pueden observar fácilmente en el Figura 18, donde se observa que el modelo Terraclimate tiene menores errores.

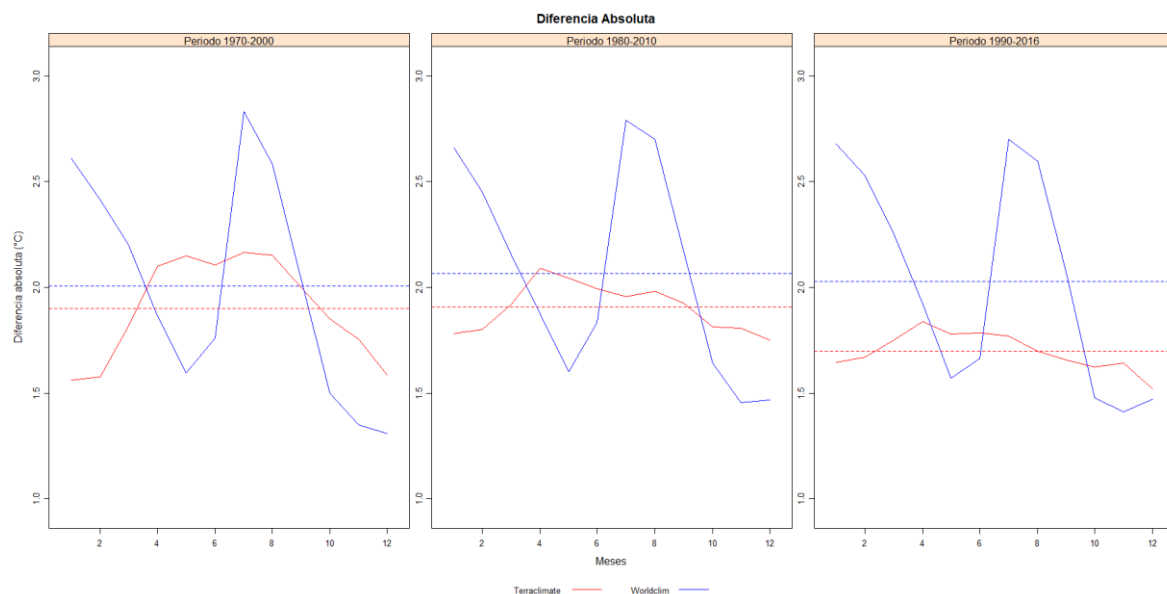


Figura 18. Gráficos de la Diferencia Absoluta para los modelos Terraclimate y WorldClim.

Dividiendo estos estadísticos por zonas climáticas, se observa que los errores mas grandes se dan en el clima polar y además en el último periodo climático (1990-2016), observándose errores de más de 5 °C, en el caso del modelo WorldClim (Figura 19). A nivel general se puede decir que Terraclimate funciona mejor en clima templado y en el clima árido ambos modelos se comportan de manera muy parecida y las diferencias mas grandes entre ambos modelos también se dan en el clima polar, llegando a superiores a 2 °C.

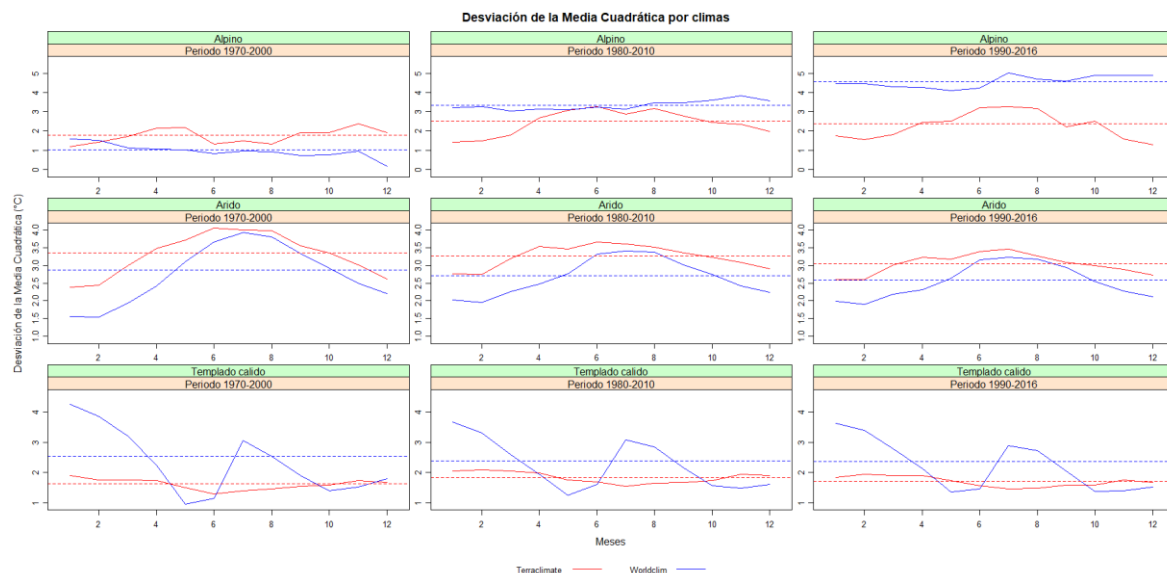


Figura 19. Gráficos de la desviación cuadrática media para los modelos Terraclimate y WorldClim, divididos por zonas climáticas.

## 5. DISCUSIÓN

El progresivo aumento y uso de modelos climáticos globales de alta resolución ha sobrepasado en gran medida a los trabajos para evaluar su incertidumbre para diversas aplicaciones. Existen pocas normas para emplear estos modelos y la mayoría de estos no suministran a los usuarios las estimaciones de su incertidumbre (Daly, C, 2006). Se sugiere valorar la incertidumbre del modelo a utilizar, ya que puede ser útil para conocer las fortalezas y debilidades de estos modelos, para después aplicar o no en sus estudios específicos.

Si bien hay muchas consideraciones a la hora de elegir un modelo climático global, una de las más importantes es si las predicciones son más o menos parejas con las observaciones locales.

El resultado de este estudio está basado en las observaciones de las estaciones meteorológicas a lo largo del territorio chileno, para las variables precipitación media, temperatura máxima y temperatura mínima, comparándose con las predicciones aportadas por el modelo Terraclimate y WorldClim desde el año 1970 hasta la actualidad.

Los resultados de este estudio sugieren que dependiendo de la variable a utilizar o la zona climática donde nos encontremos, podría hacer variar entre la elección del modelo.

En algunos casos, ambos productos tienen grandes errores que, dependiendo el uso que se le quiera dar posteriormente, pueden considerarse insatisfactorios para representar algunas condiciones locales. Según el artículo de (Tan et al.,2015) un modelo climático global con buen rendimiento debe tener valores bajos de diferencia agregada, RMSD y diferencia absoluta y un valor bajo de la diferencia absoluta %.

A nivel general, sin entrar en diferencias entre las variables analizadas, se puede decir que el modelo Terraclimate, tiene mejores predicciones y menor error en la mayor parte de los estadísticos, independientemente del periodo analizado, así que se puede considerar que sus predicciones son mejores que las del modelo WorldClim, el cual es muy variable en sus predicciones mensuales, es decir, no es un modelo que solo subestime o sobreestime, sino que depende del mes que se está analizando sus predicciones van por encima o por debajo de lo observado. Además de esto, WorldClim tiene los mayores errores porcentuales en algunos estadísticos que en algunos casos sobrepasan el 100 % de error.

En la variable precipitación, en promedio, ambos modelos pronosticaron valores inferiores a los observados (menos precipitación que la observada), y los errores variaron según el mes del año y la zona climática donde se encontraban, teniendo los errores más grandes durante los meses centrales del año (invierno) y en la zona climática templada, que es la zona y los meses donde recae la mayor cantidad de lluvia en el país.

En la precipitación, las aportaciones predichas por los modelos son mas cercanas a la realidad, es decir los errores son cada vez menores a medida que se analizan los periodos mas actuales, esto puede verse debido a que los modelos han subestimado sus predicciones a lo largo de los distintos periodos a analizar y esto junto a la gran disminución de lluvia (mega sequía), que se está dando en los últimos años en el territorio chileno, puede verse reflejado en que los modelos funcionan mejor de lo que debieron por sus propios pronósticos.

En el caso del modelo WorldClim, las predicciones utilizadas para el periodo 1990-2018 son las mismas que para el periodo 1970-2000, por lo tanto, si los errores del modelo disminuyen, se debe a variables externas al modelo que provocan esta disminución del error, no al calculo que realiza el modelo en si, por lo que tiene todo el sentido lo comentado anteriormente.

Respecto a las temperaturas máximas, ambos modelos aun teniendo grandes diferencias entre ellos, pronosticaron valores inferiores a los observados (menor temperatura máxima), con errores % relativamente bajos comparado con las otras variables, aportando como máximo algunos del 25%. Los errores de mayor dimensión se dan en los primeros meses del año en el caso del modelo WorldClim y en los meses centrales del año para el modelo Terraclimate, respecto a la zona climática con mayor error respecto a esta variable es la zona climática árida, que es donde se producen las temperaturas máximas más altas del país.

En el caso de las temperaturas mínimas, cada modelo aporta unas predicciones muy distintas, obteniéndose unos errores muy diversos, el Terraclimate generalmente subestima (predice menos frio que la observada), en cambio WorldClim al inicio y al final del año sobrestima (predice más frio que el observado por la estación y el resto de los meses subestima, obteniendo un mayor error % que Terraclimate, cuando se analizan los % de error máximos.

Al igual que en el caso anterior los errores mas grandes se producen al inicio del año en el caso del WorldClim y en los meses centrales del año en ambos modelos, correspondiente con los meses de temperaturas extremas, si se divide por los resultados obtenidos respecto a las zonas climáticas, los errores más grandes se dan en la zona polar, que es donde las temperaturas mínimas alcanzan sus máximos.

Comparando los estos resultados obtenidos en este estudio, con los resultados de otros estudios de la misma índole como los de (Zambrano et al, 2017), (Fernández, G. & Milla, D., 2018), (Tan et al.,2015), se puede decir que nuestros resultados se han obtenido mayores errores, por lo que se puede decir que los modelos no tienen a nivel general unas buenas predicciones para el territorio chileno.



## 6. CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio realizado en Chile, indica que las predicciones de estos modelos durante gran parte del año son aceptables, pero en algunas meses tienen un error muy alto, por lo que dependiendo de la variable que se vaya a utilizar y el tipo de investigación para la que va a servir las predicciones de los modelos, estos podrían o no utilizarse.

De entre los dos modelos Terraclimate ha obtenido en general unos errores menores y además tienen menor variabilidad en sus predicciones mensuales promedio, por lo que se puede considerar que debería usarse antes Terraclimate que WordClim en el territorio chileno.

Además, se ha obtenido que la evolución temporal de la precipitación es muy negativa, disminuyendo en una gran cantidad de lluvia para el último periodo analizado, además de un aumento considerable de las temperaturas ya sean máximas o mínimas en todo el territorio.

Aunque son las predicciones de los modelos son útiles, los errores que se han obtenido no son despreciables, por lo que depende de la aplicación que se le vaya a dar (agrícola, forestal, hidrológica) el error puede considerarse muy importante o no.

Sin embargo, para cualquier estudio en el cual se decida utilizar alguno de estos modelos en Chile, se recomendaría que primero se realicen calibraciones a nivel local, para poder reducir el error aportado por los modelos o tener en cuenta los errores que se indican en este estudio y así poder obtener predicciones que sean más exactas y precisas, para utilizarlas en distintas investigaciones posteriores.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aadhar, S., & Mishra, V. (2017). High-resolution near real-time drought monitoring in South Asia. *Scientific data*, 4, 170145.
- Abatzoglou, J. T., Dobrowski, S. Z., Parks, S. A., & Hegewisch, K. C. (2018). TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. *Scientific data*, 5, 170191.
- Aceituno, P., & Montecinos, A. (1992). Análisis de la estabilidad de la relación entre la Oscilación del Sur y la precipitación en América del Sur. In *Paleo ENSO Records. International Symposium* (eds Ortlieb L, Macharé J) (pp. 7-13).
- Alley, R., Berntsen, T., Bindoff, N. L., Chen, Z., Chidthaisong, A., Friedlingstein, P., ... & Hoskins, B. (2007). *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers. IPCC Secretariat, Geneva, Switzerland. 21p.*
- Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E. F. (2018). Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific data*, 5, 180214.
- Bishop, D. A., & Beier, C. M. (2013). Assessing uncertainty in high-resolution spatial climate data across the US Northeast. *PloS one*, 8(8), e70260.
- Boisier, J. P., & Aceituno, P. (2006, April). Changes in surface and upper-air temperature along the arid coast of northern Chile. In *Anales del XIV Congreso Brasileiro de Meteorología (Florianopolis 27 nov-1 dec 2006)*.
- Corporación Nacional Forestal (CONAF), 2018. Documento Testimonial y de Análisis de los Efectos del Cambio Climático en el Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado. Santiago. Chile. 76 pp.
- CONAMA, D. (2006). Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI. Santiago: Departamento de Geofísica. Universidad de Chile.
- Daly, C. (2006). Guidelines for assessing the suitability of spatial climate data sets. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 26(6), 707-721.
- Elith\*, J., H. Graham\*, C., P. Anderson, R., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., ... & Li, J. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29(2), 129-151.
- Fernández, G., & Milla, D. (2018). Validez de los datos de precipitación media mensual (1970-2000) generados por el modelo WorldClim V2. 0 para Venezuela. *Terra Nueva Etapa*, 34(56).

Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International journal of climatology*, 37(12), 4302-4315.

Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., & Veloso-Aguila, D. (2019). The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*.

Intergovernmental Panel on Climate Change. Working Group II. (2001). *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability: Part of the Working Group II Contribution to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC.

IPCC Working Group I. (2013). *Climate Change 2013-The Physical Science Basis: Summary for Policymakers*. Intergovernmental Panel on Climate Change.

John T. Abatzoglou, Solomon Z. Dobrowski, Sean A. Parks, Katherine C. Hegewisch.(2018). TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. *Scientific Data*, 5(170191)

Magaña, V. (2004). El cambio climático global: comprender el problema. *Martínez J. and Fernández BA Comp. Cambio Climático: Una Visión desde México*, 17-27.

Olcina Cantos, J. (2009). Cambio climático y riesgos climáticos en España.

OMM. (2009). La Organización Meteorológica Mundial de un vistazo.

Ou, T., Chen, D., Linderholm, H. W., & Jeong, J. H. (2013). Evaluation of global climate models in simulating extreme precipitation in China. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 65(1), 19799.

Pebesma, E.J., R.S. Bivand, 2005. Classes and methods for spatial data in R. *R News* 5 (2), <https://cran.r-project.org/doc/Rnews/>.

Perkins, S. E., Pitman, A. J., Holbrook, N. J., & McAneney, J. (2007). Evaluation of the AR4 climate models' simulated daily maximum temperature, minimum temperature, and precipitation over Australia using probability density functions. *Journal of climate*, 20(17), 4356-4376.

Piñeiro, G., Perelman, S., Guerschman, J. P., & Paruelo, J. M. (2008). How to evaluate models: observed vs. predicted or predicted vs. observed? *Ecological Modelling*, 216(3-4), 316-322.

Quintana, J. Estudio de los factores que explican la variabilidad de la precipitación en Chile en escalas de tiempo interdecadal. Tesis de Magíster en Geofísica. Santiago de Chile: Universidad de Chile, 2004.

Quintana, J., & Aceituno, P. (2006, April). Trends and interdecadal variability of rainfall in Chile. In *Proceedings of* (Vol. 8, pp. 24-28).

Quintana, J. and Aceituno, P. "Trends and Interdecadal Variability of Rainfall in Chile", Proceedings of the 8th ICSHMO, Foz do Iguaçu, Brasil, 24-28 abril, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2006

R Core Team (2019). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

Robert J. Hijmans (2019). raster: Geographic Data Analysis and Modeling. R package version 2.9-23. <https://CRAN.R-project.org/package=raster>

Rosenblüth, B., Fuenzalida, H. A., & Aceituno, P. (1997). Recent temperature variations in southern South America. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 17(1), 67-85

Salas-Eljatib, C. (2011). Modelling Tree Height Growth Of Nothofagus Forests In South-Central Chile: Merging Differential Equations And Mixed-Effects Models (Tesis doctoral). Yale University, EE.UU.

Sarricolea, P., Herrera-Ossandon, M., & Meseguer-Ruiz, Ó. (2017). Climatic regionalisation of continental Chile. *Journal of Maps*, 13(2), 66-73.

Soria-Auza, R. W., Kessler, M., Bach, K., Barajas-Barbosa, P. M., Lehnert, M., Herzog, S. K., & Böhner, J. (2010). Impact of the quality of climate models for modelling species occurrences in countries with poor climatic documentation: a case study from Bolivia. *Ecological Modelling*, 221(8), 1221-1229

Su, F., Duan, X., Chen, D., Hao, Z., & Cuo, L. (2013). Evaluation of the global climate models in the CMIP5 over the Tibetan Plateau. *Journal of Climate*, 26(10), 3187-3208.

Tan, M., Ibrahim, A., Duan, Z., Cracknell, A., & Chaplot, V. (2015). Evaluation of six high-resolution satellite and ground-based precipitation products over Malaysia. *Remote Sensing*, 7(2), 1504-1528.

Wang, T., Hamann, A., Spittlehouse, D. L., & Murdock, T. Q. (2012). ClimateWNA—high-resolution spatial climate data for western North America. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(1), 16-29.

Zambrano, F., Wardlow, B., Tadesse, T., Lillo-Saavedra, M., & Lagos, O. (2017). Evaluating satellite-derived long-term historical precipitation datasets for drought monitoring in Chile. *Atmospheric Research*, 186, 26-42.