

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



Efecto de la topografía de alta resolución en las salidas de simulaciones numéricas de la atmósfera para los fiordos y canales de la Región de Aysén.

Oliver Venegas Mella

Habilitación Profesional
para optar por el Título de Geofísico

Agosto 2016

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

Efecto de la topografía de alta resolución en las salidas de simulaciones numéricas de la atmósfera para los fiordos y canales de la Región de Aysén.

Oliver Venegas Mella

Habilitación Profesional
para optar por el Título de Geofísico

Profesor Guía:
Dr. Andrés Sepúlveda

Comisión:
Dr. Aldo Montecinos, Dr(c). Osvaldo Artal.



Agosto 2016

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a mi profesor guía, Andrés Sepúlveda, por darme la oportunidad de desarrollar este tema, por la constante ayuda, preocupación y buena disposición ante cualquier problema sobrevenido, además de los muchos consejos recibidos. Agradecer al Instituto de Fomento Pesquero (IFOP) y sus investigadores de Castro, sede Putemún, por el financiamiento de esta tesis y colaborar con datos de estaciones meteorológicas, indispensables para llevar a cabo este trabajo. También quiero dedicar un agradecimiento general, a todo el grupo humano que compone el Departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción (DGEO), por la valiosa formación entregada tanto académica como personal. Agradecer también de forma especial al profesor Aldo Montecinos por todo el conocimiento entregado a lo largo de estos años, además de su ayuda en el análisis estadístico de esta tesis. Igualmente a Osvaldo Artal por los consejos y apoyo con el modelo WRF. A todos los compañeros, en general, que me entregó esta carrera, por la desinteresada ayuda de muchos de ellos y las grandes amistades que se cultivaron en esta etapa. Finalmente, pero no menor, debo agradecer todo lo que soy a mi familia, por todo el apoyo incondicional durante este ciclo, en especial a mi madre, quien con mucho esfuerzo me entregó todo para mi bienestar.

Resumen

Debido a la alta irregularidad topográfica que presenta la zona Sur-Austral de Chile, comprendida entre Puerto Montt y Cabo de Hornos ($\sim 41,5 - 55,9^{\circ}\text{S}$), resulta complejo reproducir ciertos procesos meteorológicos con el modelo regional de la atmósfera Weather Research and Forecasting (WRF). La circulación local de los vientos es uno de ellos, ya que en esta región, es controlada por las características geomorfológicas del terreno, las que no logran ser representadas de manera realista por el modelo WRF. Esto se debe a que la base topográfica incluida en este modelo, proveniente de la United States Geological Survey (USGS), fluctúa entre $10'$ ($\sim 18\text{km}$) y $30''$ ($\sim 900\text{m}$), siendo deficientes a la hora de resolver variados canales y fiordos que exhiben dimensiones menores.

Dado esto, se analizó el efecto asociado tras incorporar al modelo WRF datos de alta resolución topográfica de $1''$ ($\sim 30\text{m}$), resultado del modelo de elevación digital para todo el mundo (GDEM) de ASTER. Se realizaron dos simulaciones entre el periodo 05/03/2015 - 10/05/2015 con tres dominios cada una. El primero con resolución horizontal de 27 km , el segundo de 9 km y el tercero de 3 km , siendo este último el área en la cual se enfocó este estudio ($\sim 41 - 47,4^{\circ}\text{S}$ y $\sim 70,8 - 80,6^{\circ}\text{W}$). La primera simulación utilizó la topografía de WRF de la USGS ($30''$) y se denominó *USGS900m*. La segunda simulación se llevó a cabo con la información topográfica de ASTER y se nombró *ASTER30m*. Se utilizaron 4 estaciones meteorológicas instaladas por el Instituto de Fomento Pesquero (IFOP), durante el periodo de simulación, con el fin de validar las salidas de estos modelos mediante un análisis estadístico que consistió en la correlación, sesgo, cociente entre las desviaciones estándar y la raíz del error cuadrático medio, entre cada simulación y lo observado. Además de la rapidez y las componentes del viento, se evaluaron la presión atmosférica en superficie y la temperatura del aire a 2m .

Luego de validar ambas simulaciones, los resultados indicaron que no hubo un cambio sobresaliente entre *USGS900m* y *ASTER30m* para las variables estudiadas en los cuatro puntos. Por otro lado se obtuvieron las diferencias de los valores absolutos entre

USGS900m y *ASTER30m* para los campos de la componente zonal (U) y meridional (V) del viento, en todos los puntos sobre agua (fiordos y canales de Aysén). Se estudió sus distribuciones espaciales y temporales, en donde de igual manera, se demostró que las diferencias se acercaron a $0m/s$ en gran parte del campo para ambas componentes. Finalmente se sugirió obtener una resolución espacial más fina para un estudio de este tipo en la zona Sur-Austral de Chile, ya que es necesario llegar a la resolución efectiva del modelo y así resolver, de manera más acertada, los procesos atmosféricos que se desarrollan en los canales y fiordos del sur chileno.

Índice general

1. Introducción	14
1.1. La Patagonia chilena	14
1.2. Modelo WRF y estudios previos	19
2. Objetivos e Hipótesis	30
2.1. Objetivos	30
2.2. Hipótesis	31
3. Metodología	32
3.1. Configuración y pre-pocesamiento del modelo	36
3.2. Post-pocesamiento y validación del modelo	42
4. Resultados y Discusión	47
4.1. Series de tiempo	47
4.2. Ciclo diario	56
4.3. Procesos sinópticos	62
4.4. Campos de viento	77
4.4.1. Distribución espacial de las diferencias	77
4.4.2. Distribución temporal de las diferencias	80
5. Conclusiones	81
Anexo	84
A. Modelo WRF.	85
B. Índices estadísticos para validar el modelo.	92

Índice de figuras

1.1.1.Fiordo Pulpo, Región de Aysén ($\sim 47.6^{\circ}\text{S}$ y 74.4°W): Imagen representativa de la accidentada topografía en la Región de Aysén.	15
1.1.2.Geomorfología, Región de Aysén: Mapa esquemático de las diferentes zonas de importancia geográfica para la Región de Aysén (Börgel, 1983).	16
1.1.3.Mapa del sur de América del Sur (los colores indican altura del terreno en msnm). El recuadro de la esquina superior izquierda muestra un acercamiento a la zona de Campos de Hielo Patagonia Sur y Norte, dos importantes reservas de agua dulce ubicadas en la Patagonia chilena. Elaboración propia.	17
1.1.4.Comparación entre la climatología de la precipitación media anual del modelo PRECIS-DGF (sombreado) y observaciones de estaciones meteorológicas (círculos llenos de la misma escala de colores); notar la escala logarítmica de colores. La climatología del modelo se calculó utilizando el periodo 1978-2001 y la climatología de las estaciones utilizando todos los datos mensuales disponibles durante la segunda mitad del siglo XX. La línea segmentada indica la cordillera de los Andes (Garreaud et al., 2013).	19
1.2.1.Promedio anual de precipitación entre 1979 y 2012. Comparación del gradiente zonal de precipitación entre el modelo regional RACMO2 (izquierda) y el modelo global ERA-I (derecha) (Lenaerts et al., 2014). . .	21
1.2.2.Promedio anual de la temperatura del aire en superficie (izquierda) y promedio anual de precipitación acumulada (derecha) para el periodo entre 2000-2010. Resultado del modelo de Reanálisis NCAR/NCEP (a), resultados del modelo WRF con una resolución horizontal de 5-km (b) (Villarroel et al., 2013).	22
1.2.3.Imagen obtenida de Google Earth. las cifras en metros indican el ancho de algunos canales y fiordos de la Región de Aysén que son menores a 900m.	23

1.2.4. Dominios anidados sobre Corea del Sur en donde se realizó la simulación. Los cuadros de abajo muestran el detalle de la zona costera compleja y con islas del suroeste (izquierda) y la costa oriental con una costa simple y altas montañas. Los círculos rellenos de la figura indican los lugares de observación (Jeong et al., 2012).	25
1.2.5. Mapa de la localización de los dos dominios establecidos para el modelo WRF. El dominio mayor tuvo una resolución horizontal de 5 x 5 km y el menor de 1 x 1 km (De Meij y Vinuesa, 2014).	27
1.2.6. Reticula de dominios del área de trabajo centrada en la Sabana de Bogotá (Garzón, 2014).	28
3.0.1. Topografía proveniente del modelo global de elevación digital ASTER con resolución de 1" incorporados al modelo WRF, para una sección norte de los canales y fiordos del Sur-Austral de Chile, entre $\sim 41 - 48^\circ\text{S}$ y $\sim 70 - 76^\circ\text{W}$	34
3.0.2. Topografía proveniente del modelo global de elevación digital SRTM con resolución de 1", para una sección norte de los canales y fiordos del Sur-Austral de Chile, entre $\sim 41 - 48^\circ\text{S}$ y $\sim 70 - 76^\circ\text{W}$. Se logran apreciar valores por debajo de 0m en sectores donde existe elevación topográfica, principalmente en $\sim 72^\circ\text{W}$ y $\sim 42^\circ\text{S}$	35
3.0.3. Diferencia entre los datos de topografía de SRTM y ASTER, para una sección norte de los canales y fiordos del Sur-Austral de Chile, entre $\sim 41 - 48^\circ\text{S}$ y $\sim 70 - 76^\circ\text{W}$. Los colores azules representan valores negativos del orden de 10^4 lo cual demuestra cifras muy alejadas de la realidad presentes en este GDEM.	36
3.1.1. Dominios establecidos para la simulación. El dominio uno se configuró con una resolución espacial de 27km, el dos de 9km y el tercer dominio de 3km.	38
3.1.2. Escenario topográfico para llevar a cabo la simulación <i>USGS900m</i> - Dominio 3.	39
3.1.3. Escenario topográfico para llevar a cabo la simulación <i>ASTER30m</i> - Dominio 3.	39
3.1.4. Diferencia de altura entre ambos escenarios: <i>USGS900m</i> – <i>ASTER30m</i> - Dominio 3.	40
3.2.1. Imagen representativa de la instalación de las estaciones meteorológicas sobre pontones de centros de cultivo.	43
3.2.2. Mapa con la ubicación de las estaciones meteorológicas instaladas por el IFOP.	46

- 4.1.1. Series de tiempo entre el 05/03/2015 y 10/05/2015 para la presión atmosférica en superficie. Observaciones en negro, *USGS900m* en verde y *ASTER30m* en rojo. Los paneles de la derecha corresponden a Pearson y Vicuña en los cuales se mostró un ajuste considerable de las simulaciones respecto a las observaciones. El panel superior izquierdo corresponde a Chivato, en donde se destaca una subestimación del promedio por parte de *ASTER30m* respecto a lo observado. El panel inferior izquierdo hace referencia a la estación de Gaviota en donde ambas simulaciones subestimaron el promedio de las observaciones. *USGS900m* tuvo un sesgo de aproximadamente el doble que *ASTER30m*. 47
- 4.1.2. Series de tiempo entre el 05/03/2015 y 10/05/2015 para la temperatura. Observaciones en negro, *USGS900m* en verde y *ASTER30m* en rojo. Todas las simulaciones se ajustaron de buena manera en términos de promedio. Chivato, Pearson y Vicuña presentaron una notoria subestimación de la amplitud. Gaviota por su lado tuvo un mejor ajuste de la amplitud. 48
- 4.1.3. Series de tiempo entre el 05/03/2015 y 10/05/2015 para *U*. Observaciones en negro, *USGS900m* en verde y *ASTER30m* en rojo. Todos los datos tienen un ajuste considerable en términos de promedio. Chivato y Vicuña representaron de mejor manera la amplitud que Pearson y Gaviota en donde se presentó una notoria sobrestimación de la amplitud. 49
- 4.1.4. Series de tiempo entre el 05/03/2015 y 10/05/2015 para *V*. Observaciones en negro, *USGS900m* en verde y *ASTER30m* en rojo. Esta figura destaca sobrestimaciones de la amplitud para Pearson y Gaviota. Por otro lado, Chivato y Vicuña mostró mejores ajustes en término de amplitud. Se aprecia además un ajuste en el promedio para todas las estaciones. 49
- 4.1.5. Series de tiempo entre el 05/03/2015 y 10/05/2015 para la rapidez del viento. Observaciones en negro, *USGS900m* en verde y *ASTER30m* en rojo. Se destacan vientos mucho más intensos para las estaciones de Chivato y Vicuña en las cuales las amplitudes de las simulaciones se acercaron bastante. Gaviota y Pearson mostró vientos más débiles los cuales fueron subestimados por las simulaciones. 50
- 4.1.6. Acercamiento del corte zonal de la topografía para todas las estaciones virtuales. En verde *ASTER30m* y rojo *USGS900m*. 53
- 4.2.1. Anomalías del ciclo diario, para la presión atmosférica. Observaciones en negro, *USGS900m* en verde y *ASTER30m* en rojo para todas las estaciones. 56

4.2.2. Anomalías del ciclo diario, para la temperatura, con los datos observados en negro, datos modelados <i>USGS900m</i> en verde y <i>ASTER30m</i> en rojo, para todas las estaciones.	57
4.2.3. Anomalías del ciclo diario, para la componente zonal del viento <i>U</i> , con los datos observados en negro, datos modelados <i>USGS900m</i> en verde y <i>ASTER30m</i> en rojo, para todas las estaciones.	57
4.2.4. Anomalías del ciclo diario, para la componente meridional del viento <i>V</i> , con los datos observados en negro, datos modelados <i>USGS900m</i> en verde y <i>ASTER30m</i> en rojo, para todas las estaciones.	58
4.2.5. Anomalías del ciclo diario, para la magnitud del viento, con los datos observados en negro, datos modelados <i>USGS900m</i> en verde y <i>ASTER30m</i> en rojo, para todas las estaciones.	58
4.3.1. Series de tiempo sin ciclo diario entre el 05/03/2015 y 10/05/2015 para la presión atmosférica, con los datos observados en negro, datos modelados <i>USGS900m</i> en verde y <i>ASTER30m</i> en rojo, para todas las estaciones.	63
4.3.2. Series de tiempo sin ciclo diario entre el 05/03/2015 y 10/05/2015 para la temperatura a 2m, con los datos observados en negro, datos modelados <i>USGS900m</i> en verde y <i>ASTER30m</i> en rojo, para todas las estaciones.	63
4.3.3. Series de tiempo sin ciclo diario entre el 05/03/2015 y 10/05/2015 para la componente zonal del viento <i>U</i> , con los datos observados en negro, datos modelados <i>USGS900m</i> en verde y <i>ASTER30m</i> en rojo, para todas las estaciones.	64
4.3.4. Series de tiempo sin ciclo diario entre el 05/03/2015 y 10/05/2015 para la componente meridional del viento <i>V</i> , con los datos observados en negro, datos modelados <i>USGS900m</i> en verde y <i>ASTER30m</i> en rojo, para todas las estaciones.	64
4.3.5. Series de tiempo sin ciclo diario entre el 05/03/2015 y 10/05/2015 para la intensidad del viento, con los datos observados en negro, datos modelados <i>USGS900m</i> en verde y <i>ASTER30m</i> en rojo, para todas las estaciones.	65
4.3.6. Diagrama de Taylor para la presión atmosférica. El punto rojo con la letra A indica los datos observados, con la letra B los datos simulados <i>USGS900m</i> y con la letra C los datos simulados <i>ASTER30m</i>	69
4.3.7. Diagrama de Taylor para la temperatura. El punto rojo con la letra A indica los datos observados, con la letra B los datos simulados <i>USGS900m</i> y con la letra C los datos simulados <i>ASTER30m</i>	70

4.3.8.	Diagrama de Taylor para la componente zonal del viento U . El punto rojo con la letra A indica los datos observados, con la letra B los datos simulados $USGS900m$ y con la letra C los datos simulados $ASTER30m$	71
4.3.9.	Diagrama de Taylor para la componente meridional del viento V . El punto rojo con la letra A indica los datos observados, con la letra B los datos simulados $USGS900m$ y con la letra C los datos simulados $ASTER30m$	72
4.3.10.	Diagrama de Taylor para la magnitud del viento. El punto rojo con la letra A indica los datos observados, con la letra B los datos simulados $USGS900m$ y con la letra C los datos simulados $ASTER30m$	73
4.4.1.	Mapa con promedios de todos los pasos de tiempo de la simulación $USGS900m$ para la componente U (izq.) y V (der.) de la velocidad del viento. Solo se trabajó con valores que se encontraban sobre agua.	78
4.4.2.	Mapa con promedios de todos los pasos de tiempo de la simulación $ASTER30m$ para la componente U (izq.) y V (der.) de la velocidad del viento. Solo se trabajó con valores que se encontraban sobre agua.	78
4.4.3.	Mapa con diferencias de los valores absolutos entre $USGS900m - ASTER30m$ para los promedios temporales de las componente U (izq.) y V (der.) del viento, para valores sobre agua.	79
4.4.4.	Histograma con diferencias de los valores absolutos entre $USGS900m - ASTER30m$ para los promedios temporales de las componente U (izq.) y V (der.) del viento, para valores sobre agua.	79
4.4.5.	Gráfica que representa los promedios y su desviación estándar espacial para cada campo de diferencias de los valores absolutos entre $USGS-900m-ASTER-30m$, para la componente U (arriba) y V (abajo) del viento, a través del tiempo.	80
A.0.1	Niveles Eta para el modelo WRF-ARW que siguen el contorno del terreno (Skamarock et al., 2005).	87
A.0.2	Grilla arakawa-C utilizada al desarrollar las ecuaciones que gobiernan la atmósfera (Skamarock et al., 2005).	87
A.0.3	Esquema descriptivo con los componentes de WPS.	89

Índice de Tablas

3.1.1. Resumen con la configuración principal de los distintos dominios. . . .	37
3.1.2. Archivo “telist” con la lista de estaciones virtuales que se utilizaron para validar el modelo. Consta de cuatro filas: la primera corresponde al nombre, la segunda un prefijo para abreviar el nombre, la tercera y cuarta, latitud y longitud respectivamente.	41
3.2.1. Ubicación y fechas de instalación y retiro de las estaciones meteorológicas montadas por el IFOP.	45
4.1.1. Sesgo entre las simulaciones <i>USGS900m</i> y <i>ASTER30m</i> y los datos observados, para la presión (<i>hPa</i>), temperatura ($^{\circ}C$), viento zonal (<i>m/s</i>), viento meridional (<i>m/s</i>) y magnitud del viento (<i>m/s</i>) en todas las estaciones.	52
4.1.2. Cociente de las desviaciones estándar entre las simulaciones <i>USGS900m</i> y <i>ASTER30m</i> y los datos observados, para la presión, temperatura, viento zonal <i>U</i> , viento meridional <i>V</i> y magnitud del viento en todas las estaciones.	55
4.1.3. Uso de suelo correspondiente para cada cuadrícula de grilla en donde se encuentran las “estaciones virtuales” definidas en el archivo “telist”. . .	55
4.2.1. Correlaciones de las anomalías del ciclo diario entre los datos observados y las simulaciones <i>USGS900m</i> y <i>ASTER30m</i> , para la presión, temperatura, viento zonal, viento meridional y magnitud del viento en todas las estaciones.	60
4.2.2. Cociente entre las desviaciones estándar del ciclo diario entre las simulaciones <i>USGS900m</i> y <i>ASTER30m</i> y los datos observados, para la presión, temperatura, viento zonal, viento meridional y magnitud del viento, para las estaciones de Chivato, Pearson, Gaviota y Vicuña.	62
4.3.1. Correlaciones de las series sin el ciclo diario entre los datos observados y las simulaciones <i>USGS900m</i> y <i>ASTER30m</i> , para la presión, temperatura, viento zonal <i>U</i> , viento meridional <i>V</i> y magnitud del viento para las estaciones de Chivato, Pearson, Gaviota y Vicuña.	66

4.3.2.Cociente entre las desviaciones estándar de las series sin el ciclo diario entre los datos observados y las simulaciones <i>USGS900m</i> y <i>ASTER30m</i> , para la presión, temperatura, viento zonal, viento meridional y magnitud del viento para las estaciones de Chivato, Pearson, Gaviota y Vicuña.	67
4.3.3.Raiz del error cuadrático medio (RECM) de las series sin el ciclo diario entre los datos observados y las simulaciones <i>USGS900m</i> y <i>ASTER30m</i> , para la presión (<i>hPa</i>), temperatura ($^{\circ}\text{C}$), viento zonal (<i>m/s</i>), viento meridional (<i>m/s</i>) y magnitud del viento (<i>m/s</i>), para las estaciones de Chivato, Pearson, Gaviota y Vicuña.	68
A.0.1Categorías de uso de suelo de la USGS (NCAR, 2010).	88
A.0.2Categorías de uso de suelo de MODIS (NCAR, 2010).	89

1. Introducción

1.1. La Patagonia chilena

La Región de Aysén se encuentra inserta en la Patagonia chilena, limita al norte con la Región de Los Lagos, al este con Argentina, al sur con la Región de Magallanes y de la Antártica Chilena y al oeste con el océano Pacífico y debido a su estructura geomorfológica, representa una fisonomía única y espectacular para nuestro país. Esta configuración es principalmente producto de la acción combinada entre la tectónica de placas, el vulcanismo y la acción de glaciares, dando como resultado el abrupto territorio que caracteriza el extremo sur de Chile (Fig. 1.1.1). En esta región se desprenden seis áreas de importancia geográfica: Cordillera Patagónica de Ventisqueros del Pacífico, Llano Central con Tectónica de Hundimiento, Cordillera Patagónica Insular, Cordillera Patagónica de Fiordos y Ríos de Control Tectónico, Cordillera Patagónica de Lagos y Ríos de Control Tectónico y Cordillera de la Costa con Tectónica de Hundimiento (Börgel, 1983) (Fig 1.1.2).

Gracias a esta composición, el territorio Sur-Austral chileno, situado en el borde sureste del Océano Pacífico, es una de las regiones de fiordos más extensas del mundo, conformándose por abundantes islas, penínsulas, fiordos, canales, cañones submarinos, bahías y zonas semicerradas de forma irregular, que otorgan un territorio altamente accidentado desde Puerto Montt hasta el Cabo de Hornos ($\sim 41,5 - 55,9^{\circ}\text{S}$) (Sievers y Silva, 2006). Junto a esto, la Patagonia chilena también se caracteriza por poseer los mayores cuerpos de hielo en el Hemisferio Sur fuera de la Antártica: Campo de hielo Patagonia Norte y Campo de hielo Patagonia Sur (Rignot et al., 2003) (Fig 1.1.3). Fue-

ra de estas, existen zonas cubiertas de hielo más pequeñas, sobre todo en latitudes más al sur de 50°S, tales como el campo de hielo de la Cordillera de Darwin (Rivera, 2004). Estos enormes volúmenes de hielo son considerados como un valioso reservorio de agua dulce de importancia mundial (Larraín, 2007) y se conservan debido a los patrones de circulación atmosférica y oceánica (Pantoja et al., 2011).



Figura 1.1.1: Fiordo Pulpo, Región de Aysén ($\sim 47.6^{\circ}\text{S}$ y 74.4°W): Imagen representativa de la accidentada topografía en la Región de Aysén.

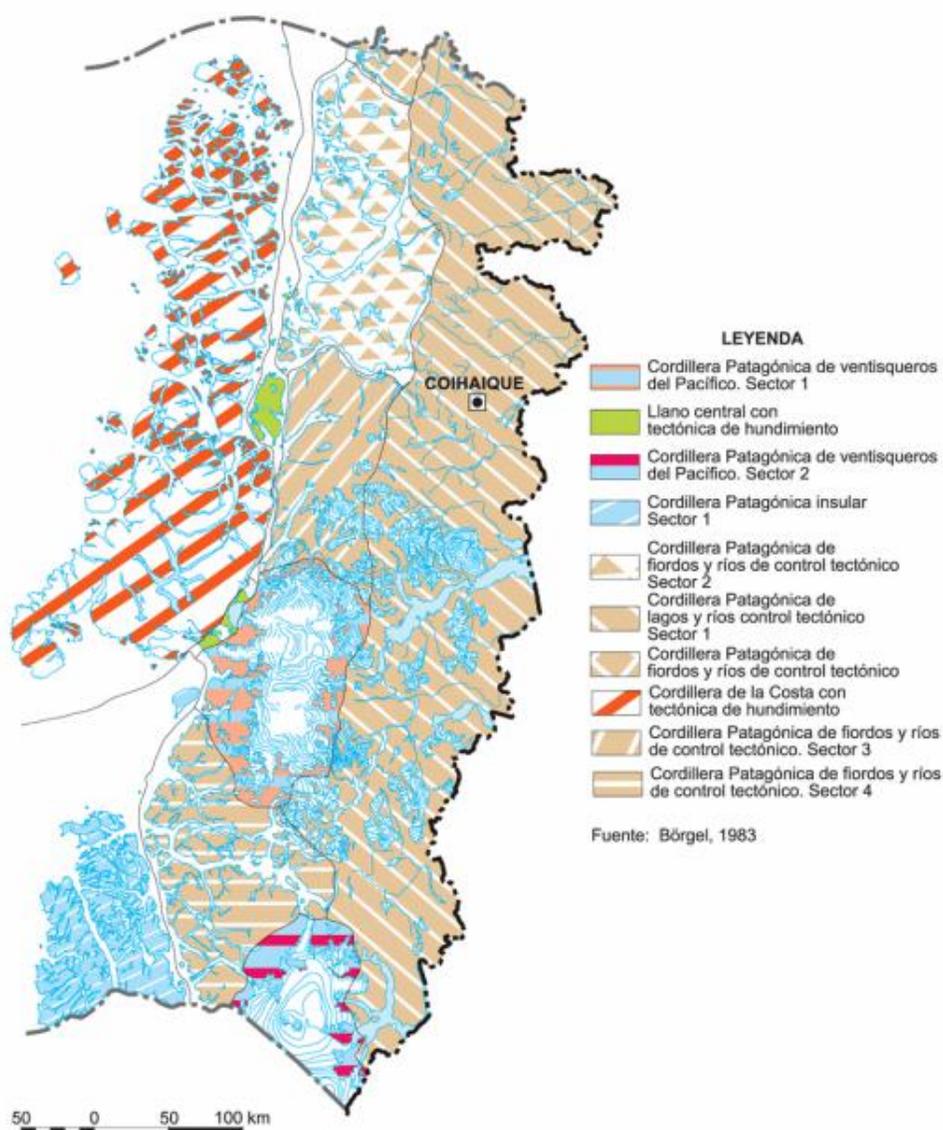


Figura 1.1.2: Geomorfología, Región de Aysén: Mapa esquemático de las diferentes zonas de importancia geográfica para la Región de Aysén (Börgel, 1983).

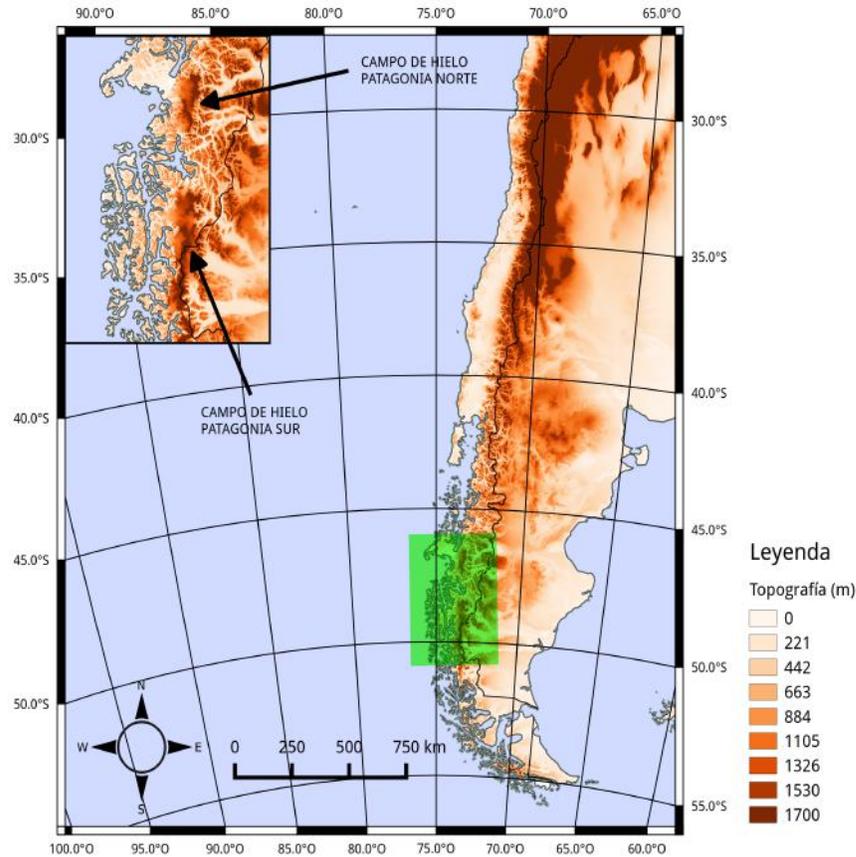


Figura 1.1.3: Mapa del sur de América del Sur (los colores indican altura del terreno en msnm). El recuadro de la esquina superior izquierda muestra un acercamiento a la zona de Campos de Hielo Patagonia Sur y Norte, dos importantes reservas de agua dulce ubicadas en la Patagonia chilena. Elaboración propia.

La combinación de estos grandes volúmenes de reserva de agua dulce, los increíbles paisajes y los abundantes cuerpos de agua semi-cerrados, han despertado el interés de muchos por estos territorios, incluyendo desarrolladores asociados a la industria hidroeléctrica, el turismo y la acuicultura del salmón (Pantoja et al., 2011), esta última ubicándose en el cuarto lugar dentro de las principales actividades económicas en Chile, después de la minería, la industria forestal y la producción de frutas (Buschmann et al., 2006). Sin embargo estas actividades deben ser apoyadas por un sólido conocimiento científico y de las limitaciones impuestas por estos frágiles ecosistemas patagónicos, en su mayoría vírgenes, con el fin de evitar un daño irreparable a un entorno ambiental de primer nivel en el mundo.

Los fiordos se pueden definir como estrechas entradas de mar en latitudes altas,

con columnas de agua relativamente profundas y grandes paredes empinadas. Estos fueron formados por la erosión debido al avance y retroceso de los glaciares durante la última era de hielo, y fueron llenándose con agua de mar, producto del alto nivel que este alcanzó en el periodo interglaciar (Pantoja et al., 2011). Estas masas de agua experimentan una circulación determinada por la descarga de agua dulce al interior de la cuenca y entrada de agua salada, fluctuaciones de las mareas y el esfuerzo del viento (Bustamante, 2009). Este último jugando un rol importante en la modificación de la circulación superficial y cambios en la intensidad de la estratificación de los fiordos (Farmer y Osborn, 1976). Desafortunadamente en el último tiempo, este territorio se ha visto afectado por la proliferación de algas dañinas llamadas marea roja, que ha aumentado en frecuencia, duración, extensión y toxicidad (Lembeye, 2008). También los acontecimientos recientes del virus ISA han afectado granjas salmoneras que operan en la región, con consecuencias graves para la economía chilena (Vike et al., 2009). Teniendo en cuenta estas tendencias ambientales, es fundamental entender los mecanismos de transporte que dominan la circulación de la columna de agua y por lo tanto de la dispersión de estos agentes.

Por otro lado, el clima de la Patagonia chilena se enfrenta a fuertes vientos del oeste a lo largo del año (Garreaud et al., 2013). Las ondas baroclínicas incrustadas en este flujo son drásticamente alteradas por los Andes austral provocando uno de los gradientes más abruptos de precipitación sobre la Tierra (Carrasco et al., 2002; Smith y Evans, 2007) (Fig. 1.1.4). La Patagonia occidental cuenta con un clima templado y bastante húmedo con niveles de congelación por lo general a 1 km sobre el nivel del mar, un leve ciclo estacional y precipitación media anual entre el rango de 400 - 900 mm/mes (Miller, 1976). Tal acumulación se debe a la orografía que realza la precipitación de escala sinóptica cuando los vientos oceánicos suben por la ladera oeste de los Andes (Roe, 2005), potenciando extensos bosques y los principales ríos. La precipitación media disminuye a menos de 30 mm/mes sólo unas pocas decenas de kilómetros al este de la división continental, lo que lleva a una rápida desaparición de la vegetación y una sombra de lluvia que se extiende por todo el camino hasta la costa atlántica, donde la precipitación media sólo alcanza 40-60 mm/mes (Fig. 1.1.4), (Prohaska, 1976; Paruelo

et al., 1998; Carrasco et al., 2002).

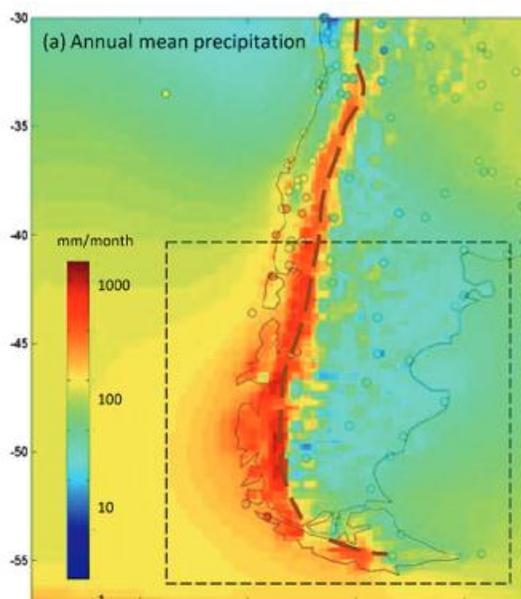


Figura 1.1.4: Comparación entre la climatología de la precipitación media anual del modelo PRECIS-DGF (sombreado) y observaciones de estaciones meteorológicas (círculos llenos de la misma escala de colores); notar la escala logarítmica de colores. La climatología del modelo se calculó utilizando el periodo 1978-2001 y la climatología de las estaciones utilizando todos los datos mensuales disponibles durante la segunda mitad del siglo XX. La línea segmentada indica la cordillera de los Andes (Garreaud et al., 2013).

1.2. Modelo WRF y estudios previos

Una herramienta de gran utilidad, tanto para el estudio atmosférico, como para el pronóstico del tiempo, es la modelación numérica de la atmósfera. Estos modelos se basan en la mecánica y termodinámica de fluidos (Uribe, 2012), siendo capaces de subestimar, sobrestimar o representar estrechamente un acercamiento a la realidad de las variables meteorológicas, inclusive del tiempo presente en sus condiciones iniciales (Kalnay, 2003). Otra gran utilidad que ofrecen estos modelos es el acoplamiento que se puede practicar con modelos hidrodinámicos, utilizando las salidas atmosféricas como forzantes (por ejemplo, viento) para algún proceso físico en cierto medio hidrodinámico (por ejemplo, corrientes marinas), pudiendo llevar a cabo modelaciones del océano o

pronósticos marinos (Large et al., 1991; Josse et al., 1999).

Uno de los modelos que se utiliza para simular la atmósfera, es el Weather Research and Forecasting (WRF) (Michalakes et al., 2001; Skamarock et al., 2005). Este modelo fue desarrollado en el año 2000, principalmente para la investigación y predicción de la dinámica atmosférica (ver detalle del modelo en Anexo A). Fue impulsado por diferentes equipos de investigación en los Estados Unidos con el propósito de reemplazar el modelo MM5 (The FifthGeneration NCAR PennState Mesoscale Model, Grell et al., 1994) y mejorar las predicciones meteorológicas a mesoescala. Su administración está a cargo de la UCAR (University Corporation for Atmospheric Research) y la NCAR (National Center for Atmospheric Research, NCAR, 2010). Este modelo es de dominio público y está disponible para toda la comunidad gratuitamente previo registro en la página web <http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/>.

La modelación atmosférica para la Región de Aysén, puede ser compleja debido a la topografía bastante irregular, mencionada con anterioridad, que esta presenta y a los diversos fiordos y glaciares, entre otros. Una buena opción es considerar una alta resolución horizontal a la hora de configurar el modelo y así conseguir una distribución espacial más detallada de los resultados (Mass et al., 2002; McQueen et al., 1995). Para este territorio se han desarrollado simulaciones atmosféricas utilizando una alta resolución horizontal (~ 5 km). Una de ellas se realizó con el modelo RACMO (Regional Atmospheric Climate Model, Van Meijgaard et al. 2008), la que demostró la necesidad de aumentar la resolución horizontal para resolver adecuadamente los efectos de precipitación orográfica, que modelos globales representan muy suavemente, como ERA-Interim (Dee et al., 2011) (Fig.1.2.1). Un resultado parecido se obtuvo con la misma resolución y para la misma zona pero con el modelo WRF (Villarroel et al., 2013). En este estudio se pudo apreciar como el modelo pudo resolver con mayor detalle el promedio anual de la temperatura del aire en superficie y la media anual de la precipitación acumulada en contraste con la simulación del Reanálisis de la NCEP/NCAR obtenido del sitio web de la KNMI Climate Explorer (<http://climexp.knmi.nl>) (Fig. 1.2.2). Estos estudios revelan las ventajas de la mejora de la resolución horizontal del

modelo regional, ya que de esta manera se resuelven mejor los detalles en la distribución horizontal de las variables atmosféricas.

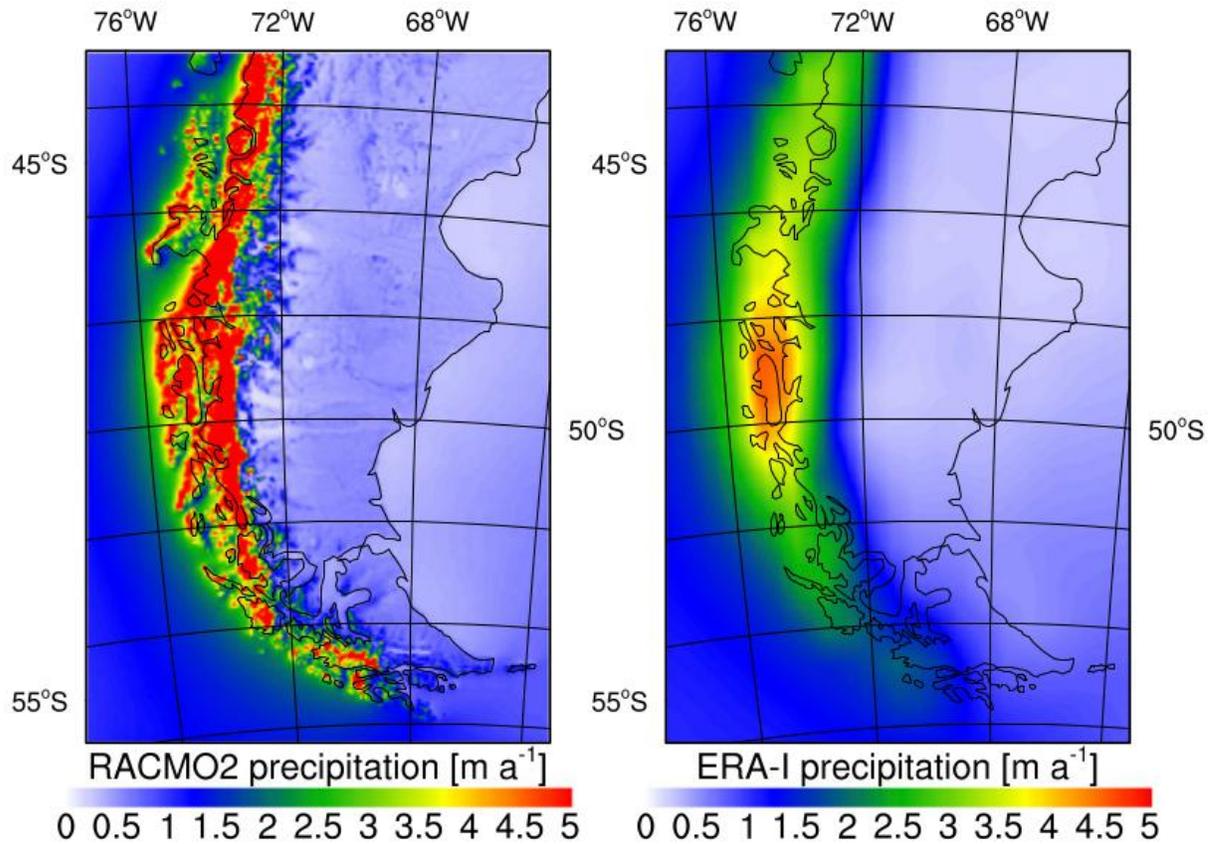


Figura 1.2.1: Promedio anual de precipitación entre 1979 y 2012. Comparación del gradiente zonal de precipitación entre el modelo regional RACMO2 (izquierda) y el modelo global ERA-I (derecha) (Lenaerts et al., 2014).

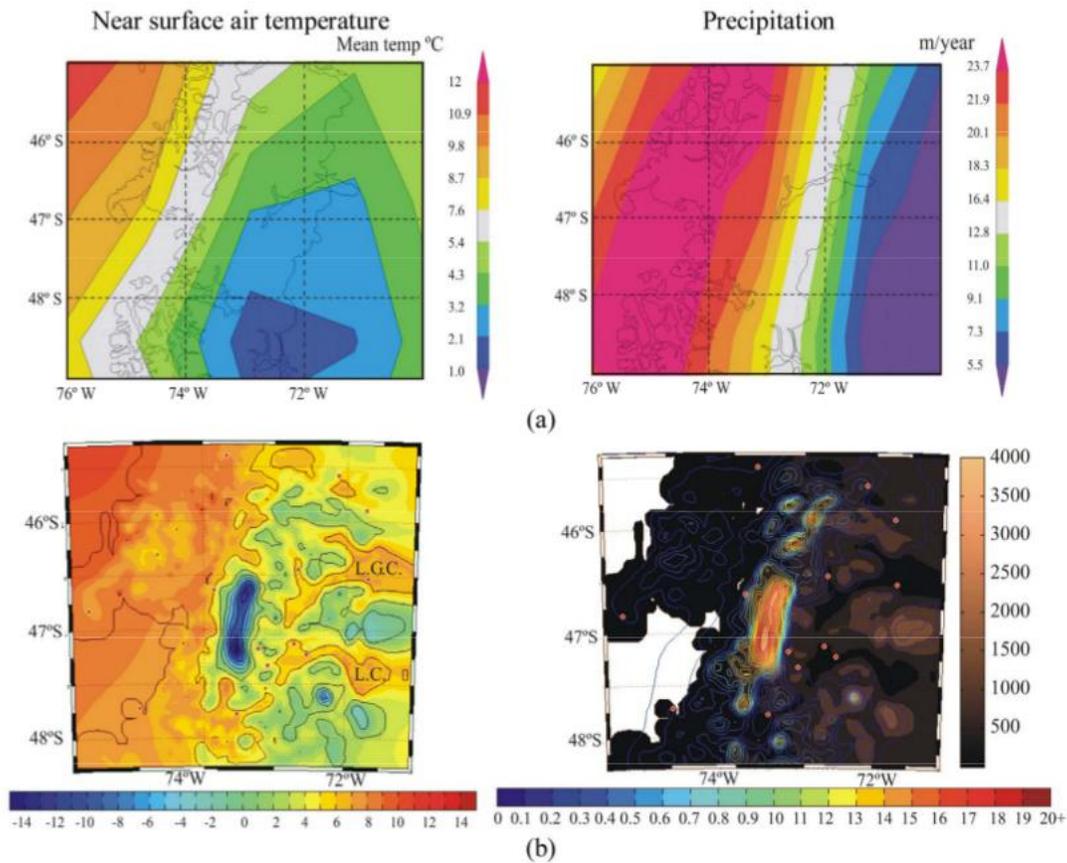


Figura 1.2.2: Promedio anual de la temperatura del aire en superficie (izquierda) y promedio anual de precipitación acumulada (derecha) para el periodo entre 2000-2010. Resultado del modelo de Reanálisis NCAR/NCEP (a), resultados del modelo WRF con una resolución horizontal de 5-km (b) (Villarroel et al., 2013).

Sin embargo, hay que destacar que una mayor resolución horizontal en una simulación no implica resultados mejores, en terrenos donde la base topográfica tenga una resolución menor que las dimensiones de canales o fiordos. Además si las parametrizaciones físicas no son las correctas, tampoco mejorará los resultados aumentar la resolución espacial. Estudiar los vientos con modelos numéricos sobre terrenos costeros complejos adquiere un valor significativo, ya que las características topográficas en las proximidades de las costas montañosas juegan un papel importante en el desarrollo de la brisa del mar y los vientos de ladera, además de la dirección que este alcanza (Miao et al., 2003; Millan et al., 2000). Sin embargo esta tarea se torna más difícil para la Región de Aysén, dado que la base de datos topográficos más alta que posee WRF es de 30" ($\sim 900\text{m}$) (NCAR, 2010), lo que hace imposible representar la realidad geográfica de

ciertos fiordos y/o canales que exhiben dimensiones menores (Fig. 1.2.3) y por lo tanto la circulación local de los vientos controlada por la topografía. Producto de esto surge la necesidad de incorporar una nueva base topográfica con mayor resolución horizontal para esta zona y lograr detallar de mejor forma el terreno y así obtener resultados más ajustados a la realidad.



Figura 1.2.3: Imagen obtenida de Google Earth. las cifras en metros indican el ancho de algunos canales y fiordos de la Región de Aysén que son menores a 900m.

Existen dos modelos de elevación digital globales (GDEM) con resolución de 1" ($\sim 30\text{m}$) que se encuentran de libre acceso para el propósito que la comunidad científica estime conveniente: el GDEM del Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER, Tachikawa et al., 2011), y el GDEM del Shuttle Radar Topography Mission (SRTM, Farr et al., 2007).

ASTER es liberado el 17 de octubre de 2011 en su segunda versión mejorando la primera, lanzada en junio de 2009. Este instrumento fue enviado a bordo del satélite Terra el 18 de diciembre de 1999 y es distribuido por el Ministry of Economy, Trade and

Industry (METI), Earth Remote Sensing Data Analysis Center (ERSDAC) en Japón y por la National Aeronautics and Space Administration (NASA), Earth Observing System (EOS), Data Information System (EOSDIS), Land Processes (LP), Distributed Active Archive Center (DAAC) en Estados Unidos.

El SRTM fue trasladado a bordo del transbordador espacial Endeavour del 11 al 22 febrero de 2000. Este proyecto fue en conjunto con la NASA, las agencias espaciales de Alemania e Italia, y la National Geospatial-Intelligence Agency. Fue dirigido por el Laboratorio de Propulsión de la NASA Jet, en Pasadena, California. El resultado de esta misión fue un modelo de elevación digital (GDEM) para todo el mundo. Recientemente han sido liberados datos para América de Sur con una resolución de 1".

Se han realizado varios estudios alrededor del mundo en donde se modifica la topografía base de WRF para obtener mejores resultados en las variables atmosféricas (Zou et al., 2015 ; Kim et al., 2011 ; De Meij y Vinuesa, 2014; De Meij et al., 2015; Jeong et al., 2012; Garzón, 2014). Uno de ellos se desarrolló para la península de Corea del Sur (Jeong et al., 2012), en donde, además de reemplazar la topografía base de WRF (USGS-900m) por el GDEM del SRTM de 3" ($\sim 90\text{m}$), también se modificó la cobertura del suelo que trae el modelo (USGS-900m) ocupando los datos del EGIS (Environmental Geographic Information System , Peek et al., 2010) también con una resolución de 90m. Se evaluaron vientos en dos regiones costeras diferentes de Corea del Sur. Una costa suroeste bastante compleja, con una serie de islas y una costa oriental simple pero con altas montañas (Fig. 1.2.4).

Los efectos combinados de alta resolución de la cobertura de suelo y topografía (EGIS-90m y SRTM-90m) en la distribución espacial de los vientos costeros de la región suroeste durante el día fueron algo superior a los de la región oriental principalmente debido al calentamiento de la superficie de la tierra o la extensión de la zona costera como consecuencia de cambios en la cobertura de suelo, mientras que estos efectos no eran evidentes durante la noche. En la región oriental, los efectos fueron moderados durante el día, a lo largo de la costa y en lugares del interior debido al aumento signi-

ficativo de la rugosidad y el cambio en la línea de costa. En cambio, durante la noche ocurrieron grandes efectos a lo largo de la costa y el mar adyacente debido al incremento de la rugosidad superficial entre la EGIS-90m y USGS-900m y las elevaciones entre el SRTM-90m y USGS-900m.

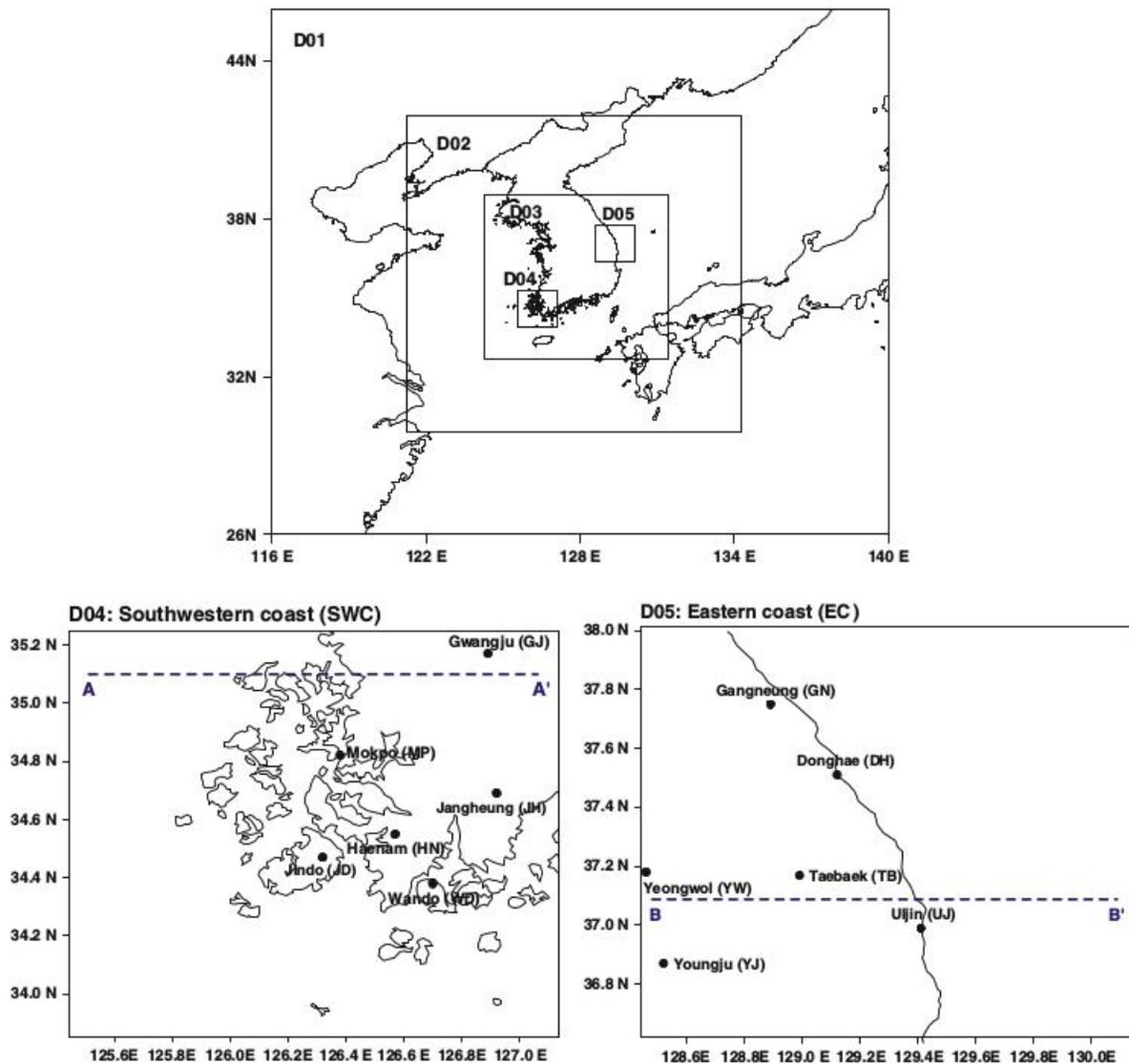


Figura 1.2.4: Dominios anidados sobre Corea del Sur en donde se realizó la simulación. Los cuadros de abajo muestran el detalle de la zona costera compleja y con islas del suroeste (izquierda) y la costa oriental con una costa simple y altas montañas. Los círculos rellenos de la figura indican los lugares de observación (Jeong et al., 2012).

Otro trabajo se centró en la Región de Lombardía, al norte de Italia (Fig. 1.2.5) para los periodos enero-febrero y julio-agosto de 2008. Se evaluó el impacto de la topografía proveniente de SRTM ($\sim 90\text{-m}$) (De Meij y Vinuesa, 2014) y la cobertura de suelo con la misma resolución horizontal proveniente de Corie land Cover (Bossard et al., 2000), en variables meteorológicas (viento a diez metros, temperatura a dos metros y precipitación) simuladas con WRF. Se mostró que las magnitudes del viento, en general, son más bajas en las simulaciones con SRTM y Corie Land Cover que con las simuladas con los datos de 30" de la USGS, principalmente porque Corie Land Cover muestra una mayor fracción de la categoría urbano que el conjunto de datos de la USGS conduciendo a una mayor fricción y rugosidad y por lo tanto disminuyendo la rapidez del viento en niveles cercanos al suelo.

Para el periodo de invierno, la simulación de WRF con SRTM y Corie Land Cover calculó las temperaturas medias más altas sobre el dominio del modelo (entre 0.2°C y 1.0°C y hasta 1.2°C para Milán) que las simulaciones utilizando los datos de USGS y para el periodo de verano las diferencias en las temperaturas medias son más grandes (hasta 2.7°C). Las diferencias están relacionadas con la fracción más alta de la zona urbana en el Corine Land Cover, que afecta a los flujos de calor sensible y latente en el dominio del modelo y mantiene el calor entre los edificios. La comparación de las estadísticas de los tipos de éxito de los eventos de precipitación revela que la probabilidad de detección del evento de precipitación y la puntuación Hansen-Kuipers es en promedio 1% superior en la simulación con SRTM y Corine Land Cover que la simulación WRF con el conjunto de datos estándar del USGS.

Similares resultados se obtuvieron para variables químicas, también para el norte de Italia (De Meij et al., 2015), destacando impactos muy grandes en términos de los indicadores de calidad del aire, mostrando promedios mensuales de CO, NO y SO más altos cuando se utiliza datos SRTM y Corie Land Cover que los del USGS (~ 20 , ~ 50 , y $\sim 55\%$ respectivamente), logrando un mejor acuerdo con las observaciones.



Figura 1.2.5: Mapa de la localización de los dos dominios establecidos para el modelo WRF. El dominio mayor tuvo una resolución horizontal de 5 x 5 km y el menor de 1 x 1 km (De Meij y Vinuesa, 2014).

En el trabajo de Garzón (2014) se utilizan los datos del SRTM con una resolución bastante detallada de 1", para la sabana colombiana (Fig. 1.2,6). Este detalle de la topografía demuestra considerables mejoras en las simulaciones con el modelo WRF. Los resultados arrojaron que la variable elevación es de mayor importancia que el uso de suelos para una mejor representación de la temperatura a 2 metros (T2). La modificación de la variable elevación genera una relocalización de las zonas de precipitación (RAINNC) debido al cambio de la morfología del relieve. Al mejorar la elevación con sus picos en las montañas y no ser tan suavizadas como los datos del modelo WRF se localizan mejor los sistemas de lluvia a sotavento. Los cambios de topografía minimizan los errores sistemáticos que es necesario corregir en post procesos para obtener buenos

pronósticos y evitar algunos procesos de corrección.

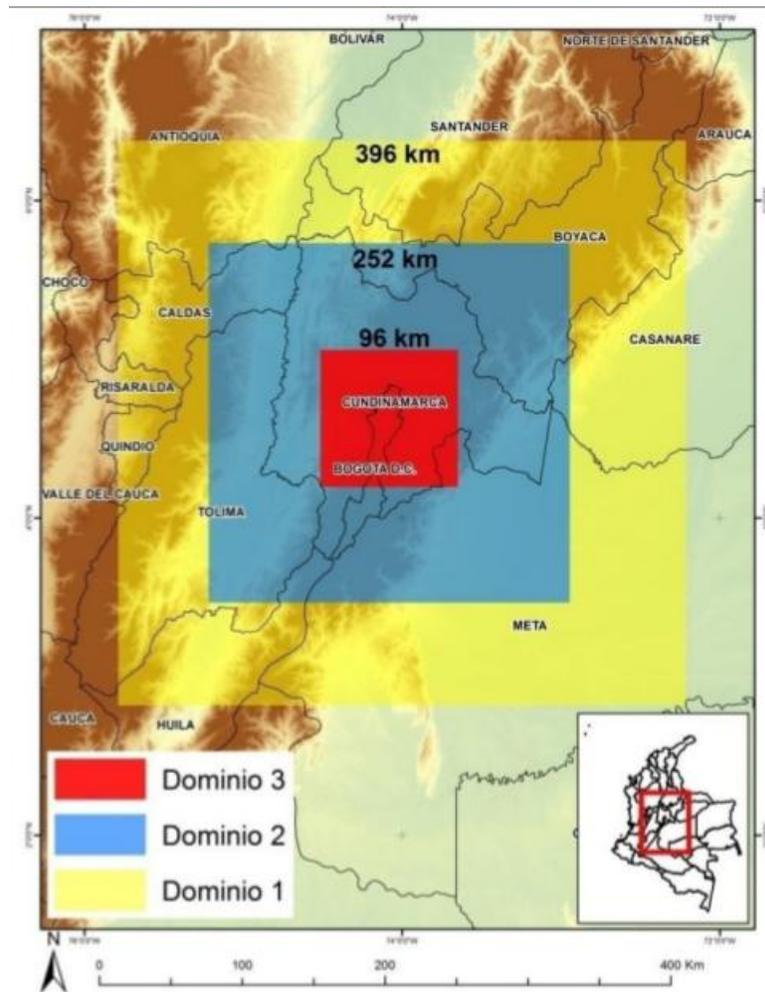


Figura 1.2.6: Reticula de dominios del área de trabajo centrada en la Sabana de Bogotá (Garzón, 2014).

Debido a los limitados estudios haciendo referencia a una mejora, en cuanto al detalle de la topografía y lo necesario que es tener este, al momento de realizar una simulación atmosférica, sobre todo en terrenos complejos como los de la Patagonia chilena, el principal objetivo de esta tesis es llevar a cabo una modelación atmosférica mejorando la resolución del terreno que trae por defecto el modelo WRF para la zona de los canales del mar interior del Sur-Austral de Chile, utilizando los datos de elevación de 1" proporcionados por ASTER. Con esta mejora del terreno se espera que el modelo

resuelva de mejor manera los procesos atmosféricos principalmente para la circulación local de la atmosfera, además de la presión atmosférica y temperatura, ya que son muy importantes al momento de estudiar la circulación de fiordos, el funcionamiento del clima o realizar pronósticos operativos del tiempo para dicha región.

2. Objetivos e Hipótesis

2.1. Objetivos

El objetivo general de este trabajo es analizar las variaciones producidas, principalmente en los vientos, para una sección norte de fiordos y canales de la Región de Aysén, comprendida entre $\sim 41 - 47.4^{\circ}\text{S}$ y $\sim 70,8 - 80.6^{\circ}\text{W}$, en dos simulaciones numéricas de alta resolución (3km), con diferentes fuentes de datos topográficos (USGS de 30" y GDEM de ASTER de 1").

Los objetivos específicos son:

- Llevar a cabo una simulación atmosférica para los fiordos y canales de la Región de Aysén entre el periodo 05/03/2015 y 10/05/2015, utilizando los datos topográficos de mayor resolución horizontal que trae WRF (USGS de 30").
- Realizar una segunda simulación atmosférica para la misma zona y periodo, ocupando como información topográfica el GDEM de alta resolución proveniente del ASTER de 1".
- Hacer una validación estadística para ambas simulaciones con observaciones proporcionadas por el Instituto de Fomento Pesquero (IFOP).
- Hacer un análisis de la distribución espacial y temporal de las diferencias entre las dos simulaciones sobre los fiordos y canales del Sur-Austral chileno para ambas componentes del viento.

2.2. Hipótesis

Al mejorar la resolución horizontal de la topografía del modelo WRF en la zona Sur-Austral de Chile se logrará reproducir de mejor manera la circulación local de los vientos, puesto que esta es controlada por las condiciones geográficas que se presentan en esta región.

3. Metodología

Para cumplir con los objetivos de este trabajo, lo primero fue reemplazar los datos de elevación del terreno que trae el modelo WRF (los cuales ocupa como información de entrada para llevar a cabo una simulación atmosférica), por los del GDEM de 1" proporcionado por ASTER. Para adquirir este producto fue necesario registrarse en la página web del Servicio Sismológico de Estados Unidos (USGS) <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Se descargaron cuadrículas de 1°x1° para la zona de estudio, generando una base de datos topográficos que abarcó entre $\sim 41 - 48^{\circ}\text{S}$ y $\sim 70 - 76^{\circ}\text{W}$ (Fig. 3.0.1). El interés por esta área se debe a la gran irregularidad que presenta su terreno, dificultando la simulación de la circulación atmosféricas utilizando la base topográfica de mayor resolución que incorporó WRF (USGS de 30") puesto que existen canales y fiordos con dimensiones menores a esa. Se establecieron dos escenarios a simular: el primero con los datos topográficos de la USGS de 30" que llamamos *USGS900m* y el segundo con los del GDEM de ASTER de 1", que se nombró como *ASTER30m*, para posteriormente evaluar su impacto en las variables U_{10} , V_{10} , que son las componentes del viento a 10 metros, agregando además a este análisis dos variables disponibles en las observaciones, T_2 y $PSFC$ (temperatura a 2m y presión atmosférica en superficie).

Fue necesario tener un amplio conocimiento del modelo WRF, además de habilidades suficientes para el manejo y análisis de datos. Se necesitó un hardware con la máxima capacidad posible para disminuir los tiempos de ejecución del modelo. Por otro lado fue fundamental el apoyo del Instituto de Fomento Pesquero (IFOP) y sus investigadores de Castro, sede Putemún, para la colaboración con datos de estaciones meteorológicas instaladas por ellos, con el fin de validar estas salidas.

En un principio se trabajó con los datos del GDEM proveniente de SRTM con una resolución de 1", igual que ASTER. Estos datos también fueron obtenidos de la página web de la USGS <http://earthexplorer.usgs.gov/> en cuadrículas de 1°x1° para la región de interés. Sin embargo al visualizar este producto se observaron ciertos errores en la elevación, mostrando cifras muy por debajo de 0m, los cuales no representan la realidad para ciertas zonas (Fig. 3.0.2). Para representar de mejor manera estos errores se obtuvo la diferencia entre el GDEM de SRTM menos el de ASTER (Fig. 3.0.3) y se observaron valores negativos del orden de 10^4 lo cual nos indicó las zonas en las cuales se percibe este error. No obstante fuera de estos desaciertos, el resto de las diferencias mostraron valores muy cercanos a 0m o del orden de las decenas de metros, lo cual nos indica que para aquellas zonas las cantidades están acorde al GDEM de ASTER. Este fue el principal motivo de elegir ASTER y no SRTM para este trabajo.

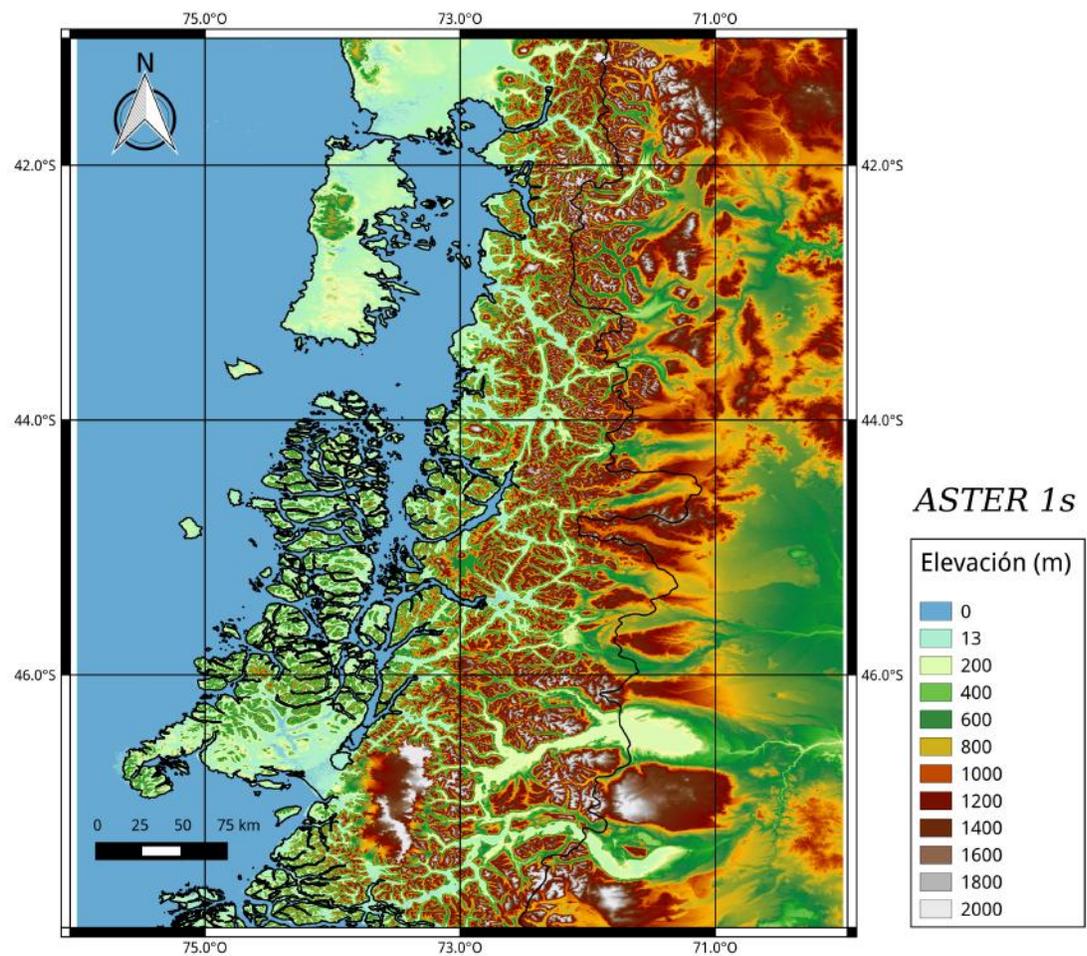


Figura 3.0.1: Topografía proveniente del modelo global de elevación digital ASTER con resolución de 1" incorporados al modelo WRF, para una sección norte de los canales y fiordos del Sur-Austral de Chile, entre $\sim 41 - 48^{\circ}\text{S}$ y $\sim 70 - 76^{\circ}\text{W}$.

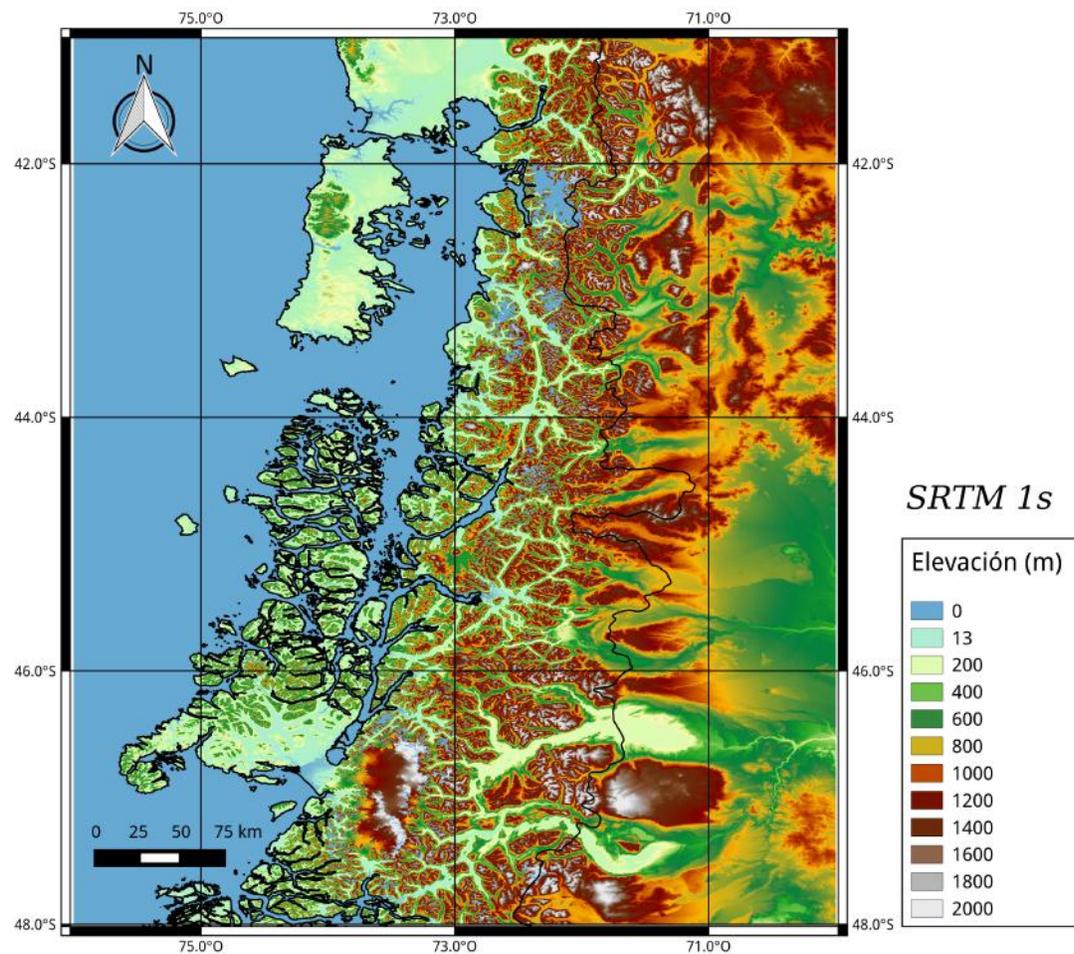


Figura 3.0.2: Topografía proveniente del modelo global de elevación digital SRTM con resolución de 1", para una sección norte de los canales y fiordos del Sur-Austral de Chile, entre $\sim 41 - 48^{\circ}\text{S}$ y $\sim 70 - 76^{\circ}\text{W}$. Se logran apreciar valores por debajo de 0m en sectores donde existe elevación topográfica, principalmente en $\sim 72^{\circ}\text{W}$ y $\sim 42^{\circ}\text{S}$.

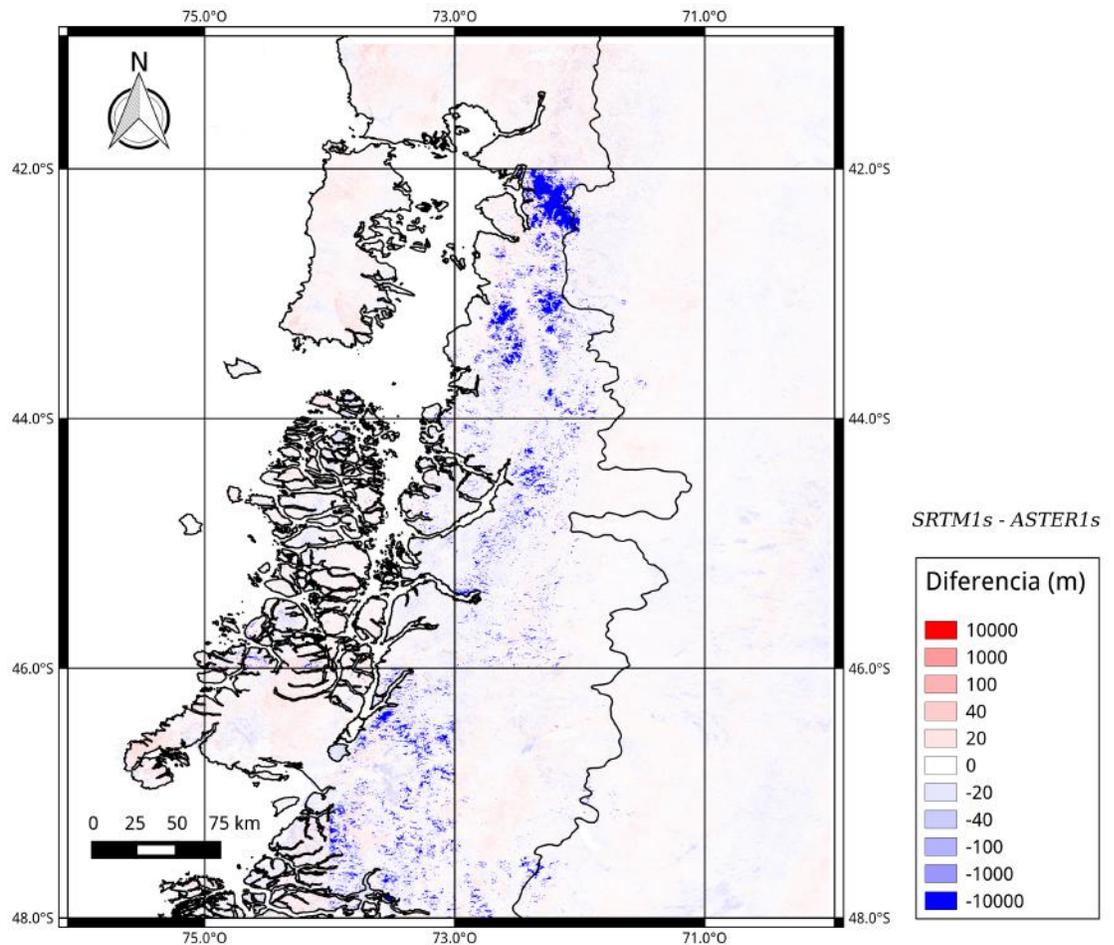


Figura 3.0.3: Diferencia entre los datos de topografía de SRTM y ASTER, para una sección norte de los canales y fiordos del Sur-Austral de Chile, entre $\sim 41 - 48^{\circ}\text{S}$ y $\sim 70 - 76^{\circ}\text{W}$. Los colores azules representan valores negativos del orden de 10^4 lo cual demuestra cifras muy alejadas de la realidad presentes en este GDEM.

3.1. Configuración y pre-pocesamiento del modelo

En primer lugar se delimitó el área de interés para este estudio, por lo cual fue necesario establecer tres dominios; uno padre y dos hijos, siendo el tercer dominio el área a estudiar (Fig. 3.1.1). Se establecieron las resoluciones horizontales para cada dominio, siguiendo una razón de $1/3$ para los dominios hijo con respecto del padre. El primer dominio se configuró con una grilla de 90×69 puntos teniendo estos una distancia entre si de 27km. Al segundo dominio se le asignó una grilla de 157×127 puntos con una resolución horizontal de 9km. Finalmente el dominio tres se estableció con 247×223 puntos de grilla obteniendo este la máxima resolución espacial de 3km. La proyección geográfica que se ocupó fue Lambert, ya que esta es la indicada para latitudes

medias (Snyder, 1982). La resolución horizontal de la base de datos topográficos que se utilizó para cada dominio fue proporcional a la resolución horizontal de cada uno de ellos. Para el primer dominio se asignó una topografía de 10', para el segundo una de 5', y para el tercer dominio se crearon dos escenarios distintos: uno con la base de datos topográficos de 30", *USGS900m* (Fig. 3.1.2) y el otro con la base de datos topográficos de 1", *ASTER30m* (Fig. 3.1.3) (ver detalle de los dominios en Tabla 3.1.1).

Se determinaron las diferencias entre ambos escenarios (*USGS900m* – *ASTER30m*) (Fig. 3.1.4). Los tonos azules del mapa significan subestimaciones de la elevación (o elevaciones menores) por parte de *USGS900m* con respecto a *ASTER30m*, los cuales son de mayor resolución. Esta diferencia se aprecia principalmente en la zona sureste del dominio la cual representa las cimas de las montañas que rodean el lago General Carrera. Por otro lado los tonos rojizos representan una sobrestimación de *USGS900m* (o elevaciones mayores) con respecto a *ASTER30m*. Principalmente se aprecia este margen con valores por sobre 1000m hacia el sur de la zona de estudio, en donde se encuentra el monte San Valentín, puerta norte de los Campos de Hielo Norte.

Dominio	Δx	N° de puntos	Resolución Topográfica
D1	27km	90 x 69	10'
D2	9km	157 x 127	5'
D3 (<i>USGS900m</i>)	3km	247 x 223	30"
D3 (<i>ASTER30m</i>)	3km	247 x 223	1"

Tabla 3.1.1: Resumen con la configuración principal de los distintos dominios.

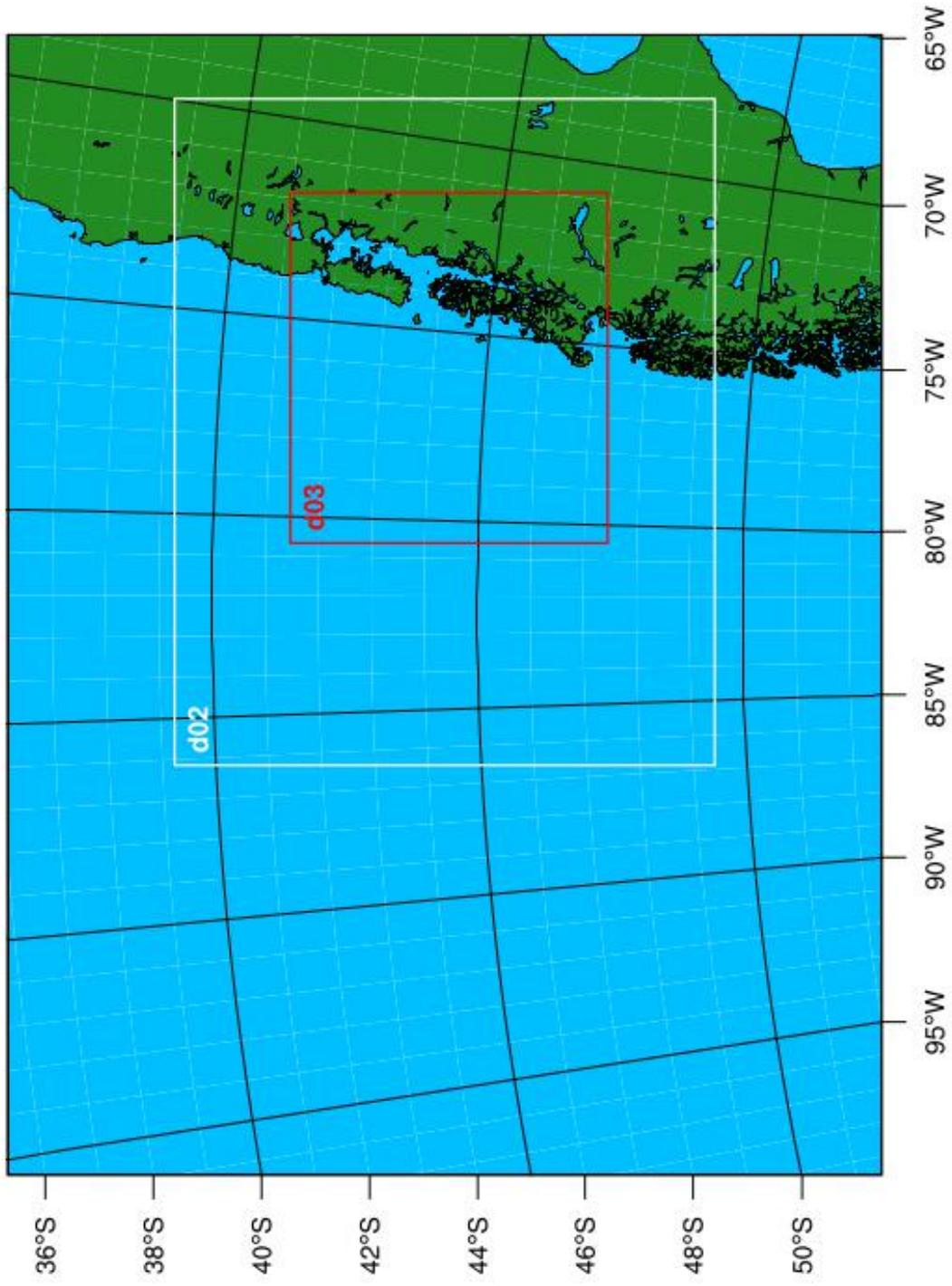


Figura 3.1.1.1: Dominios establecidos para la simulación. El dominio uno se configuró con una resolución espacial de 27km, el dos de 9km y el tercer dominio de 3km.

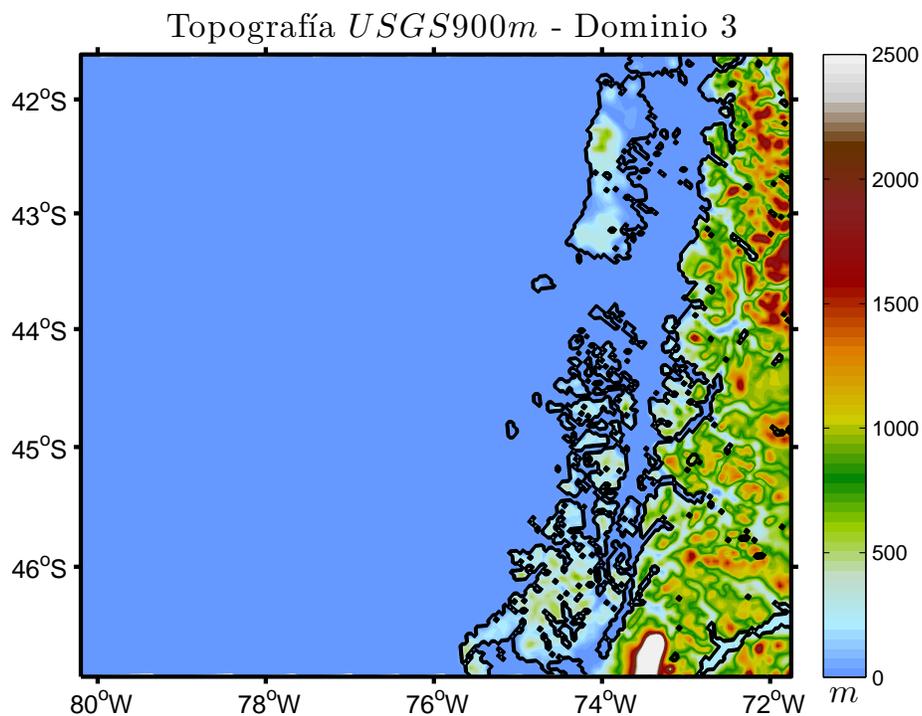


Figura 3.1.2: Escenario topográfico para llevar a cabo la simulación *USGS900m* - Dominio 3.

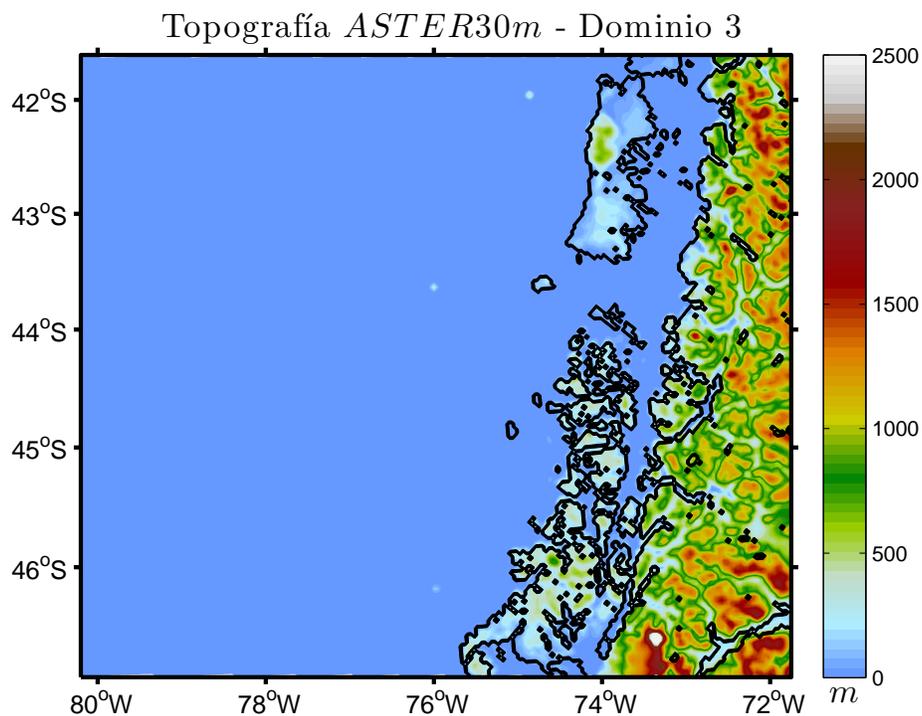


Figura 3.1.3: Escenario topográfico para llevar a cabo la simulación *ASTER30m* - Dominio 3.

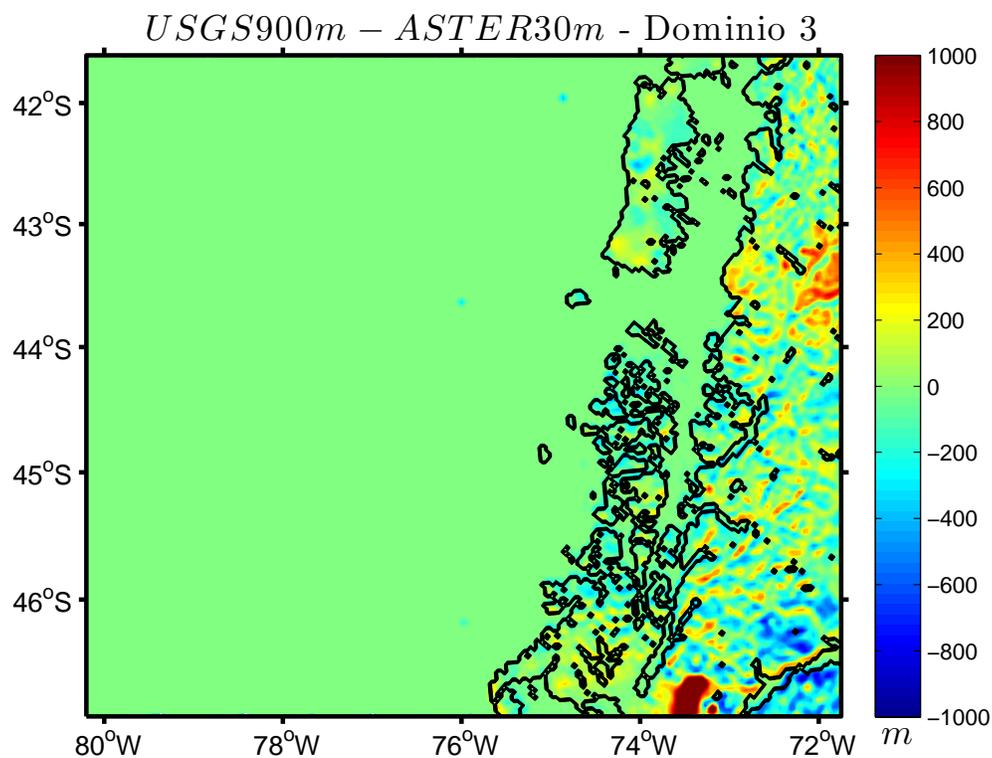


Figura 3.1.4: Diferencia de altura entre ambos escenarios: *USGS900m – ASTER30m* - Dominio 3.

El modelo se configuró para correr por 66 días, desde el 5/3/2015 hasta el 10/5/2015, con una opción de reinicio cada 12 horas. Las salidas se guardaron cada seis, tres y una hora para los dominios uno, dos y tres respectivamente. El periodo de simulación se estableció en función del tiempo de medición de las estaciones instaladas por el IFOP, posibilitando una posterior validación de los resultados. En la vertical contó con 27 niveles que siguen el terreno. Se agregaron 4 estaciones virtuales dentro del modelo las que coinciden con las estaciones meteorológicas (Tabla 3.1.2).

Las condiciones iniciales y de frontera fueron datos FNL del National Center for Environmental Prediction (NCEP) (National Centers for Environmental Prediction, 2000). Estos datos tienen una resolución horizontal de 1°, disponibles cada 6 horas y con una resolución vertical de 26 niveles de presión. Este producto proviene del Global Data Assimilation System (GDAS) que recoge datos continuamente desde el Global Telecommunications System (GTS) y de otras fuentes para variados análisis. Los FNL se hacen con el mismo modelo que NCEP utiliza en el Global Forecast System (GFS), pero

24 characters for name	px	LAT	LON
Pearson	Pears	-44,681	-72,790
Gaviota	Gavio	-44,898	-73,30
Chivato	Chiva	-45,213	-74,223
Vicuna	Vicun	-45,570	-74,150

Tabla 3.1.2: Archivo “tslist” con la lista de estaciones virtuales que se utilizaron para validar el modelo. Consta de cuatro filas: la primera corresponde al nombre, la segunda un prefijo para abreviar el nombre, la tercera y cuarta, latitud y longitud respectivamente.

los FNL se preparan alrededor de 3 horas después que los GFS se han inicializado. Estos datos están disponibles desde el 15/09/1999 y son de libre acceso pudiendo ser descargados, ante previo registro, desde la página web <http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/>.

La parametrización escogida para los procesos de microfísica fue el esquema de Thompson (Thompson et al., 2004). Para la radiación de onda larga se utilizó el esquema RRTM (Mlawer et al., 1997) y para onda corta el de Dudhia (Dudhia, 1989). El quasi-normal scale elimination (QNSE) (Sukoriansky et al., 2005) fue el esquema establecido para la capa superficial y planetaria. Finalmente para la física de cúmulos se fijó el esquema de Kain-Fritsch (Kain y Fritsch, 1990; Kain y Fritsch, 1993) para los dos primeros dominios. Esta configuración se estableció a partir de estudios previos en donde se realizaron modelaciones sobre el territorio Sur-Austral de Chile, específicamente para los Campos de Hielo Norte (Villaruel et al., 2013; Schaefer et al., 2013).

3.2. Post-pocesamiento y validación del modelo

Para la evaluación del modelo se utilizaron los datos de cuatro estaciones meteorológicas, las cuales cuentan con sensor de presión barométrica, sensor de temperatura y sensor de magnitud y dirección del viento. Estas estaciones fueron instaladas por los investigadores del IFOP, tres de ellas (Chivato, Vicuña y Pearson) a 5msnm sobre pontones de centros de cultivos acuícolas (Fig. 3.2.1) y la restante (Gaviota) en un terreno particular del pequeño poblado de Puerto Gaviota, a 2msnm. Todas quedaron en zonas costeras, por lo tanto sujetas a efectos topográficos de los cerros de alrededor. El tiempo de estudio fue de aproximadamente 3 meses. La tabla 3.2.1 muestra las coordenadas geográficas de su ubicación y fecha de inicio y termino de las mediciones, en la figura 3.2.2 se muestra un mapa esquemático con la ubicación de las estaciones.

Estas estaciones meteorológicas fueron configuradas para almacenar datos cada 10 minutos, sin embargo para este estudio se determinó analizar datos cada una hora. Se promediaron los datos cada seis observaciones obteniendo promedios horarios de todas las variables a estudiar. Se definió un periodo de estudio entre el 05/03/2015 y 10/05/2015 ya que dentro de ese periodo fue posible tener datos confiables para todas las observaciones. Finalmente se extrajeron las variables presión atmosférica, temperatura, magnitud y dirección del viento, que son las que se estudiarán en este trabajo. Para las observaciones válidas, se descompuso el viento en las componentes zonal (U) y meridional (V), utilizando la magnitud del viento (M) y su dirección (ϕ), a la cual fue necesario sumarle 180° debido a que las estaciones meteorológicas están configuradas para entregar la dirección de donde proviene el viento, a diferencia de las salidas de WRF que expresan la dirección hacia donde se dirige este.

$$U = M \sin(\phi + 180) \quad (3.2.1)$$

$$V = M \cos(\phi + 180) \quad (3.2.2)$$

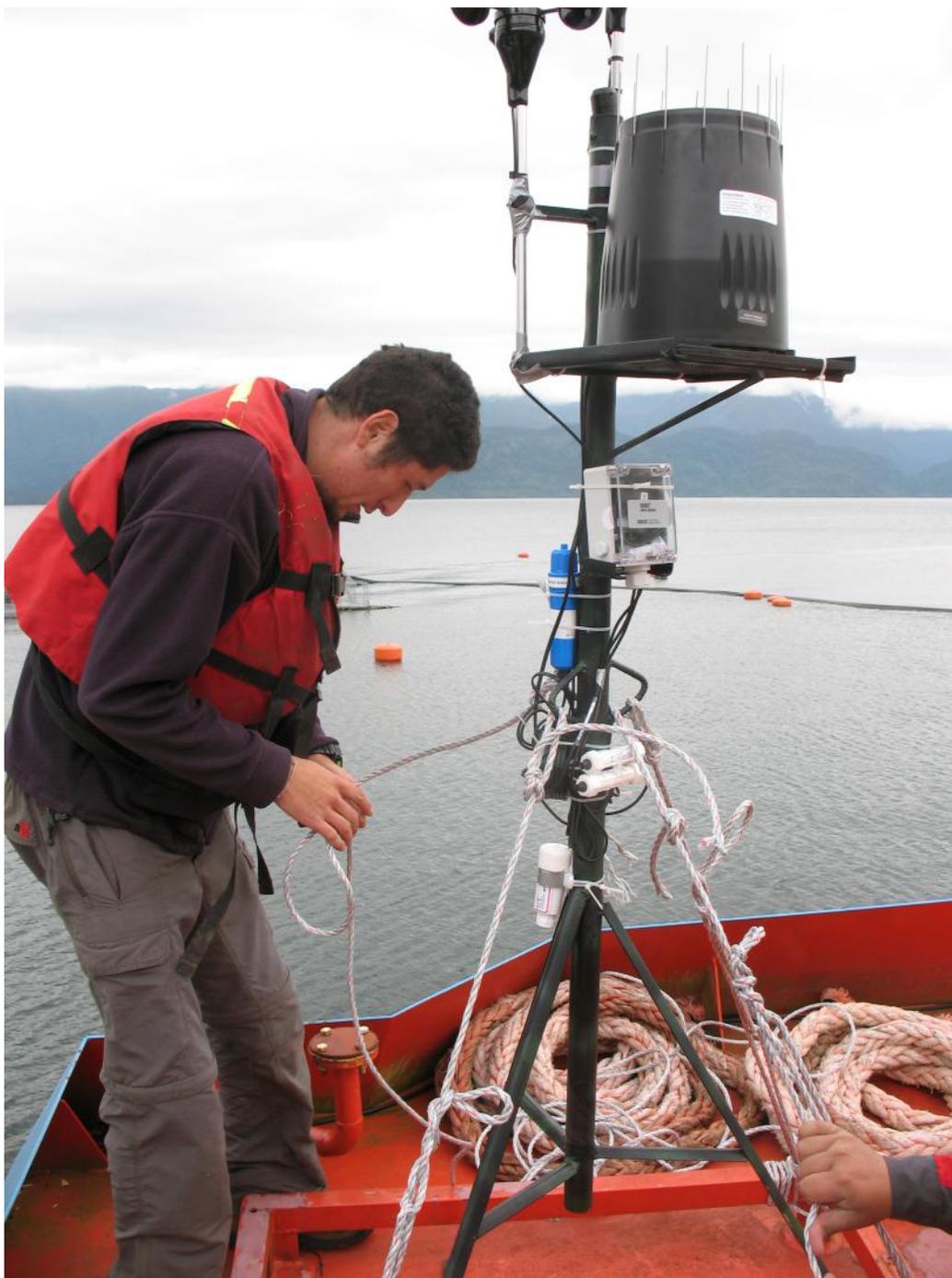


Figura 3.2.1: Imagen representativa de la instalación de las estaciones meteorológicas sobre pontones de centros de cultivo.

Las observaciones fueron utilizadas para comparar con las salidas de alta resolución del modelo, las cuales igual fueron promediadas en registros horarios. Los índices utilizados para la validación de los modelos fueron: la raíz del error cuadrático medio (RECM), el error de sesgo, el cociente entre las desviaciones estándar y la correlación para cada una de las simulaciones (más detalle de estos índices en Anexo B). En primer lugar, se obtuvo el error de sesgo y el cociente entre las desviaciones estándar para toda la serie. Posterior a eso se propuso analizar los procesos que se manifiestan a una escala temporal diaria y sinóptica. Para esto, en primer lugar se estudió el ciclo diario de todas las variables, que se obtuvo mediante el promedio para cada hora del día de los 66 días estudiados, y se procedió a obtener la correlación y el cociente de las desviaciones estándar. Finalmente a la serie se le extrajo el ciclo diario, mediante la resta entre cada hora del día con su promedio correspondiente al ciclo diario, y así obtener procesos a escala sinóptica, para luego calcular la correlación, cociente entre desviaciones estándar y RECM. Los errores obtenidos para las series sin el ciclo diario fueron presentados en un diagrama de Taylor, el cual proporciona una manera gráfica de resumir que tan cerca estuvieron las simulaciones con respecto a las observaciones, cuantificadas en términos de su correlación, raíz del error cuadrático medio, y la amplitud de sus variaciones (representadas por la desviación estándar) (Taylor, 2001).

Para determinar la significancia estadística de las correlaciones entre lo simulado y observado, se utilizó el test de Monte Carlo, el cual consiste en remuestrear el conjunto de datos originales, utilizados para obtener el estadístico de interés (correlación), para luego estimar la distribución nula y comparar el estadístico usando los datos originales (Wilks, 2011). En este caso se utilizó un nivel de confianza del 95 % lo que significa que el estadístico de prueba será considerado significativo solo si su valor es menor al 2.5 % o mayor al 97.5 % de los valores obtenidos mediante el conjunto de datos artificiales.

Paralelo a la validación estadística, se tomó el valor absoluto de los campos de U y V solo para los valores sobre agua y se hizo un análisis de las diferencias entre $USGS900m - ASTER30m$. En primer lugar se promediaron todos los pasos de tiempos y se realizó la resta para las dos componentes de viento y lograr apreciar la distribución

espacial de estas por medio de histogramas. Luego se analizó la distribución temporal de las diferencias obteniendo el promedio y desviación estándar de todos los puntos del campo para cada paso de tiempo con al finalidad de observar si existía un patrón temporal que siguieran estas desigualdades.

Nombre estación	Latitud	Longitud	Fecha de instalación	Fecha de retiro
Pearson	-44,6811	-72,7902	23/02/2015	01/06/2015
Gaviota	-44,89761	-73,3031	25/02/2015	29/05/2015
Chivato	-45,21297	-74,2227	27/02/2015	21/05/2015
Vicuña	-45,57016	-74,1502	04/03/2015	25/05/2015

Tabla 3.2.1: Ubicación y fechas de instalación y retiro de las estaciones meteorológicas montadas por el IFOP.

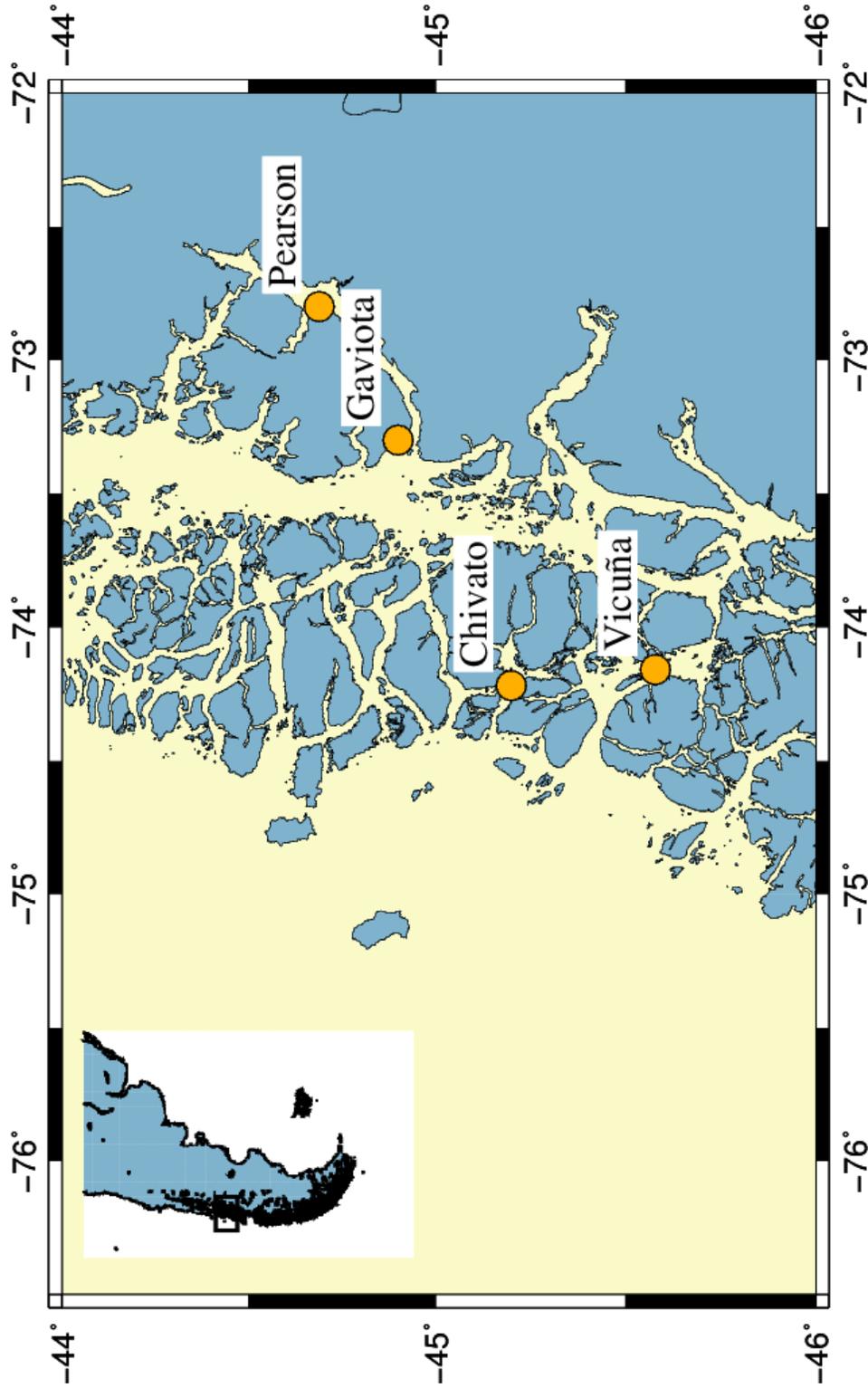


Figura 3.2.2: Mapa con la ubicación de las estaciones meteorológicas instaladas por el IFOP.

4. Resultados y Discusión

4.1. Series de tiempo

A continuación se presentan las series de tiempo obtenidas de las simulaciones *USGS900m*, *ASTER30m* y observaciones para la presión atmosférica (Fig. 4.1.1), temperatura (Fig. 4.1.2), viento zonal U (Fig. 4.1.3), viento meridional V (Fig. 4.1.4) y magnitud del viento (Fig.4.1.5), de todas las estaciones.

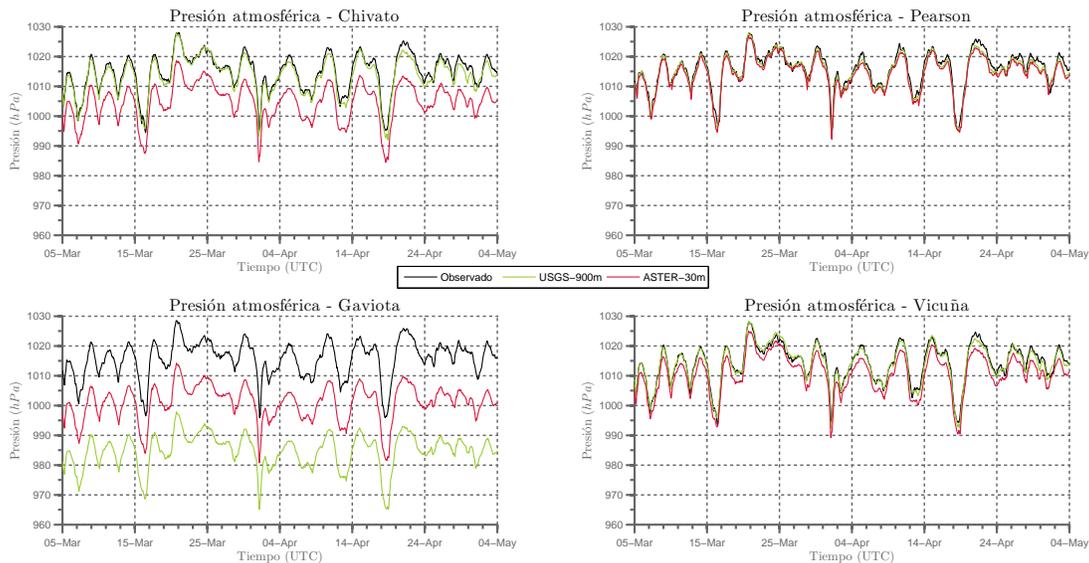


Figura 4.1.1: Series de tiempo entre el 05/03/2015 y 10/05/2015 para la presión atmosférica en superficie. Observaciones en negro, *USGS900m* en verde y *ASTER30m* en rojo. Los paneles de la derecha corresponden a Pearson y Vicuña en los cuales se mostró un ajuste considerable de las simulaciones respecto a las observaciones. El panel superior izquierdo corresponde a Chivato, en donde se destaca una subestimación del promedio por parte de *ASTER30m* respecto a lo observado. El panel inferior izquierdo hace referencia a la estación de Gaviota en donde ambas simulaciones subestimaron el promedio de las observaciones. *USGS900m* tuvo un sesgo de aproximadamente el doble que *ASTER30m*.

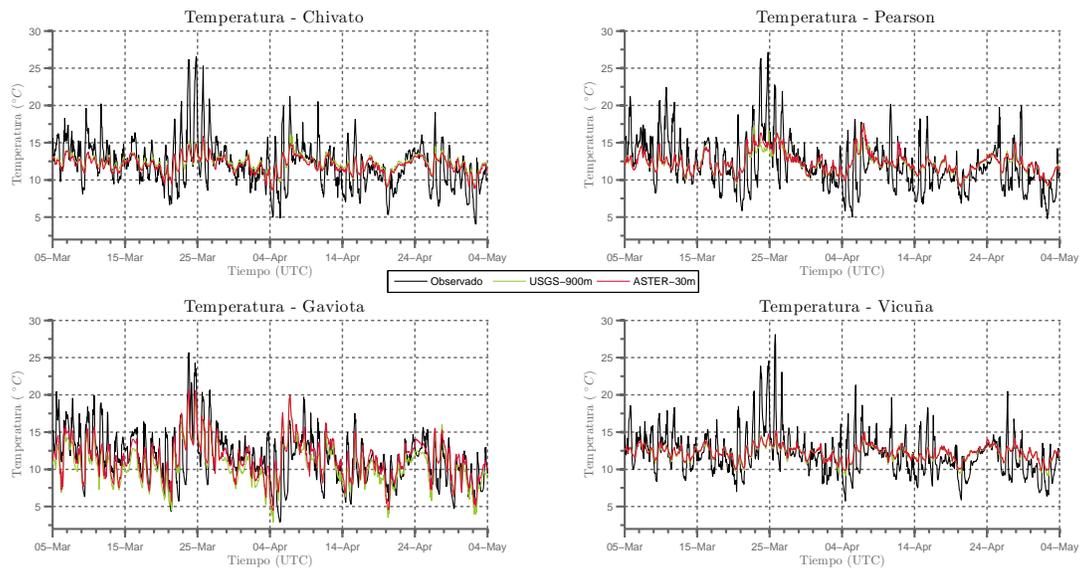


Figura 4.1.2: Series de tiempo entre el 05/03/2015 y 10/05/2015 para la temperatura. Observaciones en negro, *USGS900m* en verde y *ASTER30m* en rojo. Todas las simulaciones se ajustaron de buena manera en términos de promedio. Chivato, Pearson y Vicuña presentaron una notoria subestimación de la amplitud. Gaviota por su lado tuvo un mejor ajuste de la amplitud.

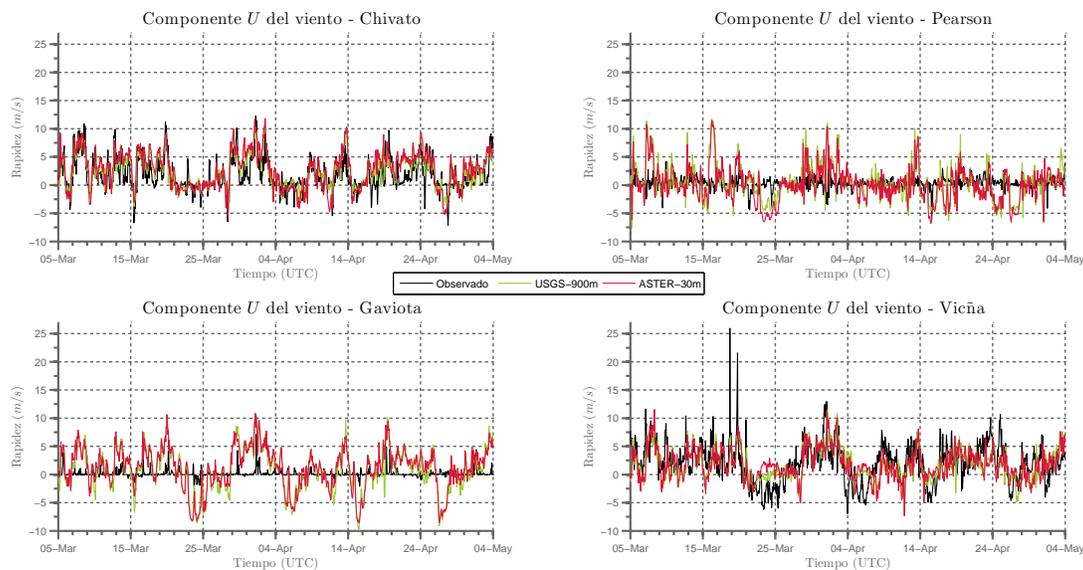


Figura 4.1.3: Series de tiempo entre el 05/03/2015 y 10/05/2015 para U . Observaciones en negro, $USGS900m$ en verde y $ASTER30m$ en rojo. Todos los datos tienen un ajuste considerable en términos de promedio. Chivato y Vicuña representaron de mejor manera la amplitud que Pearson y Gaviota en donde se presentó una notoria sobrestimación de la amplitud.

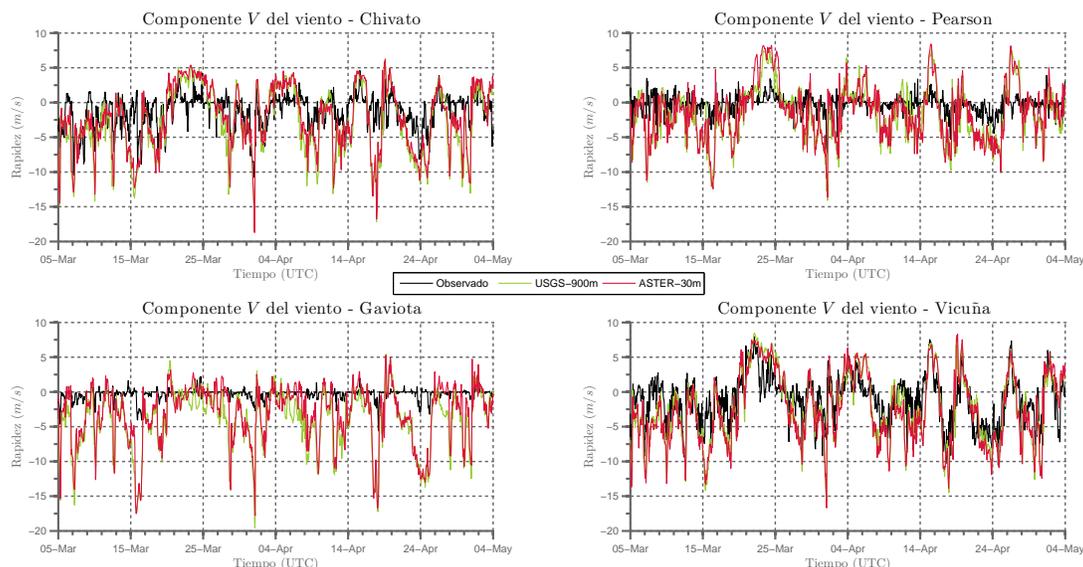


Figura 4.1.4: Series de tiempo entre el 05/03/2015 y 10/05/2015 para V . Observaciones en negro, $USGS900m$ en verde y $ASTER30m$ en rojo. Esta figura destaca sobrestimaciones de la amplitud para Pearson y Gaviota. Por otro lado, Chivato y Vicuña mostró mejores ajustes en término de amplitud. Se aprecia además un ajuste en el promedio para todas las estaciones.

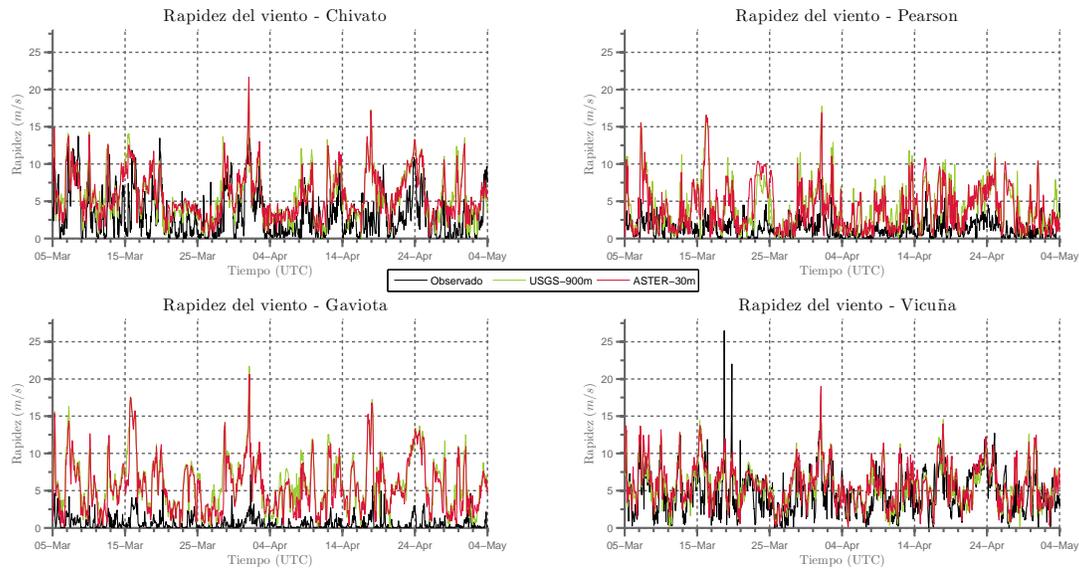


Figura 4.1.5: Series de tiempo entre el 05/03/2015 y 10/05/2015 para la rapidez del viento. Observaciones en negro, *USGS900m* en verde y *ASTER30m* en rojo. Se destacan vientos mucho más intensos para las estaciones de Chivato y Vicuña en las cuales las amplitudes de las simulaciones se acercaron bastante. Gaviota y Pearson mostró vientos más débiles los cuales fueron subestimados por las simulaciones.

Sesgo

En la Tabla 4.1.1 se muestran los valores del sesgo para las dos simulaciones con WRF respecto de las observaciones. Para la presión atmosférica se logra apreciar un notorio sesgo en algunas estaciones entre los datos observados y los modelos. Los sesgos más evidentes se observan en las estaciones de Chivato y Gaviota. La simulación *USGS900m* para Chivato tuvo un sesgo de $-1.38hPa$ y con *ASTER30m* de $-9.97hPa$. Para Gaviota *USGS900m* tuvo un sesgo de $-31.06hPa$ y *ASTER30m* $-14.77hPa$. Por otro lado Pearson y Vicuña tuvieron un sesgo más discreto. Para Pearson *USGS900m* se obtuvo un sesgo de $-0.86hPa$ y para *ASTER30m* $-1.67hPa$. Finalmente en Vicuña *USGS900m* mostró un sesgo de $-0.33hPa$ y para *ASTER30m* $-3.46hPa$. Se puede afirmar que este es un sesgo sistemático, que se sostiene a lo largo de toda la serie y es ocasionado debido a las diferencias de altura en las cuales se están resolviendo las ecuaciones con respecto a las observaciones. Estas desigualdades de elevación entre ambos modelos son producto de las distintas resoluciones topográficas utilizadas (Fig. 4.1.6). Recordemos que la definición de presión atmosférica es la fuerza por unidad de área que ejerce el aire sobre la superficie, por lo tanto si estamos a mayor altura tendremos

menor masa de aire y a la vez habrá menor presión atmosférica. Una aproximación que utiliza WRF para calcular la presión en un punto es el balance hidrostático, el cual postula que la fuerza del gradiente de presión vertical está en equilibrio con la fuerza de gravedad.

$$\frac{dp}{dz} = -\rho g \quad (4.1.1)$$

Donde $\frac{dp}{dz}$ es el gradiente de presión con respecto a la altura, ρ es la densidad del aire y g es la fuerza de gravedad, el signo negativo confirma que la presión disminuye con la altura. A pesar de que este balance es válido solo para una atmósfera en reposo, se cumple en la mayoría de las condiciones, siendo una aproximación meteorológica muy útil.

La diferencia entre las alturas solo se ve reflejada en el sesgo (en términos de error), ya que esta no influye en la correlación y amplitud de las señales. El único estadístico que depende de este es el RECM, sin embargo al extraer el promedio y el ciclo diario de las series se elimina este error, como se estudiará más adelante, por lo tanto podemos despreciarlo.

Para el caso de las temperaturas, en ambas simulaciones vemos que los valores de sesgo son muy bajos, para las cuatro estaciones. El promedio de las simulaciones se acercó bastante a las observaciones. Gaviota tuvo una subestimación del promedio de $-0.98^{\circ}C$ con *USGS900m* y $-0.17^{\circ}C$ con *ASTER30m*. En el resto de las estaciones se apreciaron sobrestimaciones. Chivato tuvo un sesgo de $0.26^{\circ}C$ con *USGS900m* y $0.03^{\circ}C$ con *ASTER30m*. Pearson y Vicuña mostraron sesgos más similares entre ambas simulaciones, desde $0.23^{\circ}C$ a $0.52^{\circ}C$. A pesar de las diferencias obtenidas entre ambas simulaciones, estas no son relevantes puesto que son del orden de las décimas y centésimas de magnitud.

En el caso de los vientos, los sesgos de la componente zonal también son bajos. Para Vicuña existió una subestimación del promedio por parte de *USGS900m* con

$-0,41m/s$ y *ASTER30m* con $-0,32m/s$. Para Pearson fue $0.07m/s$ con *USGS900m* y una subestimación con *ASTER30m* de $-0.25m/s$, finalmente para Chivato y Gaviota se contempló una sobrestimación de $0.59m/s$ y $0.52m/s$ con *USGS900m* y $0.87m/s$ y $0.78m/s$ con *ASTER30m*.

Para la componente meridional se apreció una subestimación en todas las estaciones para ambas simulaciones que oscilan entre $-1.00m/s$ y $-1.74m/s$ para Chivato, Pearson y Vicuña, sin embargo Gaviota mostró las mayores subestimaciones con valores de $-3.77m/s$ para *USGS900m* y $-2.87m/s$ con *ASTER30m*. Esto se explica por una exageración del valor de la componente V que representa vientos del norte.

La intensidad del viento es sobrestimada por las dos simulaciones en todas las estaciones con valores entre $1.16m/s$ y $2.90m/s$ exceptuando Gaviota que tuvo valores más altos; $5.40m/s$ con *USGS900m* y $4.93m/s$ con *ASTER30m*. Esto se puede explicar, en gran parte, por la diferencia de altura entre las observaciones (5m en Pearson, Chivato y Vicuña y 2m en Gaviota) y los datos simulados (10m), puesto que los vientos observados están más cerca de la superficie, por lo tanto su velocidad disminuye principalmente por la fricción que genera el terreno. De igual manera que la temperatura, las diferencias que se presentan en los vientos son del orden de las décimas de m/s , por lo tanto no son destacables.

Estación	Simulación	Presión	Temperatura	U	V	Mag. Viento
Chivato	<i>USGS900m</i>	-1.38	0.26	0.59	-1.74	2.56
	<i>ASTER30m</i>	-9.97	0.03	0.87	-1.00	2.50
Pearson	<i>USGS900m</i>	-0.86	0.43	0.07	-1.42	2.90
	<i>ASTER30m</i>	-1.67	0.52	-0.25	-1.12	2.70
Gaviota	<i>USGS900m</i>	-31.06	-0.98	0.52	-3.77	5.40
	<i>ASTER30m</i>	-14.77	-0.17	0.78	-2.87	4.93
Vicuña	<i>USGS900m</i>	-0.33	0.23	-0.41	-1.27	1.16
	<i>ASTER30m</i>	-3.46	0.28	-0.32	-1.51	1.34

Tabla 4.1.1: Sesgo entre las simulaciones *USGS900m* y *ASTER30m* y los datos observados, para la presión (hPa), temperatura ($^{\circ}C$), viento zonal (m/s), viento meridional (m/s) y magnitud del viento (m/s) en todas las estaciones.

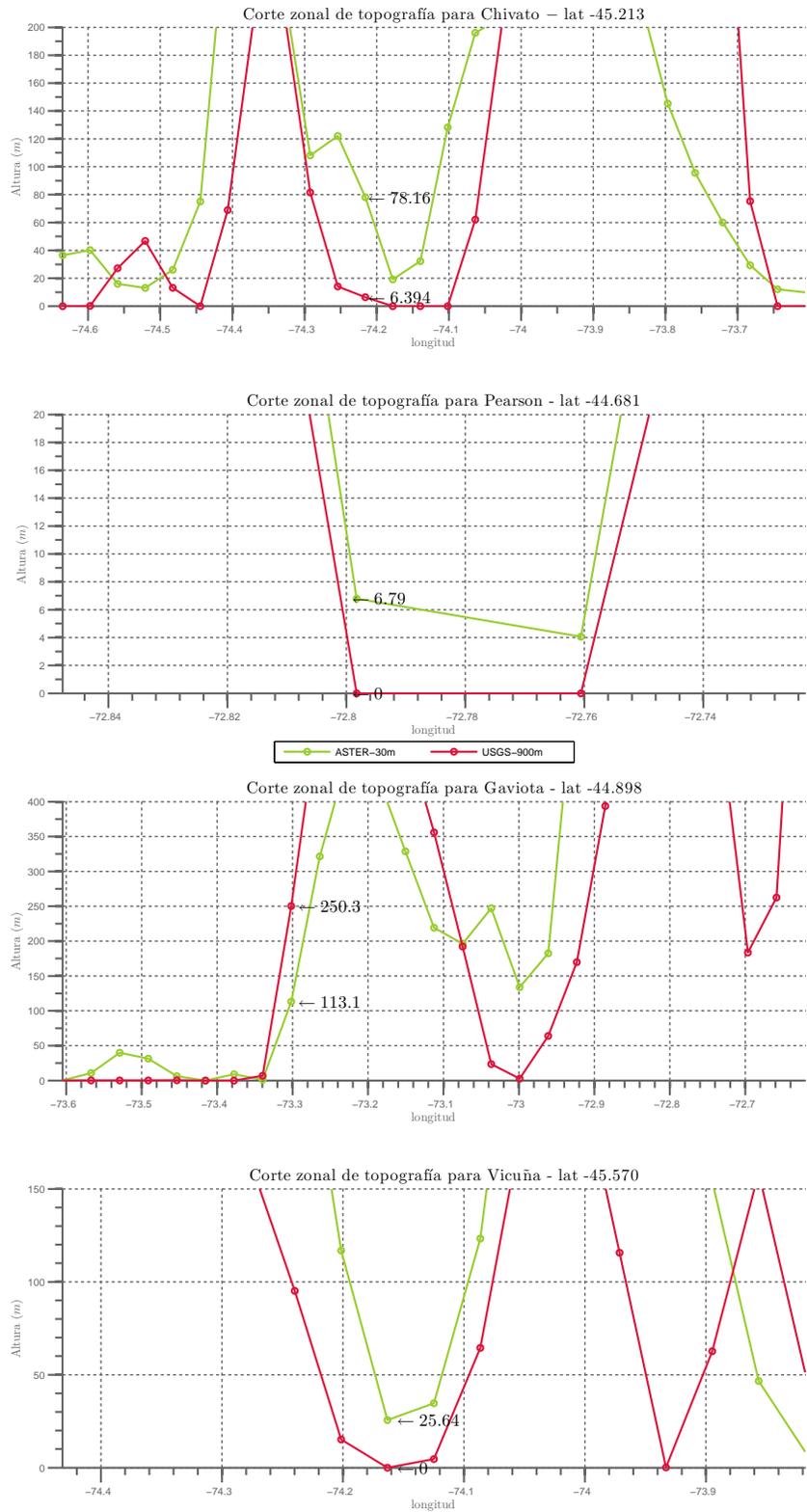


Figura 4.1.6: Acercamiento del corte zonal de la topografía para todas las estaciones virtuales. En verde *ASTER30m* y rojo *USGS900m*.

Cociente entre las desviaciones estándar

Las amplitudes de las simulaciones se muestran en la Tabla 4.1.2. Para la presión atmosférica en superficie todos los valores se aproximaron a 1, lo que significa que las amplitudes de los datos observados son bien representadas por ambas simulaciones.

En el caso de la temperatura existe una evidente subestimación de la amplitud por parte de las simulaciones en todas las estaciones, con valores que fluctúan entre 0.33 y 0.41, excepto Gaviota que tiene valores de 0.79 para *USGS900m* y 0.77 para *ASTER30m*. La razón de esto es producto del uso de suelo de la USGS que se estableció para ejecutar el modelo. Como se aprecia en la Tabla 4.1.3 todas las estaciones, menos Gaviota, quedaron sobre agua lo que da paso a una amortiguación de la oscilación térmica en esos puntos de la grilla, sin embargo como Gaviota quedo sobre bosques mixtos la oscilación térmica se acerca más a la realidad. Se presentaron diferencias menores entre ambas simulaciones del orden de la centésima las cuales no son significativas para este caso.

Finalmente, en la magnitud de los vientos, como para sus dos componentes, U y V , se observa un ajuste cercano en la amplitud simulada con respecto a la observada para las estaciones de Chivato y Vicuña, con valores que varían entre 0.87 y 1.15 para U , 1.43 y 1.96 para V , y 0.99 y 1.12 para la magnitud del viento. sin embargo para Pearson y Gaviota se apreciaron sobrestimaciones mayores. Pearson obtuvo entre 3.22 y 3.46 para U y V , y para la magnitud del viento 2.74 con *USGS900m* y 2.69 con *ASTER30m*. Finalmente Gaviota mostró las mayores sobrestimaciones con valores de ~ 6 para U y V y ~ 4 para la rapidez del viento. Las sobrestimaciones de la amplitud de los resultados por parte del modelo se explica, en parte, debido a que la salida de vientos de WRF es a 10 metros de altura y el sensor de vientos en las estaciones meteorológicas fue instalado aproximadamente a 5 metros de altura, a excepción de Gaviota la cual fue instalada a 2 metro de altura y es precisamente en donde se obtuvieron las mayores sobrestimaciones. Por lo tanto los vientos observados en las estaciones, sobre todo en Gaviota, claramente son más suaves en comparación a los vientos a 10 metros, principalmente por la rugosidad del suelo, provocándoles una desaceleración.

Estación	Simulación	Presión	Temperatura	U	V	Mag. Viento
Chivato	<i>USGS900m</i>	1.02	0.35	0.99	1.96	1.12
	<i>ASTER30m</i>	0.99	0.35	1.15	1.82	1.02
Pearson	<i>USGS900m</i>	1.02	0.40	3.46	3.22	2.74
	<i>ASTER30m</i>	1.02	0.41	3.22	3.25	2.69
Gaviota	<i>USGS900m</i>	0.98	0.79	6.04	6.07	4.23
	<i>ASTER30m</i>	1.00	0.77	5.90	6.07	4.02
Vicuña	<i>USGS900m</i>	1.02	0.34	0.89	1.43	0.99
	<i>ASTER30m</i>	1.02	0.33	0.87	1.47	1.01

Tabla 4.1.2: Cociente de las desviaciones estándar entre las simulaciones *USGS900m* y *ASTER30m* y los datos observados, para la presión, temperatura, viento zonal U , viento meridional V y magnitud del viento en todas las estaciones.

Nombre estación	Categoría Uso de Suelo	Descripción Uso de Suelo
Pearson	16	Cuerpo de agua
Gaviota	15	Bosque mixto
Chivato	16	Cuerpo de agua
Vicuña	16	Cuerpo de agua

Tabla 4.1.3: Uso de suelo correspondiente para cada cuadrícula de grilla en donde se encuentran las “estaciones virtuales” definidas en el archivo “tslist”.

4.2. Ciclo diario

Para tener un mejor detalle de los procesos atmosféricos en distintas escalas temporales se analizó la correlación y cociente entre las desviaciones estándar, en primer lugar, para el ciclo diario de todas las series de tiempo. Luego se les extrajo el promedio del tiempo estudiado, para comparar mejor estas señales en términos de su amplitud. Los ciclos diarios se obtuvieron para la presión atmosférica (Fig. 4.2.1), la temperatura (Fig. 4.2.2), viento zonal U (Fig. 4.2.3), viento meridional V (Fig. 4.2.4) y magnitud del viento (Fig. 4.2.5), en todas las estaciones.

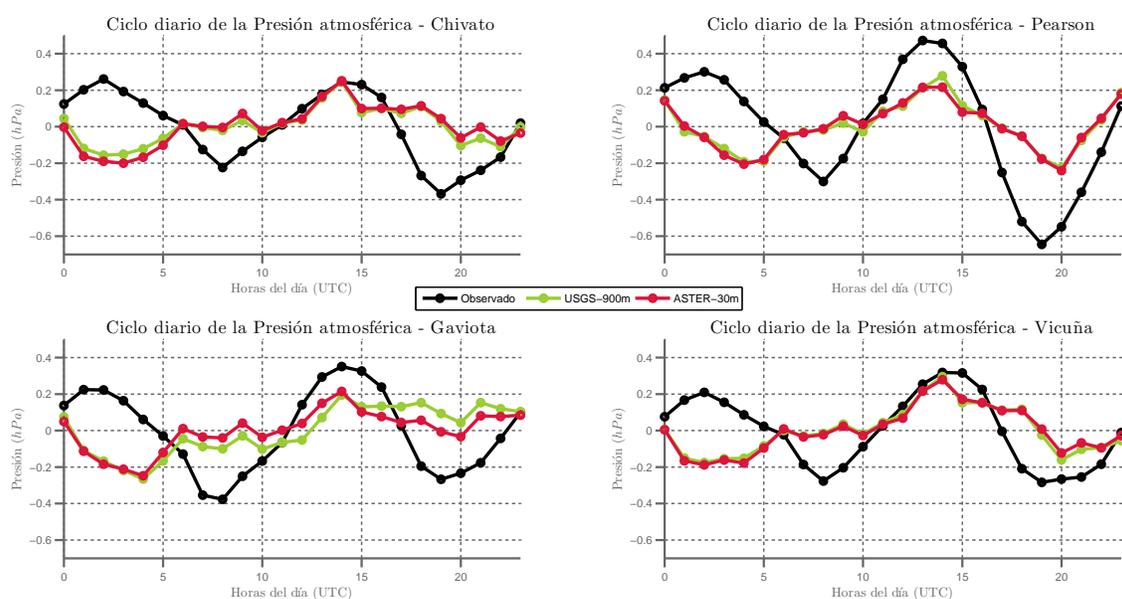


Figura 4.2.1: Anomalías del ciclo diario, para la presión atmosférica. Observaciones en negro, *USGS900m* en verde y *ASTER30m* en rojo para todas las estaciones.

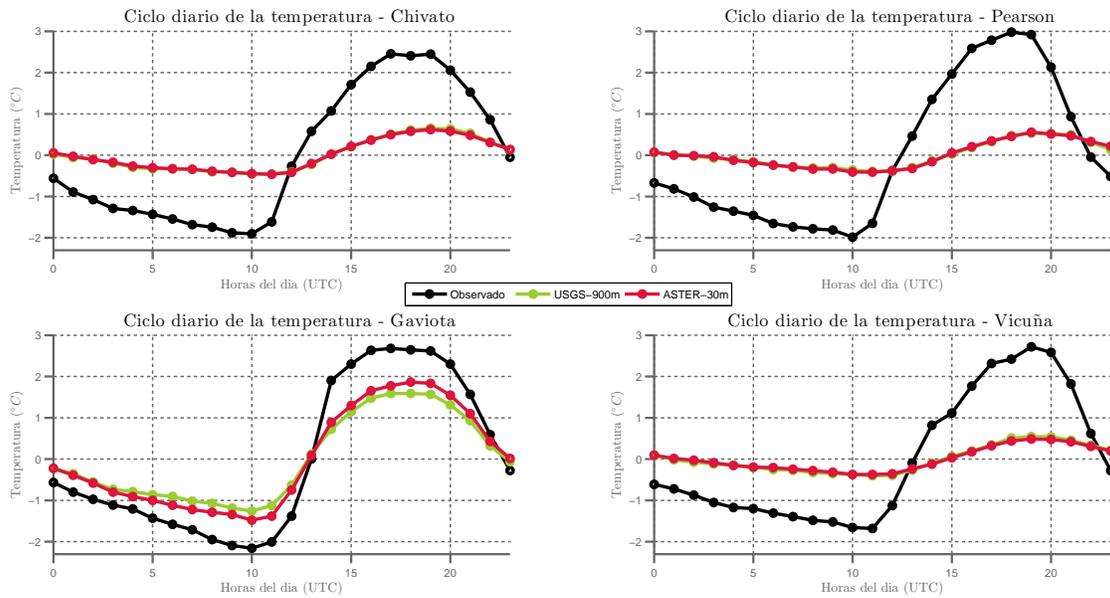


Figura 4.2.2: Anomalías del ciclo diario, para la temperatura, con los datos observados en negro, datos modelados *USGS900m* en verde y *ASTER30m* en rojo, para todas las estaciones.

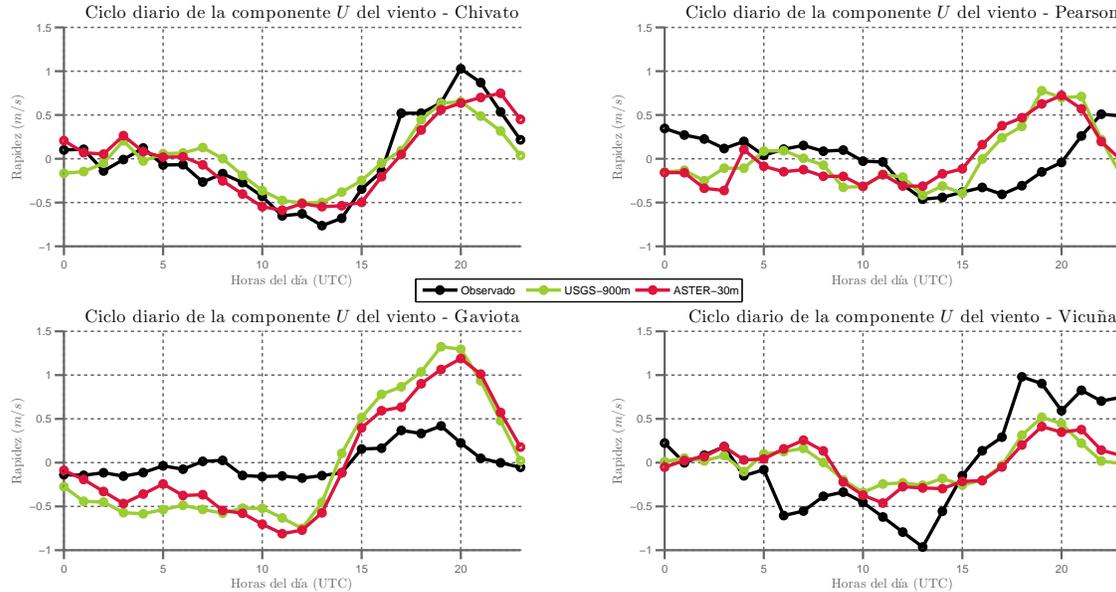


Figura 4.2.3: Anomalías del ciclo diario, para la componente zonal del viento U , con los datos observados en negro, datos modelados *USGS900m* en verde y *ASTER30m* en rojo, para todas las estaciones.

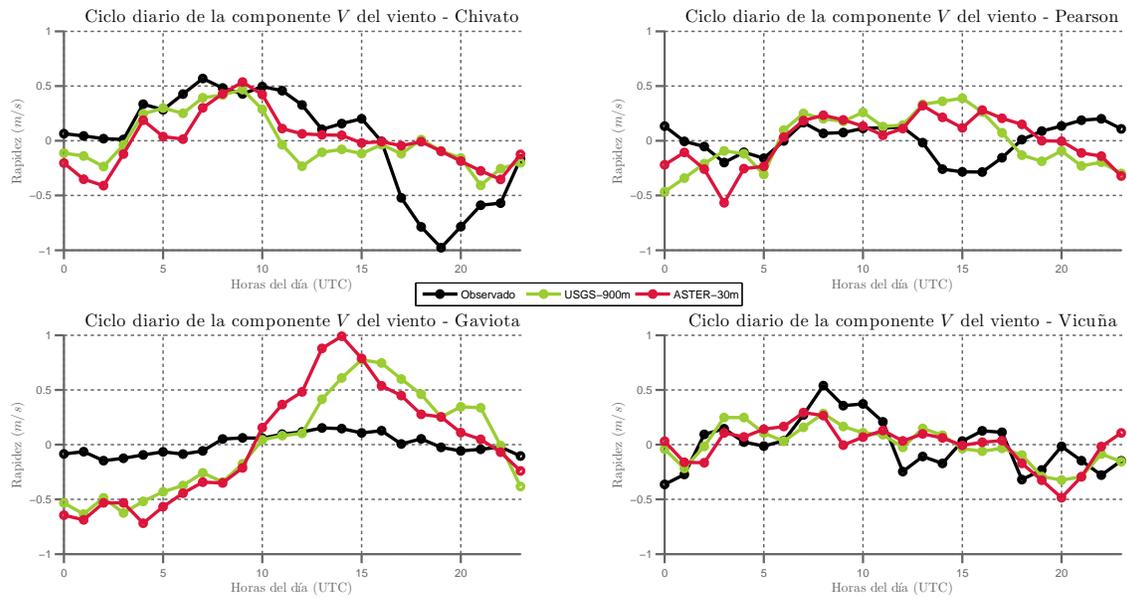


Figura 4.2.4: Anomalías del ciclo diario, para la componente meridional del viento V , con los datos observados en negro, datos modelados $USGS900m$ en verde y $ASTER30m$ en rojo, para todas las estaciones.

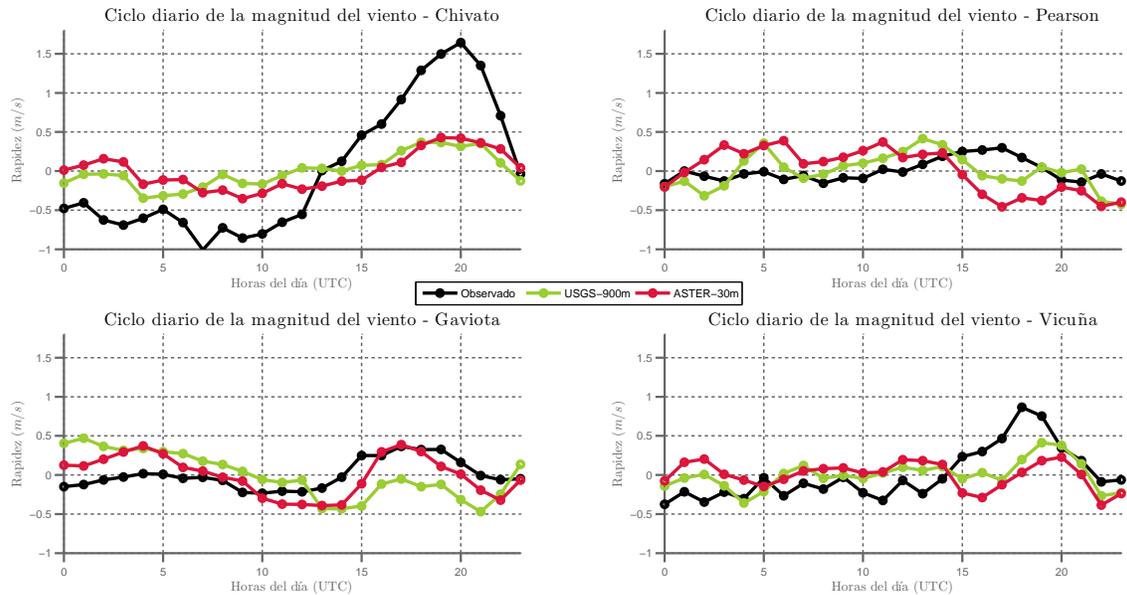


Figura 4.2.5: Anomalías del ciclo diario, para la magnitud del viento, con los datos observados en negro, datos modelados $USGS900m$ en verde y $ASTER30m$ en rojo, para todas las estaciones.

Correlación

Las correlaciones del ciclo diario entre los datos observados y las distintas simulaciones se exponen en la Tabla 4.2.1. Para determinar la significancia estadística de las correlaciones se utilizó el test de Monte Carlo a un nivel de confianza del 95 %. Para la presión atmosférica en superficie, ambas simulaciones muestran valores muy bajos de correlación en Chivato, Gaviota y Vicuña, con valores entre -0.09 y 0.37, los cuales no son significativos. Los valores más altos y significativos se presentan en Pearson que bordean los 0.6 para las dos simulaciones. El ciclo diario de los datos observados presenta dos máximos, esto se conoce como las mareas atmosféricas las cuales son difíciles de resolver para WRF debido a su alta resolución temporal. Además es muy probable que los forzantes utilizados para construir el modelo no traigan las mareas atmosféricas incluidas, por lo tanto no se ven representadas en las simulaciones.

Para la temperatura del aire a 2m los coeficientes de correlación fueron significativamente altos. Pearson obtuvo los valores más bajo: 0.77 con *USGS900m* y 0.76 con *ASTER30m*. El resto entregó coeficientes entre 0.89 y 0.99. Ambas simulaciones representaron muy bien la fase del ciclo diario de temperatura observada.

En el caso del viento, Pearson obtuvo correlaciones no significativas para la componente U , con valores de 0.09 con *USGS900m* y -0.06 con *ASTER30m*. Para el resto de las simulaciones se obtuvieron correlaciones significativas y muy similares para ambas simulaciones, con valores entre 0.67 y 0.92. Para la componente V hubo algunos cambios. Pearson obtuvo correlaciones más bajas, por lo tanto no significativas, -0.32 con *USGS900m* y -0.04 con *ASTER30m*. El resto de las correlaciones fueron significativas. Gaviota tuvo una mejora de 0.73 para *USGS900m* a 0.84 para *ASTER30m* y Vicuña de bajó de 0.61 con *USGS900m* a 0.45 con *ASTER30m*. Chivato se mantuvo igual con un coeficiente de correlación de 0.61. Para la magnitud del viento se mostraron cambios más notorios, excepto Chivato que obtuvo correlaciones significativas de 0.89 con *USGS900m* y 0.82 con *ASTER30m*. Pearson tuvo correlaciones no significativas de 0.28 y -0.26 con *USGS900m* y *ASTER30m* respectivamente. Gaviota tuvo una correlación no significativa de -0.26 con *USGS900m*, mejorando a una correlación

significativa con *ASTER30m* de 0.57. Vicuña cayó de una correlación significativa de 0.58 con *USGS900m* a una no significativa de -0.04 con *ASTER30m*.

Estación	Simulación	Presión	Temperatura	<i>U</i>	<i>V</i>	Mag. Viento
Chivato	<i>USGS900m</i>	0.09	0.92	0.91	0.61	0.89
	<i>ASTER30m</i>	-0.09	0.92	0.92	0.61	0.82
Pearson	<i>USGS900m</i>	0.60	0.77	0.09	-0.32	0.28
	<i>ASTER30m</i>	0.57	0.76	-0.06	-0.04	-0.26
Gaviota	<i>USGS900m</i>	0.12	0.99	0.87	0.73	-0.26
	<i>ASTER30m</i>	0.15	0.99	0.83	0.84	0.57
Vicuña	<i>USGS900m</i>	0.37	0.90	0.68	0.61	0.58
	<i>ASTER30m</i>	0.32	0.89	0.67	0.45	-0.04

Tabla 4.2.1: Correlaciones de las anomalías del ciclo diario entre los datos observados y las simulaciones *USGS900m* y *ASTER30m*, para la presión, temperatura, viento zonal, viento meridional y magnitud del viento en todas las estaciones.

Cociente entre las desviaciones estándar

Se compararon las amplitudes del ciclo diario entre las observaciones y las dos simulaciones. La Tabla 4.2.2 nos entrega esta información para las variables estudiadas en cada una de las estaciones. Para la presión atmosférica se mostró una subestimación de la amplitud en todos los casos de aproximadamente a la mitad, con valores que van desde 0.40 y 0.41 para Pearson y 0.65 y 0.64 en Vicuña, con *USGS900m* y *ASTER30m* respectivamente. Para Chivato *USGS900m* se obtuvo una subestimación de 0.53 y para *ASTER30m* 0.60, y para Gaviota 0.60 y 0.51 con *USGS900m* y *ASTER30m* respectivamente.

Para la temperatura se aprecia una mayor subestimación de la amplitud del ciclo diario para Chivato, Pearson y Vicuña bordeando 0.2, tanto para *USGS900m*, como para *ASTER30m*, estos valores responden al uso de suelo que se determinó para las estaciones virtuales, las cuales quedaron sobre cuerpos de agua, que da paso a una amortiguación de la amplitud térmica. No obstante para Gaviota la amplitud se subestimó de menor manera con valores de 0.57 para *USGS900m* y mejoró levemente con *ASTER30m* obteniendo un valor de 0.66. Esta menor subestimación se debe a que

la estación virtual de Gaviota se posicionó sobre bosques mixtos, suelo en el cual la amplitud térmica del ciclo diario se ve menos debilitada.

Para la intensidad del viento y sus dos componentes, se registraron subestimaciones de la amplitud del ciclo diario para Chivato y Vicuña. Para Chivato los valores de U fueron 0.69 para *USGS900m* y 0.87 para *ASTER30m*, para V se aproximaron a 0.5 y para la magnitud del viento 0.3 en ambas simulaciones, en tanto para Vicuña se obtuvieron valores de 0.39 y 0.43, 0.72 y 0.77 y 0.54 y 0.50 con *USGS900m* y *ASTER30m* respectivamente. Pearson y Gaviota sobrestimaron la amplitud de los vientos. Para Pearson se mostraron valores de 1.18 con *USGS900m* y 1.12 con *ASTER30m* para U , 1.63 con *USGS900m* y 1.46 con *ASTER30m* para V y 1.57 para la magnitud del viento con *USGS900m* y 2.04 para *ASTER30m*. Por su lado los vientos zonales en Gaviota presentaron mayores sobrestimaciones con valores de 3.83 para *USGS900m* y 3.47 para *ASTER30m*, 4.96 con *USGS900m* y 5.63 con *ASTER30m* en los vientos meridionales. Finalmente, para la intensidad del viento se registraron valores de 1.59 con *USGS900m* y 1.42 con *ASTER30m*. Esta mayor sobrestimación de los vientos en Gaviota se puede atribuir también a la diferencia de altura que existe entre las simulaciones (10m) y las observaciones (2m), a diferencia de las otras observaciones que se encuentran a 5m en las cuales se notó una diferencia menor entre las desviaciones estándar.

Los cambios exhibidos para la presión y temperatura se pueden catalogar como no relevantes ya que estos fueron del orden de la centésima, no obstante cambios más importantes se registraron en los vientos. Se mostraron mejorías con *ASTER30m* para U en Chivato y Gaviota, para V en Pearson, y para la rapidez del viento en Gaviota. Por otro lado se presentaron simulaciones deficientes con *ASTER30m* en Gaviota para V , y Pearson para la magnitud del viento.

Estación	Simulación	Presión	Temperatura	U	V	Mag. Viento
Chivato	<i>USGS900m</i>	0.53	0.24	0.69	0.52	0.25
	<i>ASTER30m</i>	0.60	0.23	0.87	0.54	0.28
Pearson	<i>USGS900m</i>	0.41	0.18	1.18	1.63	1.57
	<i>ASTER30m</i>	0.40	0.18	1.12	1.46	2.04
Gaviota	<i>USGS900m</i>	0.60	0.57	3.83	4.96	1.59
	<i>ASTER30m</i>	0.51	0.66	3.47	5.63	1.42
Vicuña	<i>USGS900m</i>	0.65	0.21	0.39	0.72	0.54
	<i>ASTER30m</i>	0.64	0.19	0.43	0.77	0.50

Tabla 4.2.2: Cociente entre las desviaciones estándar del ciclo diario entre las simulaciones *USGS900m* y *ASTER30m* y los datos observados, para la presión, temperatura, viento zonal, viento meridional y magnitud del viento, para las estaciones de Chivato, Pearson, Gaviota y Vicuña.

4.3. Procesos sinópticos

Luego de analizar mediante correlaciones y cocientes entre las desviaciones estándar de los ciclos diarios modelados y observados, se filtraron estos ciclos de las señales, para obtener solo los procesos que ocurren en frecuencias sinópticas para la presión atmosférica (Fig. 4.3.1), la temperatura (Fig. 4.3.2), viento zonal U (Fig. 4.3.3), viento meridional V (Fig. 4.3.4) y magnitud del viento (Fig. 4.3.5), de todas las estaciones, para luego realizar nuevamente el análisis de correlación, cociente entre las desviaciones estándar y la raíz del error cuadrático medio.

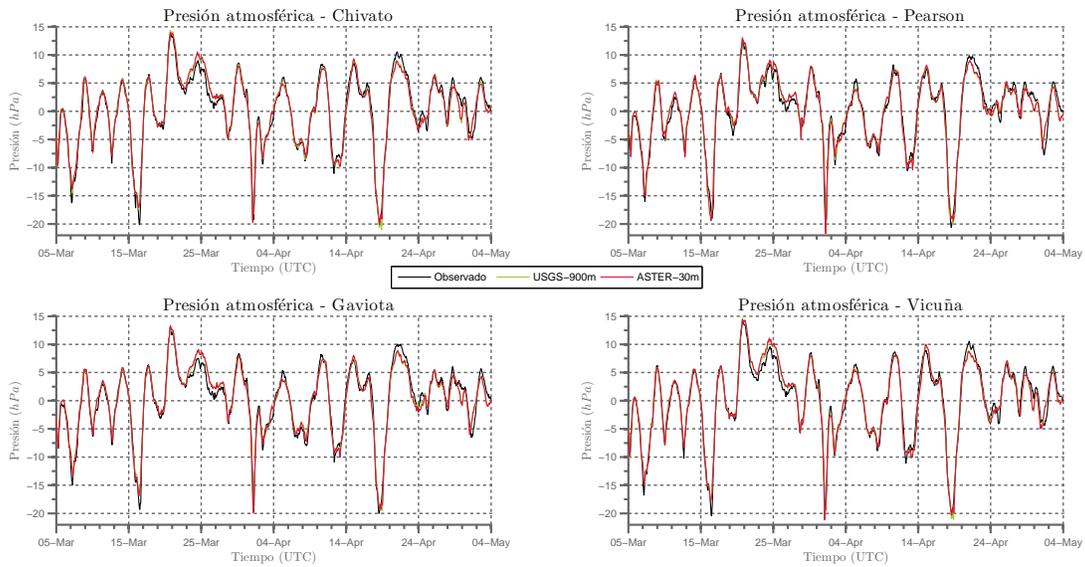


Figura 4.3.1: Series de tiempo sin ciclo diario entre el 05/03/2015 y 10/05/2015 para la presión atmosférica, con los datos observados en negro, datos modelados *USGS900m* en verde y *ASTER30m* en rojo, para todas las estaciones.

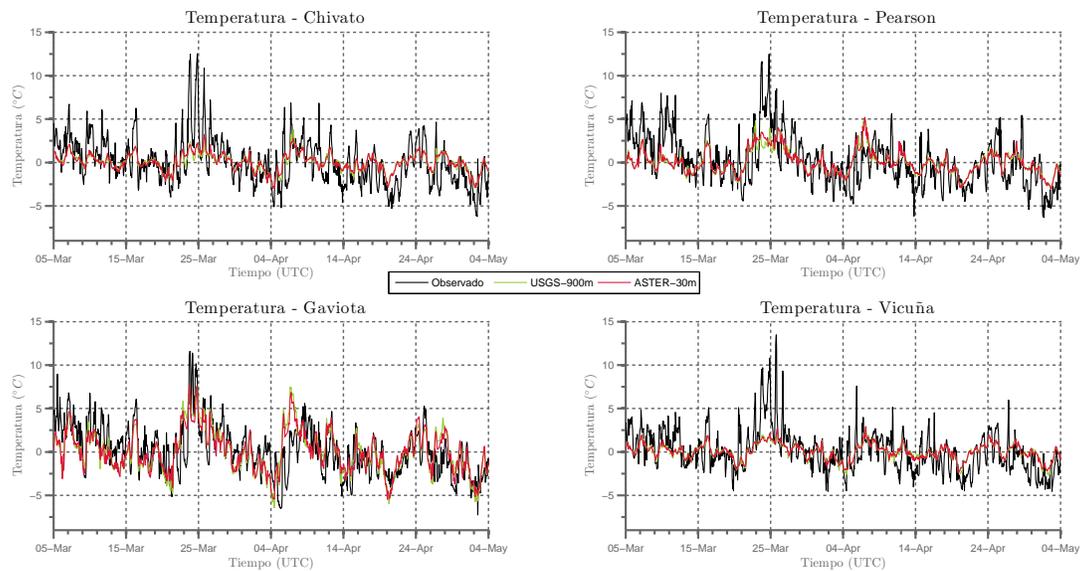


Figura 4.3.2: Series de tiempo sin ciclo diario entre el 05/03/2015 y 10/05/2015 para la temperatura a 2m, con los datos observados en negro, datos modelados *USGS900m* en verde y *ASTER30m* en rojo, para todas las estaciones.

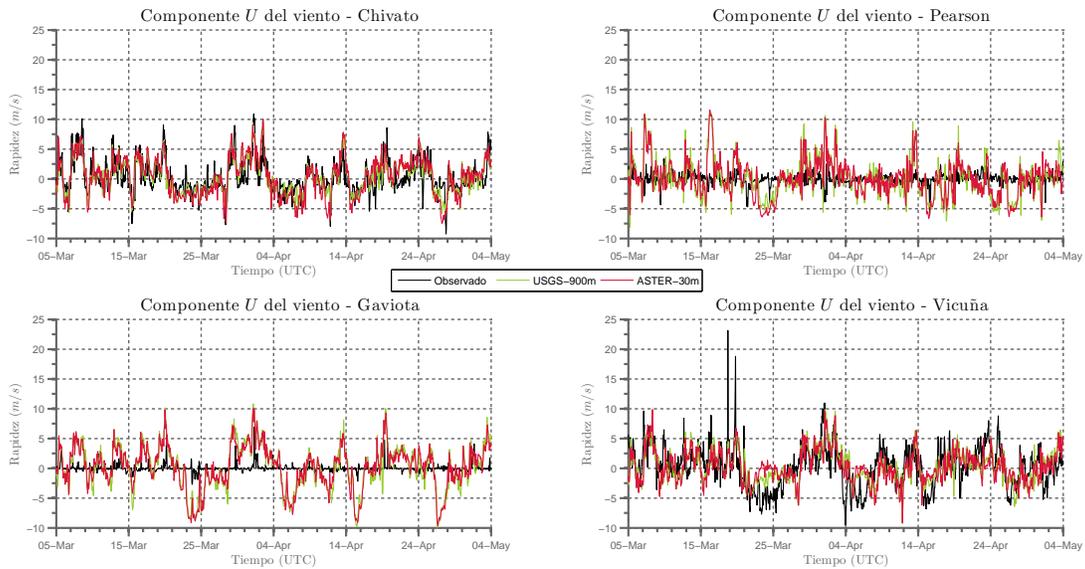


Figura 4.3.3: Series de tiempo sin ciclo diario entre el 05/03/2015 y 10/05/2015 para la componente zonal del viento U , con los datos observados en negro, datos modelados $USGS900m$ en verde y $ASTER30m$ en rojo, para todas las estaciones.

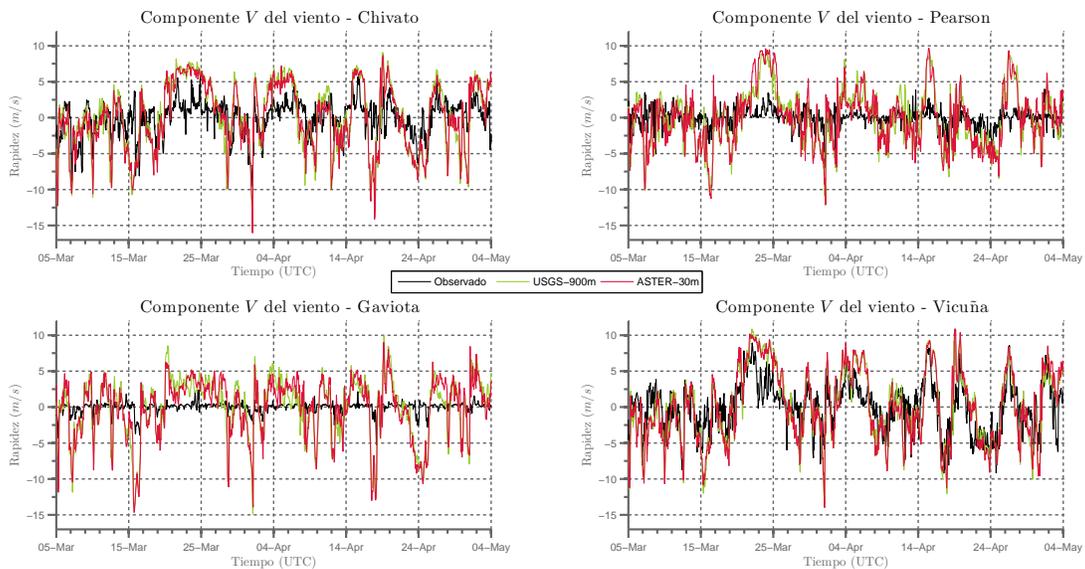


Figura 4.3.4: Series de tiempo sin ciclo diario entre el 05/03/2015 y 10/05/2015 para la componente meridional del viento V , con los datos observados en negro, datos modelados $USGS900m$ en verde y $ASTER30m$ en rojo, para todas las estaciones.

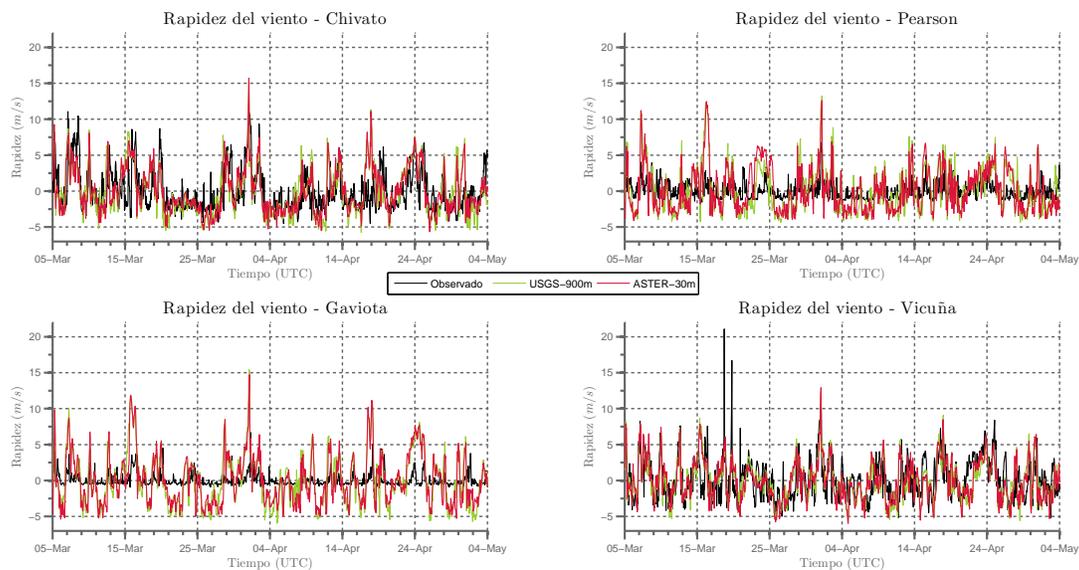


Figura 4.3.5: Series de tiempo sin ciclo diario entre el 05/03/2015 y 10/05/2015 para la intensidad del viento, con los datos observados en negro, datos modelados *USGS900m* en verde y *ASTER30m* en rojo, para todas las estaciones.

Correlación

La tabla 4.3.1 nos muestra los coeficientes de correlación para las series de datos sin el ciclo diario entre los datos observados y los resultados de las simulaciones. Para determinar la significancia estadística de las correlaciones se utilizó el test de Monte Carlo a un nivel de confianza del 95 %. Ambas simulaciones muestran significativos coeficientes de correlación para la presión atmosférica en superficie con valores entre 0.98 y 0.99, indicando la buena representación, por parte del modelo, de la fase de esta variable. Para la temperatura también se obtuvieron coeficientes de correlación significativos que oscilan entre 0.50 para Pearson y 0.71 para Chivato. Para U , Pearson mostró los coeficientes de correlación más bajos con valores muy cercanos a 0 para ambas simulaciones, por lo tanto no fueron significativos. Todas las otras correlaciones fueron significativas. Chivato obtuvo valores bordeando 0.75, siendo los más altos. Para Gaviota y Vicuña se mostraron entre ~ 0.3 y ~ 0.5 respectivamente. V fluctúa entre 0.41 para Pearson y 0.73 en Vicuña. Chivato y Gaviota se observaron valores de ~ 0.5 . Los coeficientes de correlación para la magnitud del viento variaron desde ~ 0.4 en Pearson a ~ 0.6 en Vicuña.

Estación	Simulación	Presión	Temperatura	U	V	Mag. Viento
Chivato	<i>USGS900m</i>	0.99	0.70	0.75	0.45	0.50
	<i>ASTER30m</i>	0.99	0.71	0.73	0.52	0.56
Pearson	<i>USGS900m</i>	0.98	0.50	0.04	0.41	0.42
	<i>ASTER30m</i>	0.98	0.54	0.02	0.41	0.35
Gaviota	<i>USGS900m</i>	0.98	0.64	0.29	0.51	0.46
	<i>ASTER30m</i>	0.98	0.68	0.27	0.54	0.49
Vicuña	<i>USGS900m</i>	0.99	0.61	0.52	0.73	0.55
	<i>ASTER30m</i>	0.99	0.63	0.47	0.73	0.57

Tabla 4.3.1: Correlaciones de las series sin el ciclo diario entre los datos observados y las simulaciones *USGS900m* y *ASTER30m*, para la presión, temperatura, viento zonal U , viento meridional V y magnitud del viento para las estaciones de Chivato, Pearson, Gaviota y Vicuña.

Cociente entre las desviaciones estándar

La razón entre las desviaciones estándar para las series sin el ciclo diario se muestran en la tabla 4.3.2. Para la presión atmosférica las amplitudes de ambas simulaciones se ajustan bastante a las observaciones, ya que entregan valores muy aproximados a 1. Para la temperatura se distingue la subestimación por parte de las simulaciones con respecto a las observaciones, 0.38 para Chivato y Vicuña, y $\sim 0,5$ para Pearson. Gaviota fue la excepción que obtuvo valores más acertados, 0.86 con *USGS900m* y 0.81 con *ASTER30m*. Esto se debe, como ya se mencionó anteriormente, al uso de suelo que se estableció en el punto de grilla donde se evaluaron las estaciones meteorológicas, el cual resultó ser agua, excluyendo únicamente a Gaviota que tuvo bosques mixtos. Para la componente zonal, meridional y magnitud del viento, hay una evidente sobrestimación de las simulaciones con respecto a las observaciones en Pearson y Gaviota. Para Pearson los valores bordean a 3 y Gaviota a 6 para U y V , y valores cercanos a 4 para la magnitud del viento en Gaviota y 3 en Pearson. Las otras dos restantes tuvieron una mejor aproximación acercándose a 1 excepto la componente V del viento para Chivato que tuvo valores cercanos a 2. Las mayores sobrestimaciones presentes en Gaviota, en gran parte, se debe a que los vientos de WRF son resueltos a 10m de la superficie en comparación a los vientos observados que se registraron a 2m de altura, teniendo estos una mayor rapidez a 10m que a 2m debido al roce existente con la superficie. Para el resto de las estaciones se resolvieron de mejor manera las amplitudes de los vientos ya

que estas observaciones fueron registradas a mayor altura (5m).

Estación	Simulación	Presión	Temperatura	U	V	Mag. Viento
Chivato	<i>USGS900m</i>	1.02	0.38	1.00	2.00	1.16
	<i>ASTER30m</i>	1.00	0.38	1.16	1.85	1.06
Pearson	<i>USGS900m</i>	1.02	0.45	3.62	3.24	2.75
	<i>ASTER30m</i>	1.02	0.46	3.37	3.27	2.70
Gaviota	<i>USGS900m</i>	0.98	0.86	6.19	6.09	4.31
	<i>ASTER30m</i>	1.00	0.81	6.07	6.08	4.10
Vicuña	<i>USGS900m</i>	1.02	0.38	0.90	1.43	0.99
	<i>ASTER30m</i>	1.02	0.38	0.88	1.47	1.01

Tabla 4.3.2: Cociente entre las desviaciones estándar de las series sin el ciclo diario entre los datos observados y las simulaciones *USGS900m* y *ASTER30m*, para la presión, temperatura, viento zonal, viento meridional y magnitud del viento para las estaciones de Chivato, Pearson, Gaviota y Vicuña.

Raíz del error cuadrático medio (RECM)

Evaluamos la raíz del error cuadrático medio (RECM) para cuantificar a que distancia están las simulaciones de los datos observados. Los valores se encuentran en la Tabla 4.3.3. Para la presión atmosférica ambas simulaciones y en todas las estaciones el error fue de $\sim 1hPa$. Para las temperaturas se notó un error de $\sim 2^{\circ}C$ para todas las simulaciones. Por otro lado la componente U del viento tuvo el menor error en Chivato con $\sim 2m/s$. Pearson y Vicuña tuvieron un error de $\sim 3m/s$ y Gaviota obtuvo el mayor error con $\sim 4m/s$. Los errores para la componente V variaron entre $\sim 3m/s$ y $\sim 4m/s$. Para la magnitud del viento estuvieron todas las simulaciones parejas con un error de $\sim 3m/s$.

Estación	Simulación	Presión	Temperatura	U	V	Mag. Viento
Chivato	<i>USGS900m</i>	1.11	2.09	2.12	4.24	3.14
	<i>ASTER30m</i>	1.11	2.08	2.45	3.75	2.78
Pearson	<i>USGS900m</i>	1.12	2.52	3.21	3.42	2.75
	<i>ASTER30m</i>	1.12	2.46	3.03	3.46	2.79
Gaviota	<i>USGS900m</i>	1.14	2.28	3.62	3.80	3.24
	<i>ASTER30m</i>	1.14	2.14	3.55	3.77	3.05
Vicuña	<i>USGS900m</i>	1.08	1.96	3.08	3.33	2.59
	<i>ASTER30m</i>	1.11	1.94	3.21	3.42	2.56

Tabla 4.3.3: Raíz del error cuadrático medio (RECM) de las series sin el ciclo diario entre los datos observados y las simulaciones *USGS900m* y *ASTER30m*, para la presión (hPa), temperatura ($^{\circ}C$), viento zonal (m/s), viento meridional (m/s) y magnitud del viento (m/s), para las estaciones de Chivato, Pearson, Gaviota y Vicuña.

Diagrama de Taylor

Para resumir todos los estadísticos se elaboró un diagrama de Taylor para la presión (Fig. 4.3.6), la temperatura (Fig. 4.3.7), viento zonal (Fig. 4.3.8), viento meridional (Fig. 4.3.9) y magnitud del viento (Fig. 4.3.10). Este tipo de diagrama proporciona una manera gráfica de resumir que tan cerca estuvieron las simulaciones con respecto a las observaciones, cuantificadas en términos de su correlación, su RECM, y la amplitud de sus variaciones (Taylor, 2001).

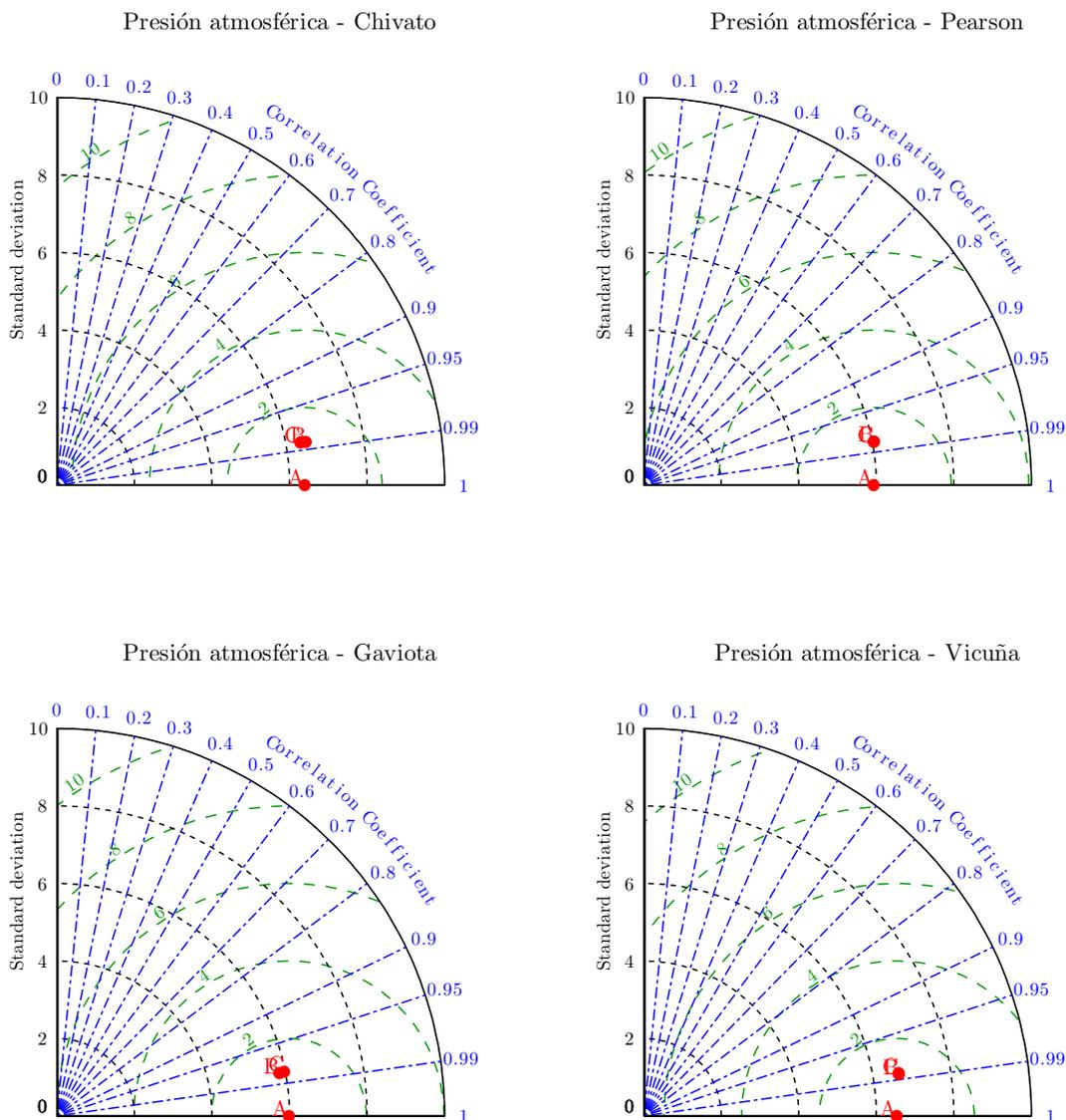


Figura 4.3.6: Diagrama de Taylor para la presión atmosférica. El punto rojo con la letra A indica los datos observados, con la letra B los datos simulados *USGS900m* y con la letra C los datos simulados *ASTER30m*.

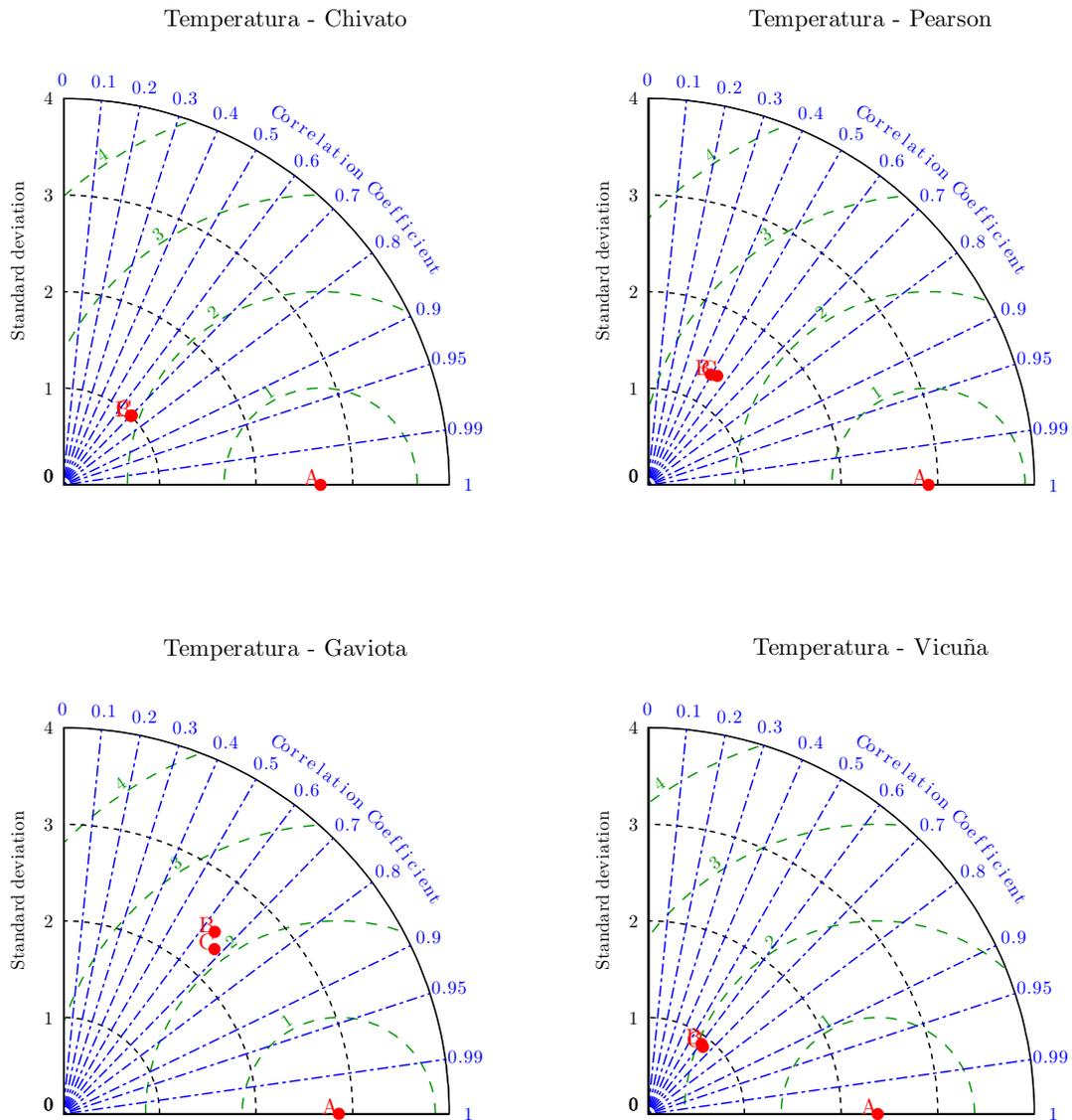


Figura 4.3.7: Diagrama de Taylor para la temperatura. El punto rojo con la letra A indica los datos observados, con la letra B los datos simulados *USGS900m* y con la letra C los datos simulados *ASTER30m*.

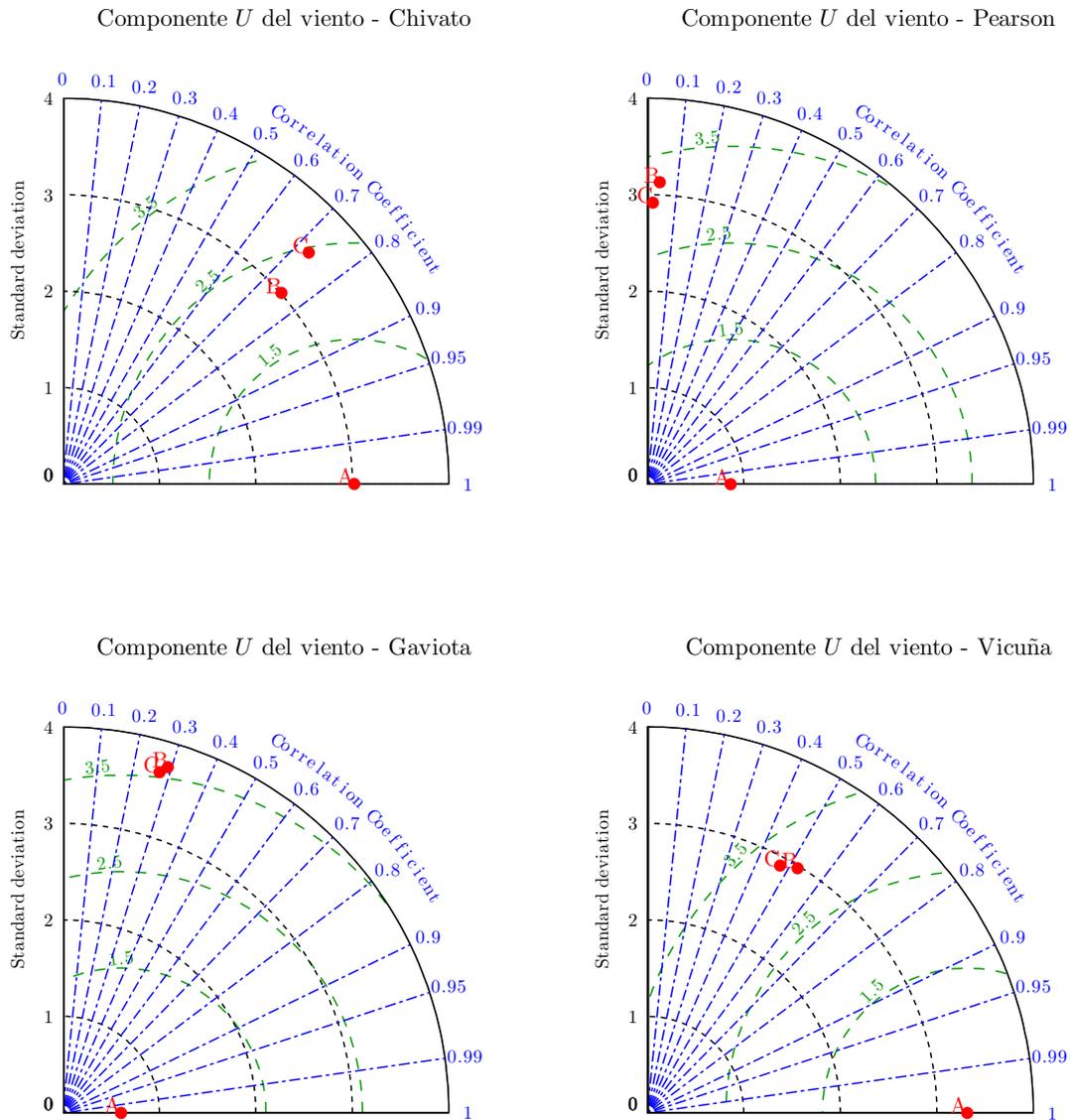


Figura 4.3.8: Diagrama de Taylor para la componente zonal del viento U . El punto rojo con la letra A indica los datos observados, con la letra B los datos simulados $USGS900m$ y con la letra C los datos simulados $ASTER30m$.

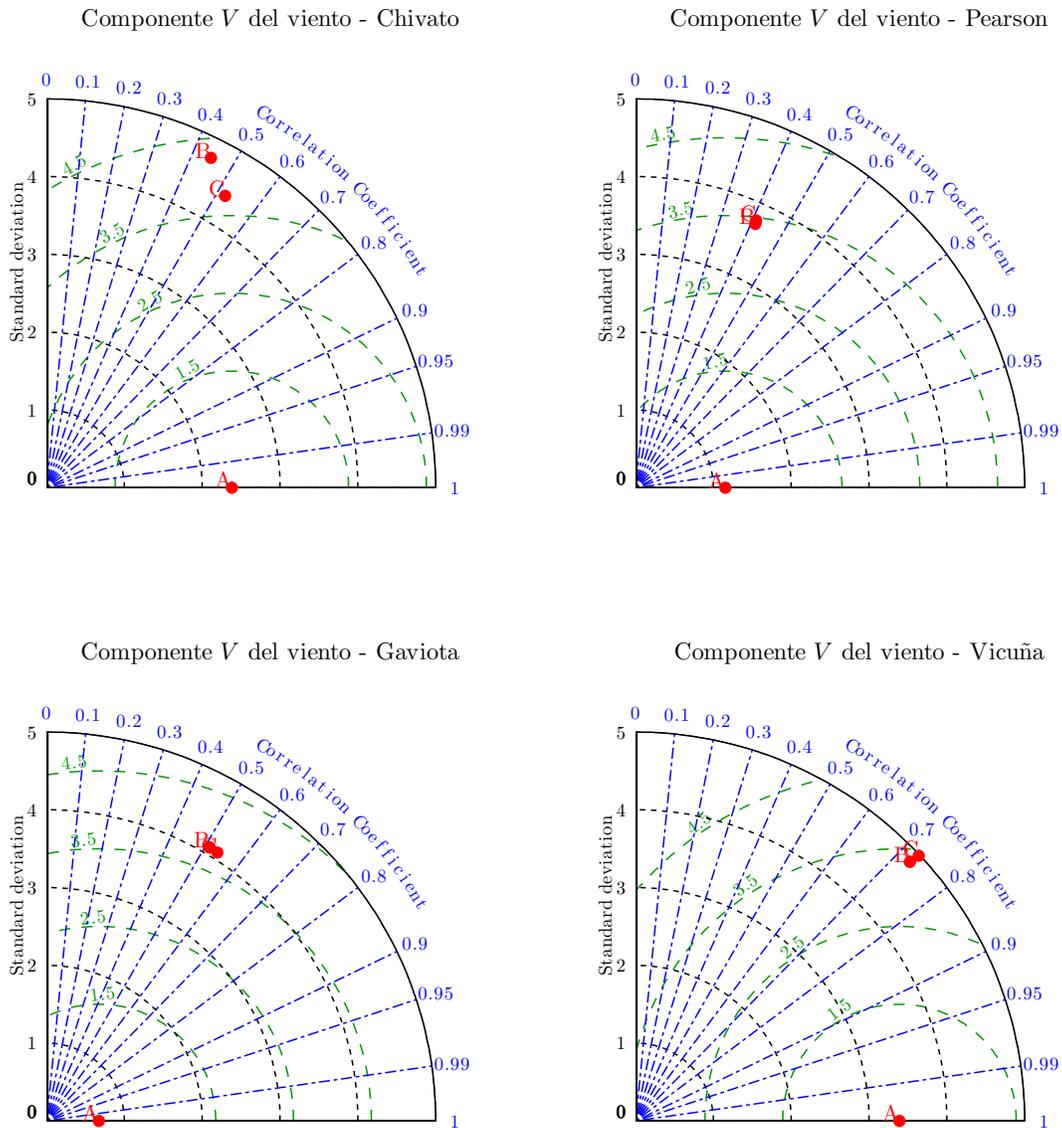


Figura 4.3.9: Diagrama de Taylor para la componente meridional del viento V . El punto rojo con la letra A indica los datos observados, con la letra B los datos simulados $USGS900m$ y con la letra C los datos simulados $ASTER30m$.

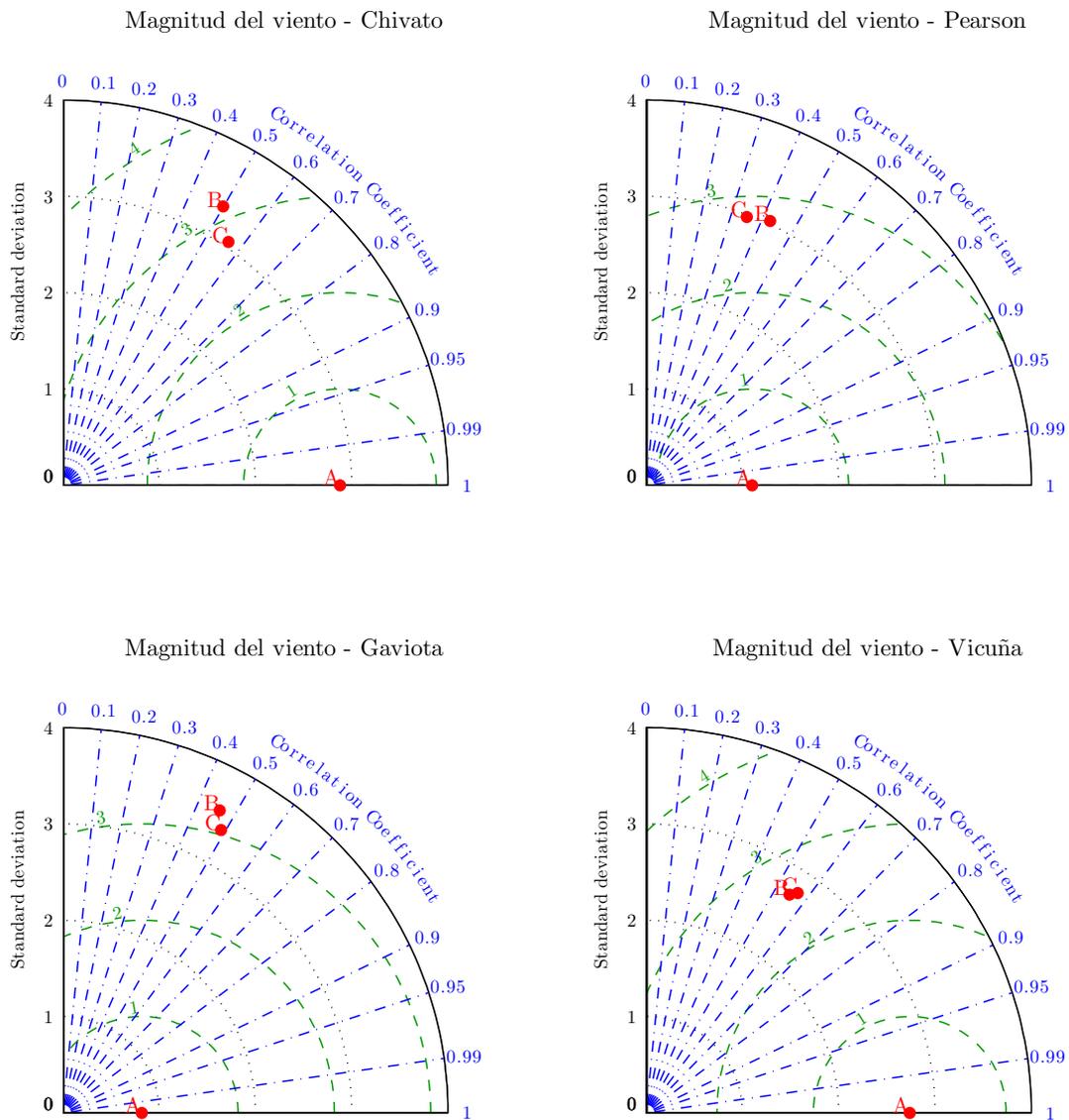


Figura 4.3.10: Diagrama de Taylor para la magnitud del viento. El punto rojo con la letra A indica los datos observados, con la letra B los datos simulados *USGS900m* y con la letra C los datos simulados *ASTER30m*.

Para la presión atmosférica (Fig. 4.3.6) se puede apreciar que fue muy bien representada por ambas simulaciones, el error que se obtuvo fue de $\sim 1hPa$ para todas las estaciones con *USGS900m* y *ASTER30m*. Las dos simulaciones tuvieron una correlación de ~ 0.99 y la desviación estándar de las simulaciones se acercaron bastante a las observaciones. En general la presión atmosférica logró ser muy bien representada por ambas simulaciones. No hubo una diferencia importante entre *USGS900m* y *ASTER30m*. Lo único que se puede destacar son los grandes sesgos que se notaron en las series de tiempo sin haberle extraído el ciclo diario (ver Tabla 4.1.1 y Fig. 4.1.1), las cuales, al extraerles el ciclo diario, también se les extrae el sesgo. Este error que se notó en las presiones es a raíz de las diferentes alturas en las cuales se establecieron las estaciones virtuales. Hay que recordar que la resolución horizontal con la que se configuraron las simulaciones fue de 3km, por lo tanto además de tener una base de datos topográficos de alta resolución, también es necesario realizar una simulación con una alta resolución espacial y de esta manera representar mucho mejor el terreno en el Sur-Austral de Chile ya que hay canales y fiordos con dimensiones mucha mas bajas que 3km (Fig.1.2.3).

En el caso de la temperatura, también ambas simulaciones estuvieron muy parecidas. Las correlaciones se apreciaron entre ~ 0.5 y ~ 0.7 . Para las cuatro estaciones se mostró un RECM de $\sim 2^{\circ}C$. Las desviaciones estándar se ven subestimadas por cerca de la mitad del valor de las observaciones para Pearson. Para Chivato y Vicuña se aprecia una subestimación ligeramente por debajo de la mitad, no obstante para Gaviota se observó un acercamiento muy importante por parte de ambas simulaciones, siendo *ASTER30m* levemente mejor. Esto se debe, como ya se ha mencionado, por el suelo que se encuentra bajo las estaciones virtuales, que es agua para todas las estaciones, excluyendo Gaviota, que es bosque mixto. Esto nos indica la necesidad también de manipular la base de datos que trae WRF con los usos de suelo, ya que es necesario tener una mejor resolución del suelo que existe además de la elevación real. Por ejemplo no es coherente que las estaciones virtuales estén varios metros sobre el nivel del mar (Fig. 4.1.6) y a la vez estén sobre cuerpos de agua (Tabla 4.1.3) (excepto si hay un lago, pero eso no ocurre en este caso).

Para el caso de la componente zonal del viento U se aprecian diversos resultados. En el caso de Chivato tienen una correlación significativa para ambas simulaciones, mayores a 0.7, sin embargo la desviación estándar fue mejor resuelta por la simulación $USGS900m$, ya que con $ASTER30m$ se obtuvo una leve sobrestimación. Por lo tanto la simulación $USGS900m$ tuvo levemente menos error que $ASTER30m$. En el caso de Pearson ambas simulaciones fueron bastante similares, pero obtuvieron un error cercano a $3m/s$, las correlaciones no fueron significativas con valores cercanos a 0 y la desviación estándar fue sobrestimada aproximadamente por 3. Gaviota tuvo un error de $\sim 3.5m/s$ y la desviación estándar de los valores modelados fue sobrestimada por cerca de 6 veces más con respecto a los datos observados y la correlación fue baja, cercana a 0.3, para ambas simulaciones, pero significativas. En el caso de Vicuña las simulaciones tuvieron un error muy parecido, $\sim 3m/s$, sin embargo la desviación estándar fue mejor resuelta acercándose bastante a los datos reales y la correlación fue ~ 0.5 . En general ambas simulaciones fueron muy similares a excepción de Chivato en la que $USGS900$ tuvo levemente menos error que $ASTER30m$.

En el caso de la componente meridional del viento V las simulaciones fueron casi idénticas, solo en Chivato se apreció una leve diferencia, ya que $ASTER30m$ tuvo un error cercano a $3.5m/s$ y $USGS900m$ cercano a $4.5m/s$, las desviaciones estándar de ambas simulaciones sobrestimaron al doble los datos observados, sin embargo $USGS900m$ se alejó un poco más, y la correlación para $USGS900m$ fue ~ 0.45 y para $ASTER30m$ fue ~ 0.5 . Pearson tuvo simulaciones muy parecidas con un error de $\sim 3.5m/s$, correlación de ~ 0.4 y desviación estándar $\sim 4m/s$. Gaviota y Vicuña también tuvieron resultados muy parecidos. Sus errores se aprecian de $\sim 3.5m/s$ para ambas estaciones, las correlaciones ~ 0.5 y ~ 0.7 y desviaciones estándar de $\sim 4m/s$ y $\sim 5m/s$ respectivamente.

Finalmente la magnitud del viento mostró, de igual forma, resultados similares para ambas simulaciones, con errores bordeando los $3m/s$ y correlaciones entre 0.3 y 0.6, teniendo la mejor correlación Vicuña, con ~ 6 . Por otro lado Chivato y Vicuña repre-

sentaron bastante bien la desviación estándar y Pearson y Gaviota la subestimaron con valores de $\sim 3m/s$ y $\sim 3.5m/s$, respectivamente. Para la componente U y la magnitud del viento, *ASTER30m* representó levemente mejor los resultados para la estación de Chivato.

En términos generales, para la presión atmosférica en superficie y la temperatura a 2m, no se revelaron mayores diferencias entre *USGS900m* y *ASTER30m*. Para los viento se percibieron diferencias en los errores de ambas simulaciones, sin embargo estos son muy leves para calificarlos como sobresalientes, ya que son del orden de décimas y centésimas de magnitud.

4.4. Campos de viento

Luego del análisis estadístico realizado para las cuatro estaciones, quedó en evidencia que no hubo un cambio importante tras la modificación de la fuente de datos topográficos que trae el modelo WRF (*USGS900m*) por una de mayor resolución (*ASTER30m*). Si embargo, realizar un análisis en cuatro puntos no es lo suficientemente representativo para la totalidad de la zona de estudio, por lo cual se decidió hacer un estudio de las diferencias entre los campos de viento *USGS900m* – *ASTER30m*, para sus dos componentes y así revelar si se presentaron cambio en alguna zona en particular. Todo esto se elaboró solo para valores que estuvieran sobre agua y acotando el dominio, dejando fuera gran parte de los valores sobre el océano abierto.

4.4.1. Distribución espacial de las diferencias

Para este análisis, en primer lugar, se obtuvo el campo promedio de todos los pasos de tiempo para las componentes U y V de la simulación *USGS900m* (Fig. 4.4.1) y *ASTER30m* (Fig. 4.4.2). Luego se consiguió la diferencia entre los valores absolutos de estos campos, tanto para U como para V la cual se definió como *USGS900m* – *ASTER30m* (Fig. 4.4.3). Se observaron valores muy cercanos a cero, sin embargo en algunas zonas puntuales, próximas a la costa, se logró apreciar una sobrestimación de *USGS900m* para ambas componente que bordean el valor de $1m/s$. Para cuantificar este análisis se puede observar el histograma de la Figura 4.4.4, el cual muestra una distribución normal de las diferencias y afirma que más del 90% de ambos campos tuvieron valores entre $-0.5m/s$ y $0.5m/s$ lo que nos indica que espacialmente los vientos no tuvieron gran cambio, específicamente sobre los cuerpos de agua, entre las simulaciones *USGS900m* y *ASTER30m*. Cabe destacar que al realizar la sustracción entre los valores absolutos de las componentes del viento, entre ambas simulaciones, se generarían problemas si en un mismo punto de grilla existieran distintos signos, es por esto que se identificaron en cuantos puntos de grilla ocurría esto, lo cual nos entrego el resultado de 2.3% de los puntos de grilla habían signos opuestos para la componente U y un 0.3% de los puntos de grilla para la componente V existían signos opuestos, por lo tanto estos valores son despreciables para realizar esta comparación.

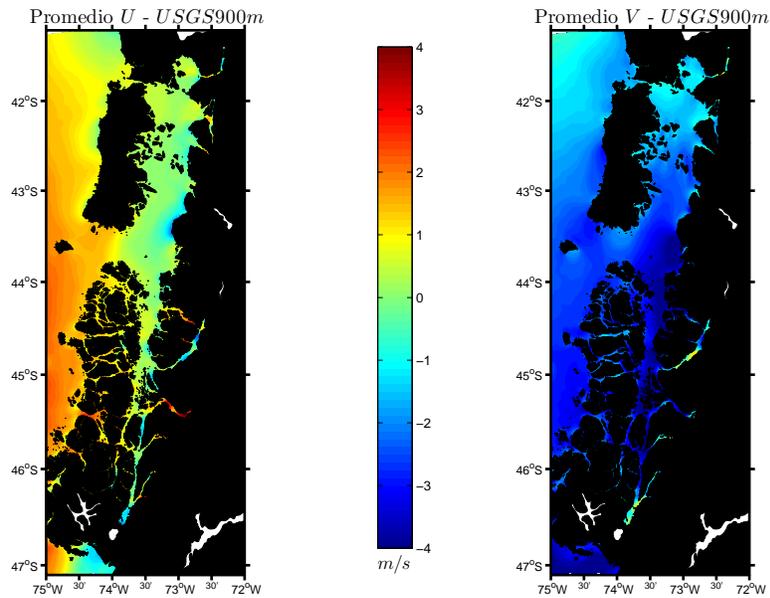


Figura 4.4.1: Mapa con promedios de todos los pasos de tiempo de la simulación *USGS900m* para la componente U (izq.) y V (der.) de la velocidad del viento. Solo se trabajó con valores que se encontraban sobre agua.

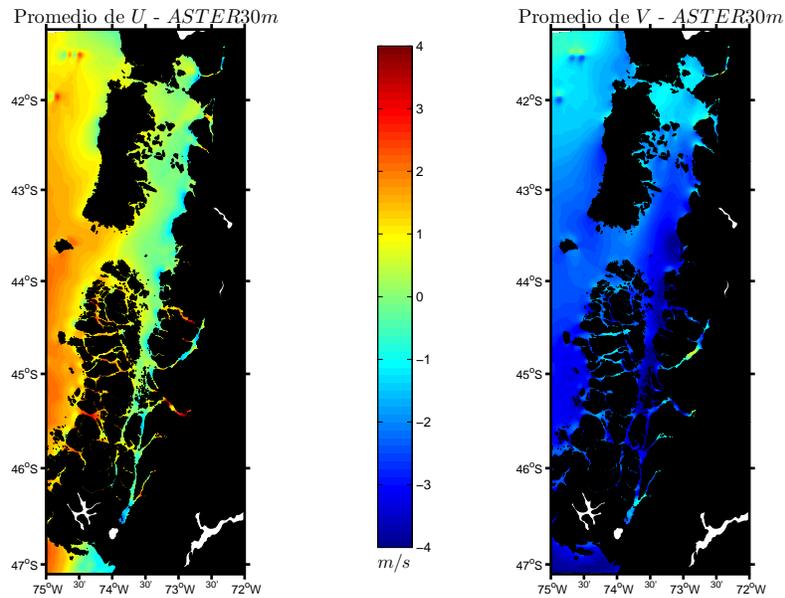


Figura 4.4.2: Mapa con promedios de todos los pasos de tiempo de la simulación *ASTER30m* para la componente U (izq.) y V (der.) de la velocidad del viento. Solo se trabajó con valores que se encontraban sobre agua.

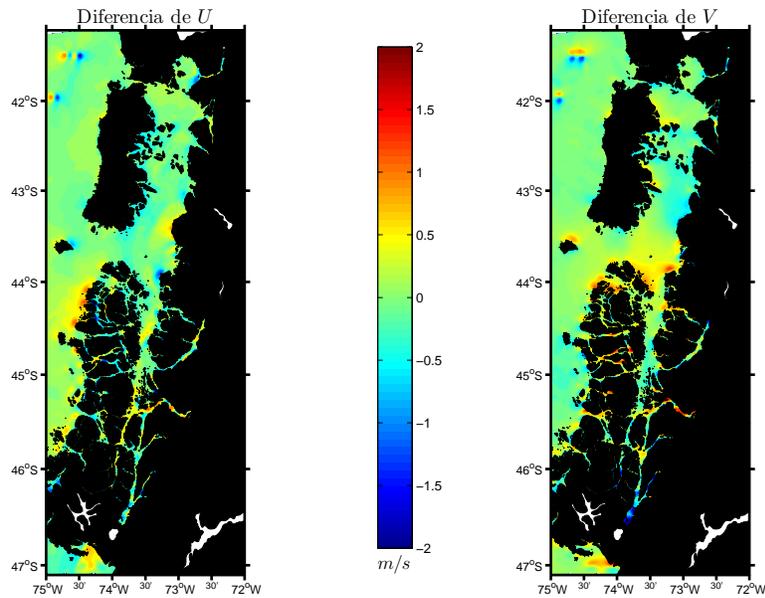


Figura 4.4.3: Mapa con diferencias de los valores absolutos entre *USGS900m* – *ASTER30m* para los promedios temporales de las componente *U* (izq.) y *V* (der.) del viento, para valores sobre agua.

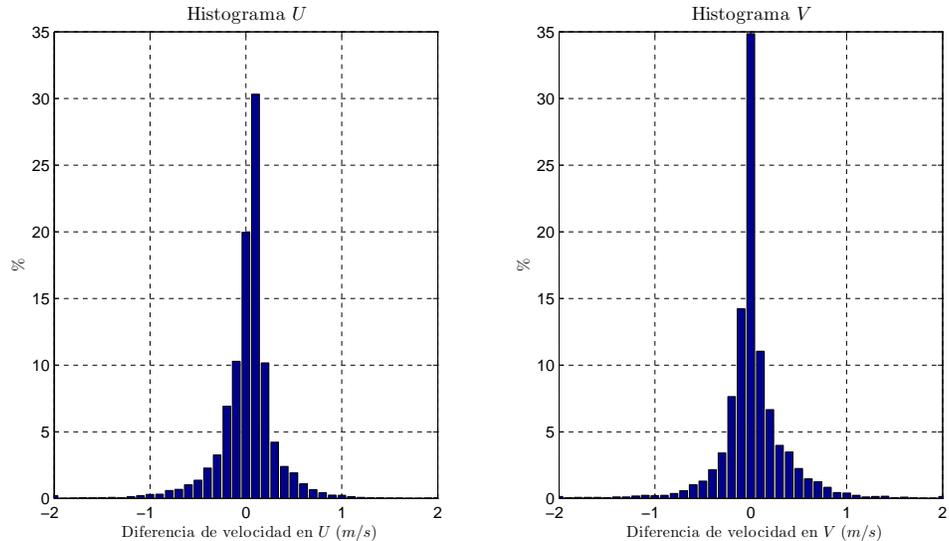


Figura 4.4.4: Histograma con diferencias de los valores absolutos entre *USGS900m* – *ASTER30m* para los promedios temporales de las componente *U* (izq.) y *V* (der.) del viento, para valores sobre agua.

4.4.2. Distribución temporal de las diferencias

Finalmente, se estudió la distribución temporal de las diferencias, la cual se obtuvo sacando el promedio y desviación estándar espacial para cada campo de las diferencias entre los valores absolutos de $USGS900m - ASTER30m$ para ambas componentes del viento a lo largo del tiempo de simulación, solo para los puntos en donde se encontraran sobre agua (Fig. 4.4.5). Esta figura nos revela que el promedio espacial de las diferencias entre las dos simulaciones, para ambas componentes del viento, fue $\sim 0m/s$ durante todo el periodo simulado. Existen pequeñas variaciones pero no sobrepasan $1m/s$, además no se presentó una tendencia temporal significativa para estas diferencias.

Por lo visto, ambos análisis de las diferencias entre los promedios de los campos de viento para las dos simulaciones nos evidenció que tanto en el espacio como en el tiempo no hubo un cambio significativo.

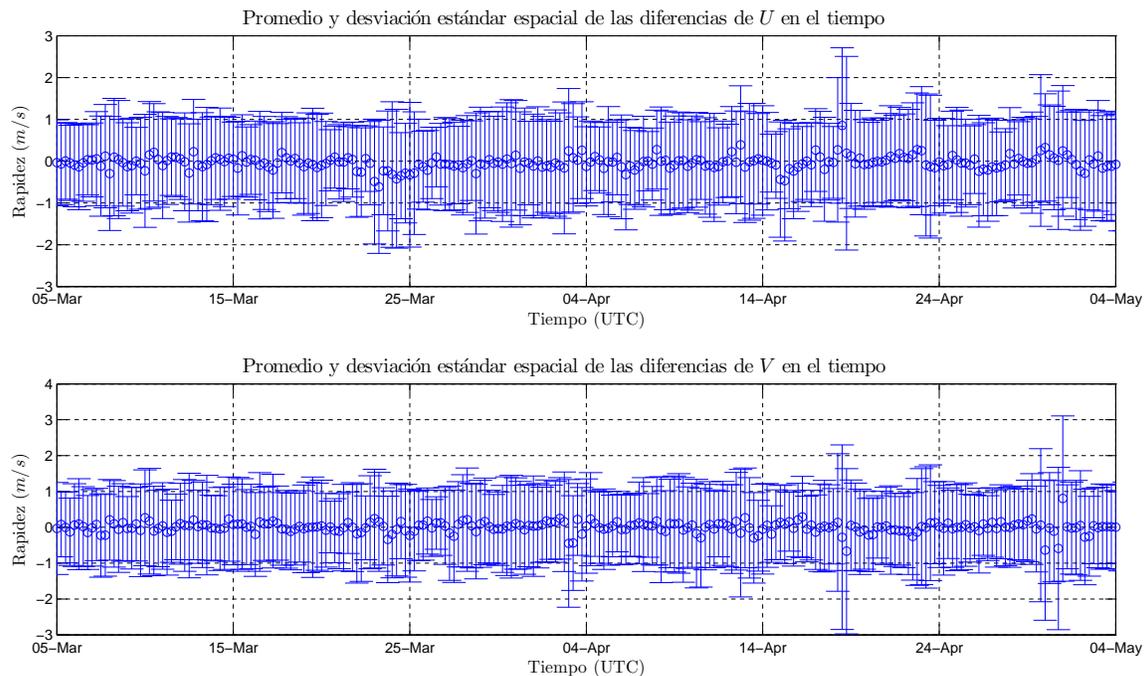


Figura 4.4.5: Gráfica que representa los promedios y su desviación estándar espacial para cada campo de diferencias de los valores absolutos entre USGS-900m-ASTER-30m, para la componente U (arriba) y V (abajo) del viento, a través del tiempo.

5. Conclusiones

En este trabajo se ha mencionado la alta irregularidad que poseen los terrenos de la Región de Aysén y en general todo el Sur-Austral de Chile, zona en la cual se torna complicado tener simulaciones atmosféricas representativas para los vientos, debido a su topografía muy irregular, que el modelo WRF no es capaz de representar. La hipótesis que se estableció para esta tesis hace mención a la mejora en las salidas del modelo WRF, particularmente para los vientos, luego de modificar la base de datos topográficos más fina que trae este de $\sim 900m$ de resolución espacial, por una de alta resolución espacial, en este caso de $\sim 30m$ proveniente de ASTER.

En general la hipótesis establecida no se cumplió ya que no se observaron diferencias destacables entre ambas simulaciones, por ejemplo el error para la presión fue el mismo para todas las simulaciones. La temperatura tuvo errores iguales salvo en Gaviota que tuvo $2,3^{\circ}C$ para *USGS900m* y $2,1^{\circ}C$ para *ASTER30*. Para la componente U también fueron casi idénticos a excepción de Chivato en donde *USGS900m* mostró un error levemente menor ($2,1m/s$) que *ASTER30m* ($2,4m/s$). La componerte V del viento tuvo resultados parecidos, mostrándose una diferencia también en Chivato pero esta vez *ASTER30m* tuvo un error sutilmente menor ($3,8m/s$) que *USGS900m* ($4,2m/s$). Finalmente la magnitud del viento igual tuvo resultados muy parecidos, logrando en Chivato $3,1m/s$ con *USGS900m* y $2,8m/s$ con *ASTER30m*. Al tener errores del orden de décimas, se transforman en despreciables para las variables estudiadas. Además, tras el análisis de las diferencias entre *USGS900m* – *ASTER30m* para los campos de U y V , no se percibieron grandes modificaciones espaciales como temporales.

Necesariamente se debe llevar a cabo una simulación con una resolución espacial mucho más fina, ya sea de 1km o 333.3m para que así el efecto del cambio de la topografía se vea reflejado en los resultados, puesto que en varios lugares las ecuaciones que gobiernan la atmósfera se están resolviendo entre una distancia que no es posible representar ciertos canales y fiordos, por lo cual se aleja de la realidad. Esto además se puede asociar a la resolución efectiva del modelo la que advierte el número de cuadrículas para las cuales el modelo está resolviendo los procesos atmosféricos de manera adecuada. Por medio de un espectro de energía cinética del modelo, se puede definir la resolución efectiva de este como la longitud de onda en donde el espectro de energía cinética comienza a decaer en relación al espectro observado o relativo al espectro de energía cinética de una simulación de mayor resolución horizontal (la cual debe resolver mayores números de onda antes de que la disipación numérica conduzca al decaimiento). Esto se debe a que los modos con números de onda mayor que la resolución efectiva (modos con longitudes de ondas más cortas) se amortiguan en relación a sus equivalentes atmosféricos por lo tanto no son dinámicamente fiables. En general la resolución efectiva para las simulaciones con WRF es de $\sim 7\Delta x$ (Skamarock, 2004), por lo tanto con una resolución espacial de 3km, el modelo está muy lejos de entregar información de procesos locales cercana a la realidad para los fiordos y canales de Sur-Austral de Chile.

Lo que si se puede afirmar, es que para modelaciones climatológicas o balances de masa en campos de hielo, en donde comúnmente se trabaja con una resolución horizontal de $\sim 5km$ (Villaruel et al., 2013; Schaefer et al., 2013; Lenaerts et al., 2014), no es necesario llevar la resolución horizontal de la topografía, que trae por defecto WRF, a resoluciones más altas para desarrollar estas investigaciones, ya que se comprobó que cambiando la resolución horizontal de la topografía por una de mayor resolución en una modelación de 3km no se presentan cambios relevantes.

Otro factor que se debe considerar si se desea hacer nuevamente este análisis, es manipular la base de datos de uso de suelo y, al igual que la topografía, aumentar su resolución lo más posible, ojalá a la misma de la topografía, con la intención de que exista una coherencia entre las resoluciones de ambas bases de datos. De esta

manera se definirán más adecuadamente los suelos y por lo tanto los coeficientes de roce, los flujos de calor, entre otros, lo cual generará una gran influencia tanto como en la oscilación térmica, como también en la velocidad de los vientos. Además contar con más estaciones meteorológicas sería una buena medida para lograr una validación estadística más representativa. Finalmente, es importante conocer cual es la física adecuada que se debe establecer antes de correr una simulación ya que esto influirá de gran manera en la obtención de mejores resultados.

Anexo

Anexo A

Modelo WRF.

En esta investigación se trabajó con el modelo WRF V3.3. Este es un sistema numérico de predicción del tiempo a mesoescala de segunda generación, diseñado para las necesidades de investigación y predicción operativa de la atmósfera. El esfuerzo para desarrollar WRF comenzó en la última parte de la década de 1990 y fue una asociación de colaboración principalmente entre el National Center for Atmospheric Research (NCAR), el National Oceanic and Atmospheric Administration (representado por el National Centers for Environmental Prediction (NCEP) y el Forecast Systems Laboratory (FSL)), el Air Force Weather Agency (AFWA), el Naval Research Laboratory, La Universidad de Oklahoma, y el Federal Aviation Administration (FAA).

Este modelo ofrece dos núcleos dinámicos para el cálculo de las ecuaciones que gobiernan la atmósfera, que, dependiendo del enfoque que se le de al estudio, es posible discriminar uno de ellos. Estos son: el Advanced Research WRF (ARW), y el Nonhydrostatic Mesoscale Model (NMM). El sistema WRF-ARW es desarrollado principalmente por NCAR, es una continuación del modelo MM5 y está principalmente orientado al área de la investigación. La versión WRF-NMM está basada en el modelo ETA y es apoyado por el Developmental Testbed Center (DTC). Esta versión es más utilizada para los pronósticos numéricos.

Este trabajo se ejecutó con el sistema WRF-ARW y sus principales características

son: no-hidrostáticos, esto significa que la fuerza del gradiente de presión no está en equilibrio con la fuerza de gravedad permitiendo el libre movimiento de las parcelas de aire en la vertical. De igual manera existe la opción para resolver las ecuaciones de forma hidrostática. Posee un sistema de coordenadas Eulerianas (Skamarock et al., 2005) en donde el observador se encuentra en un punto fijo mirando el movimiento del fluido. Además cuenta con un sistema de asimilación de datos, y una arquitectura de software facilitando la computación paralela y la extensibilidad del sistema. El modelo ofrece una amplia gama de aplicaciones meteorológicas a través de escalas de decenas de metros a miles de kilómetros.

Posee un sistema de coordenada vertical denotada por η la cual sigue el terreno basándose en la presión hidrostática definida como:

$$\eta = \frac{p_h - p_{ht}}{p_{hs} - p_{ht}}, \quad (\text{A.0.1})$$

En donde p_h es el componente hidrostático de la presión en cada nivel vertical, p_{ht} y p_{hs} se refiere a los valores de presión en el tope de la atmosfera en el modelo y a lo largo de la superficie, respectivamente. El parámetro η varia desde 1 en la superficie hasta 0 en el tope superior del modelo (Fig. A.1). Por otro lado, al momento de resolver las ecuaciones, WRF utiliza la grilla Arakawa-C (Fig. A.2), la cual ubica las componentes de la velocidad horizontal (U y V) y vertical (W) en el centro de cada lado de las cuadrículas, dejando en el medio de cada cuadrícula las variables termodinámicas, de masa y escalares.

Los conjuntos de datos terrestres para el modelo WRF se construyen utilizando los datos geográficos del NCEP. Estos consisten en conjuntos de datos globales para las categorías de suelo, uso del suelo, altura del terreno, la temperatura media anual del suelo profundo, fracción de vegetación mensual, albedo mensual, máximo albedo de la nieve y las pendientes. WRF tiene dos opciones para establecer el uso de suelo: 24 categorías de datos de la USGS (Tabla A.1) y 20 categorías de datos de MODIS (Tabla A.2), que están disponibles para diferentes resoluciones horizontales: 10', 5', 2', 30'',

que equivalen a 18km, 9km, 3.6km y 900m aproximadamente.

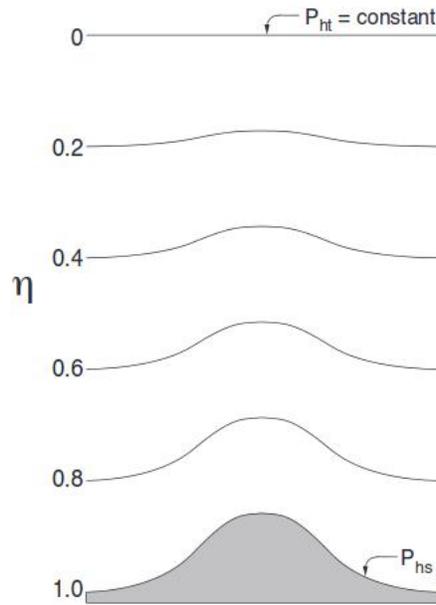


Figura A.0.1: Niveles Eta para el modelo WRF-ARW que siguen el contorno del terreno (Skamarock et al., 2005).

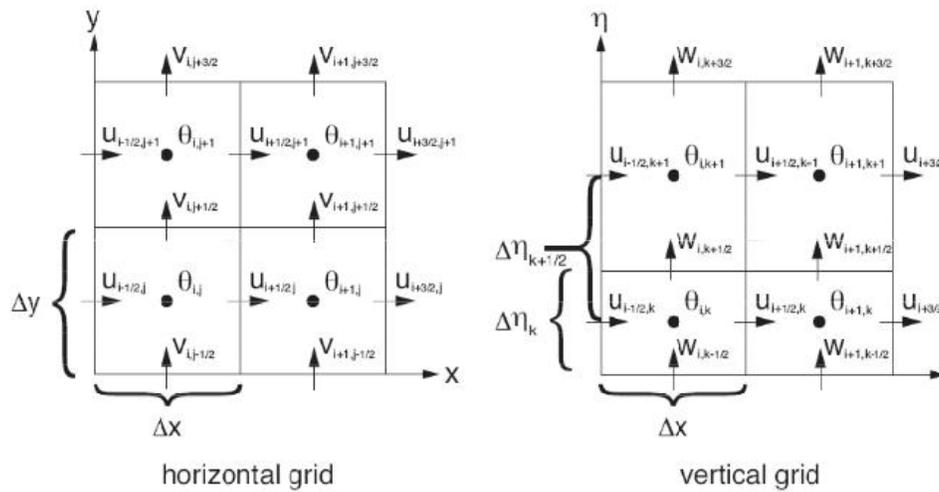


Figura A.0.2: Grilla arakawa-C utilizada al desarrollar las ecuaciones que gobiernan la atmósfera (Skamarock et al., 2005).

Categoría Uso de Suelo	Descripción Uso de Suelo
1	Superficie urbana y construida
2	Tierra seca, de cultivo y pasto
3	Tierra de cultivo de regadío y pasto
4	Mezcla entre tierra seca y cultivo de regadío y pasto
5	Tierra agrícolas y mosaico de pastizales
6	Tierra de cultivo y mosaico de bosque
7	Pradera
8	Arbusto
9	Mezcla entre pradera y arbusto
10	Sabana
11	Bosque de hojas ancha caducas
12	Bosque de coníferas caducas
13	Bosque de hoja ancha perenne
14	Bosque de coníferas perenne
15	Bosque mixto
16	Cuerpos de agua
17	Herbáceas de humedales
18	humedales boscosos
19	Estéril o con escasa vegetación
20	Herbácea tundra
21	Tundra boscosa
22	Tundra mixta
23	Suelo limpio de tundra
24	Nieve o hielo

Tabla A.0.1: Categorías de uso de suelo de la USGS (NCAR, 2010).

Al igual que todos los modelos regionales de la atmósfera, WRF necesita una fuente de datos los cuales usa para crear las condiciones iniciales y de borde para ejecutar una simulación. Esta información puede provenir de varios modelos globales de gruesa resolución (GFS, FNL, NCEP-NCAR Reanálisis 1, ECMWF – ERA40, ECMWF – ERA Interim, entre otros), permitiendo a WRF realizar una reducción de escala (o en inglés: Downscaling) y obtener resultados de alta resolución mediante anidados. Para que se logre llevar a cabo una exitosa simulación es necesario ejecutar ciertos archivos con líneas de códigos que cumplen distintas funciones en la etapa de Pre-procesamiento de WRF (WPS). Esta fase consiste en un conjunto de tres programas que se encargan de preparar los datos de entrada para proceder con la modelación. (Fig. A.3).

Categoría Uso de Suelo	Descripción Uso de Suelo
1	Bosque de coníferas perenne
2	Bosque de hoja ancha perenne
3	Bosque de coníferas caducas
4	Bosque de hojas ancha caducas
5	Bosque mixto
6	Matorrales cerrados
7	Matorrales abiertos
8	Sabana leñosa
9	Sabana
10	Pastizales
11	Humedales permanentes
12	Tierra de cultivos
13	Urbano y plano de construcción
14	Tierras de cultivo y mosaico de vegetación natural
15	Nieve y hielo
16	Estéril o con escasa vegetación
17	Agua
18	Tundra boscosa
19	Tundra mixta
20	Tundra estéril

Tabla A.0.2: Categorías de uso de suelo de MODIS (NCAR, 2010).

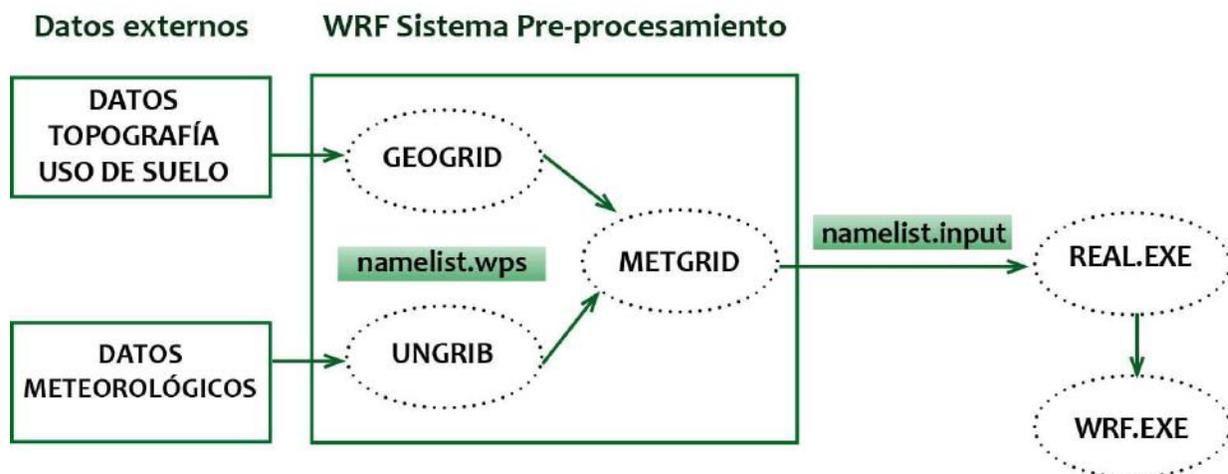


Figura A.0.3: Esquema descriptivo con los componentes de WPS.

- ***Namelist.wps***

Es un archivo en donde se establecen toda la información necesaria para el pre-

procesamiento de los datos: se fija el periodo de simulación, las coordenadas de los dominios y los dominios anidados, como también los forzantes meteorológicos.

- ***Geogrid.exe***

El propósito de geogrid es definir los dominios de simulación, e interpolar varios conjuntos de datos terrestres y fijarlos a la grilla del modelo. Los dominios se determinan utilizando la información que se entrega en la sección “geogrid” del archivo namelist.wps. Además de calcular la latitud, longitud y la resolución horizontal en cada cuadrícula. Geogrid también interpola las categorías de suelo, categorías de uso de suelo, altura del terreno, la temperatura media anual del suelo profundo, fracción de vegetación mensual, albedo mensual, máximo albedo de la nieve y las pendientes para cada punto de grilla.

- ***Ungrib.exe***

Este programa se encarga de leer y transformar los archivos meteorológicos de tipo GRIB en un formato intermedio. Este nuevo archivo se produce porque generalmente los archivos GRIB contienen más información de la que realmente se necesita para inicializar la simulación. Dependiendo de la fuente de la que se obtengan los archivos, el proceso de depuración que se requiere es diferente. Por ello, el programa incluye un conjunto de subprogramas denominados Vtables (los cuales deben ser seleccionados por el usuario) y hacen que la información sea comprendida por el programa.

- ***Metgrid.exe***

Este programa hace la interpolación horizontal de los archivos producidos por geogrid.exe y ungrib.exe. Es decir, los datos de variables estáticas uso del suelo, elevación con los datos meteorológicos. Los datos de salida al ejecutar el programa Metgrid son archivos NetCDF (.nc) Los archivos NetCDF son archivos multi-temporales, es decir, en un mismo archivo se almacenan varias capas unas encima de otras representando distintos periodos.

- ***Real.exe***

Este programa es el encargado de verificar que todas las condiciones estén listas

para correr el modelo y posteriormente interpola verticalmente los datos, dependiendo de las coordenadas η , para cada punto de retícula del dominio a simular

- ***Wrf.exe***

Es el último ejecutable, el cual corre todos los algoritmos y los resultados son entregados en archivos NetCDF en función de los parámetros indicados en el archivo `namelist.inp`

- ***Namelist.input***

En este archivo se configuran el tiempo de control del modelo, sus dominios, además de las parametrizaciones físicas y dinámicas utilizadas en la simulación

Anexo B

Índices estadísticos para validar el modelo.

Para llevar a cabo la validación de un modelo atmosférico se deben comparar dos señales: La simulada (Y) y la observada (O), para un numero N de valores, por lo tanto, los índices utilizados en este estudio se pueden definir de la siguiente manera:

- **Error de Sesgo:** El error de sesgo nos indica un error sistemático que esté ocurriendo de igual modo en todos los valores simulados de una variable, entregando información de subestimación, si el valor es negativo, y sobrestimación, si es positivo. Su valor se obtiene mediante la resta entre el promedio de los valores simulados y el promedio de las observaciones.

$$SESGO_{yx} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (Y_k - X_k) \quad (\text{B.0.1})$$

- **Coefficiente de correlación de Pearson:** El coeficiente de correlación de Pearson es una medida la cual nos advierte como covarían los resultados simulados con respecto a los observados. En otras palabras nos entrega el desfase que existe entre ellos. Se define como el cociente entre la covarianza de Y y X y el producto de las desviaciones estándar (s_y y s_x) de cada variable y se define como r_{yx} .

$$r_{yx} = \frac{COU_{yx}}{s_y s_x} = \frac{\sum_{k=1}^N (Y_k - \bar{Y})(X_k - \bar{X})}{\sum_{k=1}^N (Y_k - \bar{Y}) \sum_{k=1}^N (X_k - \bar{X})} \quad (\text{B.0.2})$$

El índice del coeficiente de correlación varía entre -1 y 1.

- si $r_{yx} = 1$, existe una correlación positiva perfecta, es decir si la variable observada aumenta, la simulada también lo debe hacer con la misma magnitud y viceversa.
 - si $0 < r_{yx} < 1$ existe una correlación positiva, mientras más se acerca a 1 la correlación será mayor, lo contrario ocurre si se aproxima a 0.
 - si $r_{yx} = 0$, no existe alguna relación lineal entre la simulación y la observación.
 - si $-1 < r_{yx} < 0$, existe una correlación negativa, y al igual que el segundo ítem, mientras más se acerque a -1 la correlación negativa será mayor.
 - si $r_{yx} = -1$, existe una correlación negativa perfecta, esto quiere decir si la observación aumenta, la simulación disminuye con la misma magnitud y viceversa.
- **Cociente entre las desviaciones estándar:** Este índice nos permite resolver si el modelo está sobrestimando o subestimando la amplitud de los datos. Consiste en el cociente entre la desviación estándar de los datos modelados y la desviación estándar de los datos observados. Si el valor es $>$ a 1 hay una sobrestimación y si el valor está entre 0 y 1 presenta una subestimación. Si el valor es $=$ 1 quiere decir que la amplitud de los resultados simulados es la misma que la de los datos observados.

$$COCIENTE_{s_y s_x} = \frac{s_y}{s_x} = \frac{\sum_{k=1}^N (Y_k - \bar{Y})}{\sum_{k=1}^N (X_k - \bar{X})} \quad (\text{B.0.3})$$

- **Raíz del error cuadrático medio (RECM):** Este indicador nos entrega el error total de la modelación con respecto a la simulación. La ventaja del RECM es que se puede aislar la influencia del error de sesgo del promedio, del error de sesgo de la desviación estándar y los problemas asociados con la correlación (Horvath et al., 2012; Murphy, 1988).

$$RECM_{yx} = \sqrt{(\bar{Y} - \bar{X}) + (s_y - s_x) + 2s_y s_x (1 - r_{yx})} \quad (\text{B.0.4})$$

Los tres términos de la derecha corresponden al sesgo del promedio, al sesgo de la desviación estándar y al error de dispersión (fase), respectivamente.

Bibliografía

- [1] Börgel, R. (1983). Geografía de Chile, Tomo Geomorfología. Santiago: Instituto Geográfico Militar Colección Geografía de Chile.
- [2] Bossard, M., Feranec, J., y Otahel, J. (2000). Corine Land Cover technical guide: Addendum 2000. European Environment Agency Copenhagen.
- [3] Buschmann, A. H., Riquelme, V. A., Hernández-González, M. C., Varela, D., Jiménez, J. E., Henríquez, L. A., Vergara, P. A., Guíñez, R., Filún, L. (2006). A review of the impacts of salmonid farming on marine coastal ecosystems in the southeast pacific. ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil , 63 (7), 1338–1345.
- [4] Bustamante, M. S. (2009). The southern chilean fjord region: Oceanographic Aspects. Marine Benthic Fauna of Chilean Patagonia. Santiago: Nature In Focus, 53–60.
- [5] Carrasco, J. F., Casassa, G., y Rivera, A. (2002). Meteorological and Climatological Aspects of the Southern Patagonia Icefield. En The patagonian icefields, 29–41.
- [6] Dee, D., Uppala, S., Simmons, A., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M.A., Balsamo, G., Bauer, P. y Bechtold, P.(2011). The ERA-interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 137 (656), 553–597.

- [7] De Meij, A., Bossioli, E., Penard, C., Vinuesa, J., y Price, I. (2015). The effect of SRTM and Corine Land Cover data on calculated gas and pm10 concentrations in WRF-chem. *Atmospheric Environment*, 101, 177–193.
- [8] De Meij, A., y Vinuesa, J. (2014). Impact of SRTM and Corine Land Cover data on meteorological parameters using WRF. *Atmospheric Research*, 143, 351–370.
- [9] Dudhia, J. (1989). Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 46 (20), 3077–3107.
- [10] Farmer, D., y Osborn, T. (1976). The influence of wind on the surface layer of a stratified inlet: Part I. observations. *Journal of Physical Oceanography*, 6 (6), 931–940.
- [11] Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L. y Seal, D. (2007). The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics*, 45 (2).
- [12] Garreaud, R., Lopez, P., Minvielle, M., y Rojas, M. (2013). Large-scale control on the patagonian climate. *Journal of Climate*, 26 (1), 215–230.
- [13] Garzón, J. E. (2014). Análisis del efecto de modificación de la geodatabase (uso del suelo, elevación) en el clima simulado por Weather Research and Forecasting - WRF para la sabana de Bogotá (Tesis de Máster no publicada). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C. Colombia.
- [14] Grell, G. A., Dudhia, J. D., Stauffer, D. R. y Devenyi, D. J. (1994). A description of the fifth- generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5). NCAR Technica Note NCAR/TN-398STR.
- [15] Horvath, K., Koracin, D., Vellore, R., Jiang, J., y Belu, R. (2012). Sub-kilometer dynamical downscaling of near-surface winds in complex terrain using WRF and MM5 mesoscale models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117 (D11).

- [16] Jeong, J. H., Song, S. K., Lee, H. W., y Kim, Y. K. (2012). Effects of high-resolution land cover and topography on local circulations in two different coastal regions of Korea: a numerical modeling study. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 118 (1-2), 1-20.
- [17] Josse, P., Caniaux, G., y Planton, S. (1999). Intercomparison of ocean-atmosphere fluxes from oceanic and atmospheric forced and coupled mesoscale simulations. *Annals of Geophysics*, 17, 566–576.
- [18] Kain, J. S., y Fritsch, J. M. (1990). A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 47 (23), 2784–2802.
- [19] Kain, J. S., y Fritsch, J. M. (1993). Convective parameterization for mesoscale models: The kain-fritsch scheme. En *The representation of cumulus convection in numerical models*. American Meteorological Society, 165–170.
- [20] Kalnay, E. (2003). *Atmospheric modeling, data assimilation and predictability*. Cambridge University Press.
- [21] Kim, J.C., Lee, C. B., Belorid, M., y Zhao, P. (2011). A study of sensitivity of wrf simulation to microphysics parameterizations, slope option and analysis nudging in haean basin, south korea. En *Proceedings of 2011 Terreco Science Conference*.
- [22] Large, W., Holland, W., y Evans, J. (1991). Quasi-geostrophic ocean response to real wind forcing: the effects of temporal smoothing. *Journal of Physical Oceanography*, 21 (7), 998–1017.
- [23] Larraín, S. (2007). Glaciares chilenos: Reservas estratégicas de agua dulce. *Ambiente y Desarrollo*, 23 (3), 28–35.
- [24] Lembeye, G. (2008). 6.3 harmful algal blooms in the austral chilean channels and fjords. En Silva, N y Palma S (eds.): *Progress in The Ocea-*

- nographic Knowledge of Chilean Interior Waters, from Puerto Montt to Cape Horn. , 99–103.
- [25] Lenaerts, J. T., Van den Broeke, M. R., Van Wessem, J. M., Van de Berg, W. J., Van Meijgaard, E., Van Uft, L. H., y Schaefer, M. (2014). Extreme precipitation and climate gradients in patagonia revealed by high-resolution regional atmospheric climate modeling. *Journal of Climate*, 27 (12), 4607–4621.
- [26] Mass, C. F., Ovens, D., Westrick, K., y Colle, B. A. (2002). Does increasing horizontal resolution produce more skillful forecasts? the results of two years of real-time numerical weather prediction over the pacific northwest. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83 (3), 407.
- [27] McQueen, J. T., Draxler, R. R., y Rolph, G. D. (1995). Influence of grid size and terrain resolution on wind field predictions from an operational mesoscale model. *Journal of Applied Meteorology*, 34 (10), 2166–2181.
- [28] Miao, J. F., Kroon, L., de Arellano, J. V.-G., y Holtslag, A. (2003). Impacts of topography and land degradation on the sea breeze over eastern Spain. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 84 (3-4), 157–170.
- [29] Michalakes, J., Loft, R., y Bourgeois, A. (2001). Performance-portability and the Weather Research and Forecast model. *HPC Asia 2001*.
- [30] Millan, M. M., Mantilla, E., Salvador, R., Carratalá, A., Sanz, M. J., Alonso, L., y Navazo, M. (2000). Ozone cycles in the western mediterranean basin: interpretation of monitoring data in complex coastal terrain. *Journal of Applied Meteorology*, 39 (4), 487–508.
- [31] Miller, A. (1976). The climate of Chile. *World Survey of Climatology*, 12 , 113–145.
- [32] Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J., y Clough, S. A. (1997). Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: Rrtm,

- a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102 (D14), 16663–16682.
- [33] Murphy, A. H. (1988). Skill scores based on the mean square error and their relationships to the correlation coefficient. *Monthly Weather Review*, 116 (12), 2417–2424.
- [34] National Centers for Environmental Prediction, N. U. D. o. C., National Weather Service. (2000). Ncep fnl operational model global tropospheric analyses, continuing from july 1999. Boulder CO: Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. Descargado de <http://dx.doi.org/10.5065/D6M043C6>
- [35] NCAR. (2010). User's guide for the nmm core of the weather research and forecast (wrf) modeling system (V3) [Manual de software informático]. Boulder, CO 80305, United States.
- [36] Pantoja, S., Iriarte, J. L., y Daneri, G. (2011). Oceanography of the chilean patagonia. *Continental Shelf Research*, 31 (3), 149–153.
- [37] Paruelo, J. M., Beltran, A., Jobbagy, E., Sala, O. E., y Golluscio, R. A. (1998). The climate of patagonia: general patterns and controls on biotic. *Ecol Austral*, 8, 85–101.
- [38] Peek, D., Helfrich, D. A., y Gorman, S. (2010). Environmental geographic information system. (Inf. Tec.). Sandia National Laboratories (SNL-NM), Albuquerque, NM (United States).
- [39] Prohaska, F. (1976). The climate of Argentina, Paraguay and Uruguay. *Climates of Central and South America*, 12, 13–112.
- [40] Rignot, E., Rivera, A., y Casassa, G. (2003). Contribution of the patagonia Icefields of South america to sea level rise. *Science*, 302 (5644), 434–437.

- [41] Rivera, A. (2004). Mass balance investigations at glaciar Chico, southern patagonia Icefield, Chile (Tesis Doctoral no publicada). University of Bristol.
- [42] Roe, G. H. (2005). Orographic precipitation. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 33 , 645–671.
- [43] Schaefer, M., Machguth, H., Falvey, M., y Casassa, G. (2013). Modeling past and future surface mass balance of the northern patagonia Icefield. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118 (2), 571–588.
- [44] Sievers, H. A., y Silva, N. (2006). 4.1 masas de agua y circulación en los canales y fiordos australes. *Avances En El Conocimiento Oceanográfico de Las Aguas Interiores Chilenas, Puerto Montt a Cabo de Hornos*, CONA-PUCV, Valparaíso, 53–58.
- [45] Skamarock, W. C. (2004). Evaluating mesoscale nwp models using kinetic energy spectra. *Monthly Weather Review* , 132 (12), 3019–3032.
- [46] Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Wang, W., y Powers, J. G. (2005). A description of the advanced research wrf version 2 (Inf. Tec.). DTIC Document.
- [47] Smith, R. B., y Evans, J. P. (2007). Orographic precipitation and water vapor fractionation over the southern Andes. *Journal of Hydrometeorology*, 8 (1), 3–19.
- [48] Snyder, J. P. (1982). Map projections used by the US Geological Survey (Inf. Tec.). US Government Printing Office.
- [49] Sukoriansky, S., Galperin, B., y Perov, V. (2005). Application of a new spectral theory of stably stratified turbulence to the atmospheric boundary layer over sea ice. *Boundary-Layer Meteorology*, 117 (2), 231–257.

- [50] Tachikawa, T., Hato, M., Kaku, M., y Iwasaki, A. (2011). Characteristics of ASTER GDEM version 2. En *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2011 IEEE International, 3657–3660).
- [51] Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106 (D7), 7183–7192.
- [52] Thompson, G., Rasmussen, R. M., y Manning, K. (2004). Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. part I: Description and sensitivity analysis. *Monthly Weather Review*, 132 (2), 519–542.
- [53] Uribe, A. (2012). Estimación de la capacidad del modelo WRF para pronosticar eventos extremos asociados con altas precipitaciones en la región andina colombiana (Tesis de Máster no publicada). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- [54] Van Meijgaard, E., Van Uft, L., Van de Berg, W., Bosveld, F., Van den Hurk, B., Lenderink, G., y Siebesma, A. (2008). The knmi Regional Atmospheric Climate model RACMO version 2.1. Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut.
- [55] Vike, S., Nylund, S., y Nylund, A. (2009). Isa virus in Chile: Evidence of vertical transmission. *Archives of Virology*, 154 (1), 1–8.
- [56] Villarroel, C., Carrasco, J. F., Casassa, G., y Falvey, M. (2013). Modeling near-surface air temperature and precipitation using WRF with 5-km resolution in the northern patagonia Icefield: A pilot simulation. *International Journal of Geosciences*, 4 (8), 1193.
- [57] Wilks, D. S. (2011). *Statistical methods in the atmospheric sciences* (Vol. 100). Academic press.

- [58] Zou, Z. C., y Deng, Y. C. (2015). Study on numerical simulation of wind field using three kinds of terrain data. *Water Resources and Power* , 1 , 051.