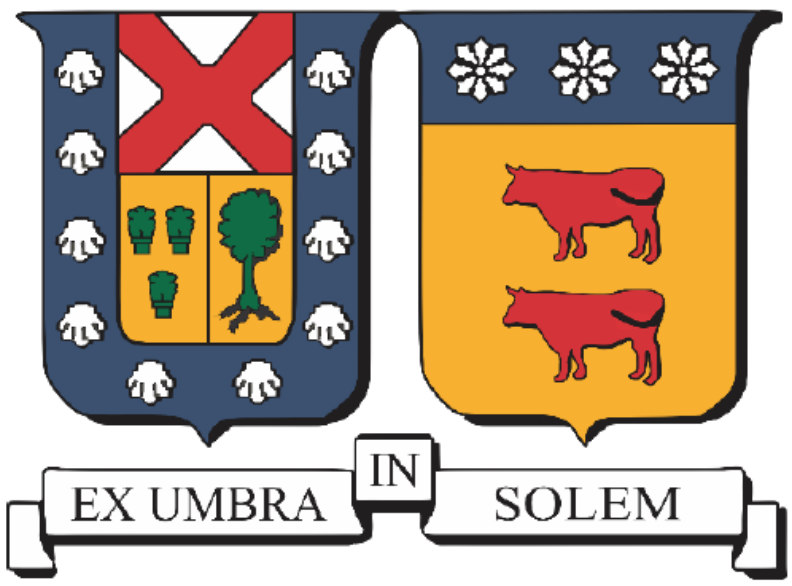
UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAISO – CHILE



ESTIMACIÓN DE EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA EN CHILE CONTINENTAL UTILIZANDO IMÁGENES SATELITALES Y PRODUCTOS GRILLADOS

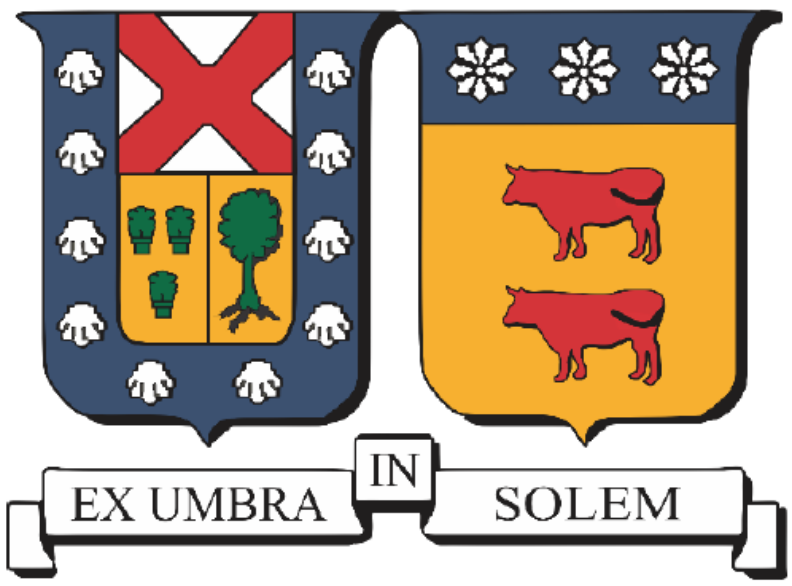
Memoria de titulación presentada por
VALENTINA ANDREA MERY PRENAFETA

Memoria para optar al Título de
Ingeniero Civil

Profesora Guía
Lina Castro Heredia

Marzo 2023

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAISO – CHILE



ESTIMACIÓN DE EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA EN CHILE CONTINENTAL UTILIZANDO IMÁGENES SATELITALES Y PRODUCTOS GRILLADOS.

Memoria de titulación presentada por
VALENTINA ANDREA MERY PRENAFETA

Como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Civil

Profesora Guía
Lina Castro Heredia

Marzo 2023

RESUMEN

En el presente trabajo se ha estimado la evapotranspiración de referencia (ET_o) a lo largo del territorio de Chile continental aplicando 6 metodologías de cálculo, correspondientes a Blaney y Criddle (BC), Hargreaves (HA), Hargreaves Simplificado (HS), Turc (TU), Turc Simplificado (TS) y el método FAO Penman Monteith (PM). Se han elaborado mapas de estimación de ET_o para Chile continental con cada una de las formulaciones consideradas, utilizando información meteorológica distribuida en el espacio, como los productos de temperatura CR2MET, velocidad del viento y horas de insolación provenientes del Explorador Solar, producto de albedo de MODIS. Adicionalmente, se ha estimado la ET_o a lo largo del país, a partir de datos medidos en una serie de estaciones meteorológicas pertenecientes a la DMC, las cuales cuentan con la información suficiente para la estimación de esta variable, para efecto de evaluar y comparar los resultados con los mapas de evapotranspiración generados. Además, los mapas de ET_o generados son contrastados con el producto de evapotranspiración de MODIS (PET), y con datos observados (DO) de evaporación de bandeja medida en estaciones meteorológicas ubicadas en distintas macrozonas del país.

De los resultados obtenidos mediante los productos grillados se desprende que, los mapas de evapotranspiración obtenidos para los 6 métodos presentan un comportamiento similar con estimaciones de ET_o máximas en la zona norte del país y mínimas en la zona austral, aunque difieren en la magnitud de estas. BC presenta valores de ET_o del orden de 250 a 1700 mm/año, HA muestra un rango de 124 a 1.827 mm/año, HS de 130 a 1.995 mm/año, PM exhibe un rango más amplio de ET_o de 350 a 2.500 mm/año, TU toma valores mínimos cercanos a 330 mm año y máximos en torno a 1.965 mm/año y TS presenta un rango de ET_o anual de 360 a 2.075 mm/año, estos últimos dos métodos tienen limitaciones para representar la zona austral. Las estaciones meteorológicas seleccionadas para estimar la ET_o se ubican desde la zona norte hasta la zona sur, sin contar con información para la zona austral por lo cual no pudo ser evaluada. Con esta información se calcula el error porcentual (PE) de cada método para comparar los valores de ET_o estimados mediante productos grillados y estadística de estaciones, el método de mejor desempeño es BC, luego HA, TU, PM, HS y TS con peor desempeño (PE más elevado). Comparando los resultados de estimación de ET_o de productos grillados y el producto PET de MODIS, se determina que para las zonas norte y norte chico PM muestra un mejor desempeño, en las zona centro y zona sur es BC el método que presenta más bajo PE y en la zona austral HA. Finalmente se comparan los DO de evaporación de bandeja con los resultados de evapotranspiración de referencia de productos grillados, con coeficiente de determinación R^2, error cuadrático medio normalizado NRMSE y PE como estimadores de desempeño, de estos se obtiene que HA presenta el mejor ajuste en estaciones pertenecientes a las zonas norte, centro y sur, TS es el método que mejor se ajusta a la estación de la zona norte chico y TU muestra un buen ajuste en una estación de la zona sur.

Los resultados no permiten concluir un único método representativo para cada macrozona, además se evidencia una carente representatividad territorial de los DO de evaporación de bandeja. Si bien este trabajo es un buen inicio para determinar la ET_o de forma distribuida en el espacio, se considera que incluir una mayor cantidad de estaciones con datos de evaporación medida, permitirá encontrar aquella metodología de mejor ajuste, con mayor grado de certeza.

ABSTRACT

In the present work, reference evapotranspiration (ET_o) has been estimated along the territory of continental Chile applying 6 methodologies, corresponding to Blaney and Criddle (BC), Hargreaves (HA), Hargreaves Simplified (HS), Turc (TU), Turc Simplified (TS) and the FAO Penman Monteith method (PM). ET_o estimation maps have been elaborated for continental Chile with the considered formulas, using spatially distributed meteorological information, such as CR2MET temperature products, wind speed and insolation hours from the Explorador Solar, MODIS albedo product. Additionally, ET_o has been estimated along the country, from data measured in a series of meteorological stations belonging to the DMC, which have sufficient information to estimate this variable, in order to evaluate and compare the results with the evapotranspiration maps generated. In addition, the ET_o maps generated are contrasted with the MODIS evapotranspiration product (PET), and with observed data (OD) of pan evaporation measured at meteorological stations located in different macrozones of the country.

From the results obtained using the gridded products, the evapotranspiration maps obtained for the 6 methods show a similar behavior with maximum ET_o estimates in the northern part of the country and minimum in the southern part, although they differ in their magnitude. BC presents ET_o values in the order of 250 to 1.700 mm/year, HA shows a range from 124 to 1.827 mm/year, HS from 130 to 1995 mm/year, PM exhibits a wider range of ET_o from 350 to 2.500 mm/year, TU takes minimum values close to 330 mm/year and maximum values around 1.665 mm/year and TS presents a range of annual ET_o from 360 to 2.075 mm/year, these last two methods have limitations to represent the southern zone. The meteorological stations selected to estimate ET are located from the northern to the southern zone, with no information available for the austral zone, so it could not be evaluated. With this information, the percentage error (PE) of each method is calculated to compare the ET_o estimated using gridded products and data from meteorological stations, the best performing method is BC, then HA, TU, PM, HS and TS the worst, with the highest PE. Comparing the ET_o results from gridded products and MODIS PET product, it is determined that for the northern zones PM shows a better performance, in the central and southern zones BC is the method with the lowest PE and in the austral zone HA is the method with the lowest PE. Finally, the pan evaporation data are compared with the reference evapotranspiration results of gridded products, with determination coefficient R^2, normalized root mean square error NRMSE and PE as performance estimators, from these it is obtained that HA presents the best adjustment in stations belonging to the northern, central and southern zones, TS is the method that best adjusts to the station of the small northern zone and TU shows a good adjustment in a station of the southern zone.

The results do not allow to conclude that a single method is representative for each macrozone, and there is a lack of territorial representativeness of the pan evaporation data. Although this work is a good start to determine spatially distributed ET_o, it is considered that including a greater number of stations with measured evaporation data, will allow to find the best-fit methodology with a higher degree of certainty.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN 1

2. OBJETIVOS 3

2.1. OBJETIVO GENERAL 3
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 3

3. MARCO TEÓRICO 4

3.1. MÉTODO FAO PENMAN MONTEITH 5

3.1.1. PRESIÓN ATMOSFÉRICA 6
3.1.2. CONSTANTE PSICROMÉTRICA 7
3.1.3. TEMPERATURA DEL AIRE 7
3.1.4. HUMEDAD DEL AIRE 8
3.1.5. RADIACIÓN 10
3.1.6. VIENTO ($u2$) 17

3.2. MÉTODO DE BLANEY Y CRIDDLE 18
3.3. MÉTODO DE HARGREAVES 19
3.4. MÉTODO DE TURC 20
3.5. ESTIMADORES DE DESEMPEÑO 21

4. LUGAR DE ESTUDIO 22

4.1. ZONAS NATURALES 22

4.1.1. ZONA NORTE (ZN) 23
4.1.2. ZONA NORTE CHICO (ZNC) 24
4.1.3. ZONA CENTRO (ZC) 25
4.1.4. ZONA SUR (ZS) 25
4.1.5. ZONA AUSTRAL (ZA) 26

5. BASE DE DATOS 28

5.1. EXPLORADOR SOLAR 28
5.2. ESTACIONES METEOROLÓGICAS 28

5.2.1. TEMPERATURA DEL AIRE, PUNTO DE ROCÍO, HUMEDAD DEL AIRE Y VIENTO 28
5.2.2. EVAPORACIÓN TOTAL DIARIA 30

5.3. PRODUCTOS GRILLADOS CR2MET 32
5.4. PRODUCTOS SATELITALES MODIS 32
5.4.1. ALBEDO (MODIS MCD43C3) 32
5.4.2. EVAPOTRANSPIRACIÓN (MOD16A3GF) 33
5.5. RESUMEN BASE DE DATOS 33
6. METODOLOGÍA 35
6.1. TRATAMIENTO DE DATOS 35
6.1.1. EXPLORADOR SOLAR 35
6.1.2. CR2MET 38
6.1.3. NASA SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHIC MISSION (SRTM) 39
6.1.4. MODERATE RESOLUTION IMAGING SPECTRORADIOMETER (MODIS) 39
6.1.5. ESTACIONES METEOROLÓGICAS 41
6.2. CÁLCULO DE ET CON CADA MÉTODO 41
6.2.1. METODOLOGÍAS DE CÁLCULO UTILIZANDO PRODUCTOS GRILLADOS, DATOS ESPACIALES E IMÁGENES SATELITALES 42
6.2.2. METODOLOGÍA DE CÁLCULO UTILIZANDO INFORMACIÓN DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS, EXPLORADOR SOLAR E IMÁGENES SATELITALES 44
6.2.3. DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN 46
7. RESULTADOS 48
7.1. ESTIMACIONES MEDIANTE UTILIZACIÓN DE PRODUCTOS GRILLADOS, DATOS ESPACIALES E IMÁGENES SATELITALES. 48
7.2. ESTIMACIONES MEDIANTE UTILIZACIÓN DE INFORMACIÓN DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS, EXPLORADOR SOLAR E IMÁGENES SATELITALES 54
7.3. COMPARACIÓN DE EVAPOTRANSPIRACIÓN ESTIMADA MEDIANTE PRODUCTOS GRILLADOS CR2METY POR ESTADÍSTICA DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS 60
7.4. COMPARACIÓN DE EVAPOTRANSPIRACIÓN ESTIMADA MEDIANTE PRODUCTOS GRILLADOS CR2MET Y PRODUCTO SATELITAL MODIS. 66
7.5. COMPARACIÓN DE EVAPOTRANSPIRACIÓN ESTIMADA MEDIANTE PRODUCTOS GRILLADOS CR2MET Y MEDIDA EN ESTACIONES METEOROLÓGICAS 73
8. DISCUSIÓN 82
9. CONCLUSIONES 91

REFERENCIAS **96**

ANEXO A **100**

ANEXO B **111**

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1: Variación anual de la radiación extraterrestre (Ra) en la Línea del Ecuador, Extremo norte de Chile, Zona Centro y Extremo sur de Chile. 11

Figura 3.2: Variación anual de las horas de luz durante un año en la Línea del Ecuador (latitud 0°), Extremo norte, Zona Centro y Extremo Sur de Chile. 14

Figura 4.1: Macrozonas de Chile. 23

Figura 5.1: Ubicación geográfica de estaciones meteorológicas de con estadística de temperatura del aire, punto de rocío, humedad del aire, viento y evaporación medidas, discretizadas por Macrozonas. 31

Figura 6.1: Esquema Metodológico. 35

Figura 6.2: Polígonos ESRI-Shapefile de subcuencas con sus respectivos centroides geométricos, en la zona norte de Chile. 36

Figura 7.1: Mapa de evapotranspiración media anual (2004-2016), a través de los métodos Blaney y Criddle (BC), Hargreaves (HA), Hargreaves simplificado (HS), Penman-Monteith (PM), Turc simplificado (TS) y Turc (TU). 49

Figura 7.2: Mapa de evapotranspiración media estacional, BC, HA, HS, PM, TS y TU. 51

Figura 7.3: Mapa de evapotranspiración media [mm/mes]en meses abril, mayo, junio, julio agosto y septiembre BC, HA, HS, PM, TS y TU. 52

Figura 7.4: Mapa de evapotranspiración media [mm/mes] en meses octubre, noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo diciembre, BC, HA, HS, PM, TS y TU. 53

Figura 7.5: Evapotranspiración media anual estimada mediante estadística de Estaciones Meteorológicas, calculada a nivel anual con los métodos BC, HA, HS PM, TS y TU. 55

Figura 7.6: Evapotranspiración media estacional estimada mediante estadística de Estaciones Meteorológicas, en las estaciones otoño, invierno, primavera y verano. 56

Figura 7.7: Evapotranspiración media mensual estimada mediante estadística de Estaciones Meteorológicas, en los meses abril, mayo, junio, julio, agosto y septiembre. 58

Figura 7.8: Evapotranspiración media mensual estimada mediante estadística de Estaciones Meteorológicas, en los meses octubre, noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo. 59

Figura 7.9. Error porcentual (PE), ET estimada mediante estaciones meteorológicas y a través de productos grillados, escala anual. De izquierda a derecha: BC, HA, TU, PM, HS, TS. 61

Figura 7.10: Error porcentual (PE), ET estimada mediante estaciones meteorológicas y a través de productos grillados, en temporada otoño, invierno, primavera y verano. De izquierda a derecha: BC, HA, TU, PM, HS, TS. 62
Figura 7.11: Error porcentual (PE), ET estimada mediante estaciones meteorológicas y a través de productos grillados, de abril a julio. De izquierda a derecha: BC, HA, TU, HS, TS, PM. 63
Figura 7.12: Error porcentual (PE), ET estimada mediante estaciones meteorológicas y a través de productos grillados, de agosto a noviembre. De izquierda a derecha: BC, HA, TU, HS, TS, PM. 64
Figura 7.13: Error porcentual (PE), ET estimada mediante estaciones meteorológicas y a través de productos grillados, de diciembre a marzo. De izquierda a derecha: BC, HA, TU, HS, TS, PM. 65
Figura 7.14: Error porcentual (PE), ET producto MODIS MOD16A3GF y a través de productos grillados CR2MET, media anual. 67
Figura 7.15: Histograma de error porcentual (PE) en zona norte del país, evaluando producto CR2MET en comparación con producto MODIS de ET. 68
Figura 7.16: Histograma de error porcentual (PE) en zona norte chico del país, evaluando producto CR2MET en comparación con producto MODIS de ET. 69
Figura 7.17: Histograma de error porcentual (PE) en zona centro del país, evaluando producto CR2MET en comparación con producto MODIS de ET. 70
Figura 7.18: Histograma de error porcentual (PE) en zona sur del país, evaluando producto CR2MET en comparación con producto MODIS de ET. 71
Figura 7.19: Histograma de error porcentual (PE) en zona austral del país, evaluando producto CR2MET en comparación con producto MODIS de ET. 72
Figura 7.20. Evapotranspiración medida y estimada mediante productos grillados CR2MET en las estaciones 230001, 290004, 330020, 360009 y 410005. 74
Figura 7.21: Evapotranspiración media diaria medida en comparación con ET estimada mediante los métodos BC, HA, HS, PM, TS y TU, en estación 230001. 76
Figura 7.22: Evapotranspiración media diaria medida en comparación con ET estimada mediante los métodos BC, HA, HS, PM, TS y TU, en estación 290004. 77
Figura 7.23:Evapotranspiración media diaria medida en comparación con ET estimada mediante los métodos BC, HA, HS, PM, TS y TU, en estación 330020. 78
Figura 7.24: Evapotranspiración media diaria medida en comparación con ET estimada mediante los métodos BC, HA, HS, PM, TS y TU, en estación 360019. 80
Figura 7.25: Evapotranspiración media diaria medida en comparación con ET estimada mediante los métodos BC, HA, HS, PM, TS y TU, en estación 410005. 81
Figura 8.1: Gráfica comparativa de temperatura media diaria de estación meteorológica versus temperatura media diaria CR2MET, para cada estación. 85
Figura 8.2: Gráfica comparativa de amplitud térmica de estación meteorológica versus amplitud térmica CR2MET, para cada estación. 86

Figura 8.3: Evapotranspiración diaria en la Estación 330077, estimada mediante productos grillados CR2MET y estadística de la Estación Meteorológica. 87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Resumen de estimadores de error. 21
Tabla 5.1. Estaciones Meteorológicas disponibles. 29
Tabla 5.2. Estaciones con medición de Evaporación de Tanque PAM. 31
Tabla 5.3. Resumen de variables y su fuente. 34
Tabla 6.1: Periodo de tiempo de las estaciones del año. 46
Tabla 7.1. Coeficiente de determinación (R^2), Error cuadrático medio normalizado (NRMSE) y Error porcentual (PE), de los métodos BC, HA, HS, PM, TS y TU. 73
Tabla 8.1. Sesgo de los datos de productos grillados CR2MET en comparación con estadística de Estaciones Meteorológicas, de temperatura media, amplitud térmica y temperaturas extremas. 82
Tabla 8.2. Resumen de mejores desempeños presentados por los métodos de acuerdo a cada zona natural, según comparación de ET CR2MET con ET MODIS y ET de Estaciones. 90

1. INTRODUCCIÓN

El consumo de agua en el mundo se hace mayor cada día y la disponibilidad del recurso escasea cada vez más, ya sea por el aumento de la población, o un incremento de la demanda de la industria (Molden et al., 2007). Si bien cerca de un 70% de la superficie del planeta Tierra está cubierto por agua, el 97,5% del total se encuentra principalmente en los océanos y el 2,5% que resta es agua dulce. El agua fresca disponible para uso humano, agrícola, industrial y otros solamente equivale a un 0,62% del total (DGA, 2016). En particular Chile está pasando por un déficit hídrico sin precedentes, es por esto que determinar la disponibilidad del recurso es de vital importancia para su gestión y administración responsable. Una de las variables que controlan el ciclo hidrológico es la evapotranspiración, esta debe ser estimada o medida con la mayor precisión posible.

Para tener una referencia de la evapotranspiración en cualquier zona de Chile, la Comisión Nacional de Riego (CNR) junto con el Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN) han elaborado un extenso informe que incluye el cálculo y la cartografía de la evapotranspiración en Chile que data del año 1997 (CNR y CIREN, 1997). En él se explican diferentes metodologías para la estimación de la evapotranspiración y la base estadística que fue utilizada, es decir, información de temperatura, humedad relativa, radiación, viento, etc. A lo largo del país se cuenta con estaciones meteorológicas que miden la evapotranspiración a través del Método de Bandeja, sin embargo, estas no cubren toda la extensión del país y cuentan con periodos acotados de medición.

Lo publicado por la CRN y CIREN fue un excelente aporte para la estimación de la evapotranspiración, sin embargo, en la actualidad es posible emplear una base de datos más amplia, no solamente para estaciones meteorológicas (datos puntuales), sino que también existen nuevas fuentes de información como los productos grillados en formato ráster de temperatura, información de imágenes satelitales, con las que se pueden realizar estimaciones de evapotranspiración a nivel de territorio nacional y de forma continua en el tiempo con diferentes metodologías de cálculo. Dentro de la información que se encuentra disponible existen los productos CR2MET (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, https://www.cr2.cl/datos-productos-grillados/) que corresponden a un conjunto de datos que contienen información meteorológica de temperatura, presentada en una cuadrícula rectangular

de 0,05°. Además, se encuentra disponible el producto MODIS MCD43C3 de albedo (MCD43 User Guide V006, https://www.umb.edu/spectralmass/terra_aqua_modis/v006), imágenes satelitales de gran utilidad en este contexto que entrega característica de reflectancia de la superficie en todo el territorio nacional. Otro producto MODIS de relevancia es el que estima la evapotranspiración de referencia basada en el método Penman Monteith, denominado MOD16A3GF (MOD16 User's Guide, Running et al., 2019), con el cual es posible evaluar y comparar las estimaciones de evapotranspiración obtenidas mediante los diferentes métodos a partir de productos grillados e imágenes satelitales.

Existe una gran cantidad de métodos para el cálculo de la evapotranspiración, la complejidad de estas se explica por la cantidad de información necesaria para su cálculo, en este estudio se consideran cuatro métodos, Blaney y Criddle, Turc, Hargreaves y Penman Monteith. El método de Blaney y Criddle (Doorenbos y Pruitt, 1977) es el de mayor simplicidad de todos, ya que para su procesamiento la base estadística a utilizar es solamente la temperatura media diaria. El método de Turc (1961), usa además de la temperatura media, información de humedad relativa media e incorpora a su cálculo la radiación solar global diaria. El método de Hargreaves (1975), al igual que Turc, utiliza estadística de temperatura media y radiación solar, al mismo tiempo, se ha incorporado una simplificación a este método, en que la radiación solar global es proporcional a la radiación extraterrestre y a la amplitud térmica (Hargreaves et al., 1985). Además, se aplica la metodología de FAO Penman Monteith (Allen et al., 1998) que involucra una mayor cantidad de variables meteorológicas en comparación con las ecuaciones anteriores, ya que utiliza temperaturas máximas y mínimas, radiación solar, nubosidad, albedo, velocidad del viento, entre otras, que lo vuelven un método más complejo respecto a los demás.

Considerando las metodologías recién expuestas y las nuevas fuentes de información meteorológica existentes, se calculará la evapotranspiración de referencia para Chile Continental, utilizando imágenes satelitales MODIS, datos grillados CR2MET y datos de observaciones meteorológicas de terreno. Con esta información se elaborarán mapas de evapotranspiración de referencia en diferentes escalas temporales, así mismo se analizarán estos resultados y comparará con estadística puntual de estaciones meteorológicas.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Calcular la evapotranspiración de referencia para Chile Continental, utilizando imágenes satelitales, datos grillados CR2MET y datos de observaciones meteorológicas de terreno.

2.2. Objetivos Específicos

- Revisar en la literatura información respecto a los métodos para la estimación de Evapotranspiración de referencia, los datos que estos métodos requieran y la disponibilidad de los mismos en diversas bases de datos (estaciones meteorológicas en terreno, imágenes satelitales, explorador solar, CR2MET, etc.).
- Aplicar 6 métodos para estimar la Evapotranspiración de referencia en todo el territorio chileno continental, en distintas escalas de tiempo (meses, estaciones del año y año hidrológico). Empleando programas computacionales y sistema de información geográfica (SIG).
- Analizar los resultados obtenidos de forma numérica y en mapas cartográficos, comparando los resultados obtenidos mediante productos grillados con los obtenidos en estaciones de monitoreo in situ, con las imágenes de evapotranspiración de MODIS (MOD16A3GF) y con los registrados en estaciones meteorológicas.

3. MARCO TEÓRICO

La evapotranspiración corresponde a la combinación de dos procesos en los que se involucra la pérdida de agua. El primero ocurre en la superficie del suelo mediante la evaporación y el segundo proceso ocurre desde la vegetación a través de la transpiración. La evaporación es un proceso donde el agua líquida contenida en una variedad de superficies (suelos húmedos, masas de agua dulce o salada, etc.) se convierte en vapor y que luego es removida desde la superficie evaporante. La transpiración consiste en la vaporización del agua que se encuentra contenida dentro de los tejidos de las plantas. El cultivo pierde agua a través de las estomas, que son pequeños poros en la hoja de la planta por los cuales atraviesa el vapor de agua hacia el ambiente, y luego este vapor es removido hacia la atmósfera (Allen et al, 1996).

Para pasar de estado líquido a vapor una molécula de agua es necesario energía. Esta energía es aportada por la radiación solar y por la temperatura ambiente. Cuando ocurre la evaporación, el aire circundante se va saturando de manera gradual, el proceso se hace más lento hasta detenerse si el aire completamente saturado no es transferido a la atmósfera. Para retirar este vapor de agua desde la superficie es necesario que exista una diferencia entre la presión del vapor de agua de la superficie y la presión de vapor de la atmósfera, luego el reemplazo del aire saturado por uno seco va a depender del viento. La transpiración de igual manera que la evaporación necesita un aporte energético, y también depende del gradiente de presión de vapor y de la velocidad del viento. Por lo tanto, para la estimación de la evapotranspiración deben ser consideradas diferentes variables climatológicas, como lo es la radiación solar, la temperatura del aire, humedad de la atmósfera y la velocidad del viento (Allen et al., 1998).

La literatura especializada distingue conceptualmente tres tipos de evapotranspiración, que consisten en la evapotranspiración real (ET_a), evapotranspiración potencial (ET_p) y evapotranspiración de cultivo de referencia (ET_o). La ET_a se define como la porción de agua que realmente es evapotranspirada, y se encuentra limitada por la cantidad de agua disponible (National Centers for Environmental Information, 2023), de esta forma ET_a siempre será menor o igual que la ET_p. El término ET_p hace referencia a la demanda o máxima cantidad de agua que se puede evapotranspirar, suponiendo que en todo momento existe disponibilidad de agua necesaria para satisfacer las necesidades transpirativas de la planta (Stowhas, 2016). Se denomina ET_o a la tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia sin restricciones de agua. Esta

superficie corresponde a un cultivo hipotético, con características específicas, Doorenbos y Pruitt (1977) no recomiendan usar otros nombres como evapotranspiración potencial porque existen ambigüedades en su definición. Al existir una relación entre la evapotranspiración y una superficie específica es posible tener una referencia para poder comparar la evapotranspiración de otras superficies, y se puede comparar los valores estimados de ET_o en diferentes zonas o épocas del año. La evapotranspiración de cultivo de referencia indica el poder evaporante de la atmósfera en una zona geográfica y temporada determinadas, y no considera las características del cultivo y ni los factores del suelo. Siendo los parámetros climáticos, los únicos factores que intervendrán en la estimación de la ET_o. Cabe destacar que la evapotranspiración de referencia estimada mediante el método Penman Monteith utiliza un cultivo hipotético con características específicas e incorpora explícitamente parámetros fisiológicos y aerodinámicos de dicho cultivo (Allen et al., 1998). Para la estimación de la evapotranspiración de referencia en la presente memoria, se proponen algunos de los métodos señalados en CNR-CIREN (1997), que indica la pertinencia de las fórmulas elegidas, y por Hargreaves et al. (2003) que introduce otro método y una variación de este para compensar la falta de información de nubosidad en la zona. A continuación, se presentan los diferentes métodos utilizados.

3.1. Método FAO Penman Monteith

En mayo de 1990 fue convocado un panel de expertos e investigadores relacionados al riego, junto a la Comisión Internacional para el Riego y Drenaje y la Organización Meteorológica Mundial, para la revisión de las metodologías propuestas anteriormente por la FAO para el cálculo de requerimientos de agua de los cultivos y la elaboración de recomendaciones acerca de la revisión y actualización de procedimientos relacionados. El panel recomendó adoptar como método estandarizado para calcular la evapotranspiración de referencia (ET_o) el método combinado de Penman Monteith. Este método utiliza la definición de cultivo de referencia, un cultivo hipotético con características específicas de altura igual a 12 cm, albedo de 0.23 y resistencia superficial de 70 s/m, esta superficie de referencia es similar a una superficie extensa de pasto verde con altura uniforme, que crece de manera activa con un adecuado aporte de agua y que cubre completamente el suelo. Con el método de FAO Penman Monteith los valores obtenidos de la evapotranspiración de esta superficie de referencia son consistentes para cualquier región, clima o temporada. La ecuación que describe el cálculo de este método es la siguiente:

$$ET_o = \frac{0{,}408\,\Delta\,(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273}\,u_2\,(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma\,(1 + 0{,}34\,u_2)} \quad (1)$$

donde:

ET_o : Evapotranspiración de referencia, en $[mm/día]$.

R_n : Radiación neta en la superficie de cultivo, en $[MJ/m^2/día]$.

G : Flujo de calor hacia el suelo, en $[MJ/m^2/día]$.

T : Temperatura media diaria del aire a 2 m de altura, en $[°C]$.

u_2 : Velocidad del viento a 2 m de altura, en $[m/s]$.

e_s : Presión de vapor de saturación, en $[kPa]$.

e_a : Presión real de vapor, en $[kPa]$.

$e_s - e_a$: Déficit de presión de vapor, en $[kPa]$.

Δ : Pendiente de la curva de presión de vapor, en $[kPa/°C]$.

γ : Constante psicrométrica, en $[kPa/°C]$.

A continuación, se explican los parámetros atmosféricos y factores meteorológicos que determinan la evapotranspiración. Se hace énfasis en que los métodos de determinación de la ET_o utilizados en esta memoria también consideran estos parámetros, por lo tanto, la definición realizada en los capítulos siguientes también aplicará para estos métodos.

3.1.1. Presión atmosférica

Corresponde a la presión ejercida por el peso de la atmósfera terrestre, por lo que a medida que aumenta la altura esta presión disminuye. La evaporación del agua en sectores altos ocurre en cierta medida por la baja presión atmosférica (P), para calcularla se emplea una fórmula simplificada de la Ley de gases ideales a temperatura estándar 20 $°C$ (Allen et al., 1998), que se expone a continuación:

$$P = 101{,}3\left(\frac{293 - 0{,}0065\,z}{293}\right)^{5{,}26} \quad (2)$$

donde:

P : Presión atmosférica, en $[kPa]$.

z : Elevación sobre el nivel del mar, en $[m]$.

3.1.2. Constante Psicrométrica

La constante psicrométrica se calcula a partir de la ecuación, según Allen et al. (1998):

$$\gamma = \frac{c_P\, P}{\varepsilon\, \lambda} = 0{,}665 * 10^{-3} * P \tag{3}$$

donde:

γ : Constante psicrométrica, en $[kPa/°C]$.

P : Presión atmosférica, en $[kPa]$.

λ : Calor latente de vaporización, igual a $2{,}45\ [MJ/kg]$.

c_P : Calor específico a presión constante, igual a $1{,}013 * 10^{-3} [MJ/kg/°C]$.

ε : cociente del peso molecular de vapor de agua/aire seco, igual a $0{,}622$.

A continuación, se exponen los factores meteorológicos que intervienen en la evapotranspiración, como la temperatura, humedad del aire, radiación y velocidad del viento.

3.1.3. Temperatura del aire

La temperatura del aire varía principalmente por dos factores: la radiación solar absorbida por la atmósfera y las variaciones en el balance de energía superficial. Lo anterior se traduce en que, en un día cálido y soleado, la tasa de evapotranspiración será mayor en comparación con un día nublado y frío. En el cálculo de la evapotranspiración se necesita información de la Temperatura máxima diaria del aire (T_{max}), Temperatura mínima diaria del aire (T_{min}), que son respectivamente la máxima y la mínima temperatura del aire observadas en un período de 24 horas, y la Temperatura media diaria del aire, que se calcula de la siguiente forma:

$$T_{media} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \tag{4}$$

Las primeras dos (T_{max} y T_{min}) se utilizan para calcular la presión de vapor de saturación (e_s), la radiación neta de onda larga (R_{nl}) y en casos especiales para el cálculo de presión real de

vapor (e_a). Mientras que la T_{media} se utiliza para obtener Δ, pendiente de la curva de presión de saturación. Para estandarización de las mediciones estas deben ser tomadas a 2 m del suelo.

3.1.4. Humedad del aire

La diferencia entre la presión de vapor de agua en la superficie y el aire circundante es un factor importante en la remoción del vapor. Por ejemplo, si se tienen áreas con suelos bien regados en zonas áridas y calientes, estas consumirán enormes cantidades de agua gracias a que existe alta disponibilidad de energía y debido a la sequedad del aire que otorgará gran capacidad de extracción de vapor por la atmosfera. Por otra parte, si se tiene una zona húmeda y con alta disponibilidad de energía, la elevada humedad del aire hace que disminuya la cantidad de evapotranspiración, ya que el aire circundante que se encuentra cerca de estar saturado va absorbiendo menos agua hasta estar saturado, entonces los niveles de evapotranspiración serán menores en comparación con el caso anteriormente descrito. La humedad del aire o el contenido de agua del aire puede ser expresado de diferentes maneras, temperatura del punto de condensación o punto de rocío, presión de vapor y humedad relativa.

- **Temperatura del Punto de Rocío**

El punto de rocío o punto de condensación ($T_{rocío}$) corresponde a la temperatura a la cual el aire debe ser enfriado, manteniendo la presión de vapor constante, para saturarlo. Es decir, la presión real de vapor del aire es igual a la presión de saturación de vapor a la temperatura del punto de condensación. Esta temperatura es una medida de la sequedad del aire, entonces mientras más seco este se encuentre su punto de rocío será más bajo.

- **Presión media de vapor de saturación**

La presión de saturación de vapor puede ser calculada como función de la temperatura del aire, y su relación se presenta en la siguiente ecuación (Allen et al., 1998):

$$e°(T) = 0{,}6108 * \exp\left[\frac{17{,}27 * T}{T + 237{,}3}\right] \quad (5)$$

donde:

$e°(T)$: Presión de saturación de vapor a temperatura del aire T, en $[kPa]$.

T : Temperatura del aire, en $[°C]$.

La presión media de saturación de vapor para un día debe ser calculada como el promedio entre la presión de vapor de saturación a la temperatura máxima diaria y a la temperatura mínima diaria, como se expresa en la ecuación (6), utilizando la fórmula (5) de $e°(T)$,

$$e_s = \frac{e°(T_{max}) + e°(T_{min})}{2} \quad (6)$$

Cabe destacar que el uso de T_{media} del aire en vez de usar temperatura mínima y máxima, provocará subestimaciones de la presión media de saturación de vapor, por consiguiente, generará una subestimación en el cálculo de la evapotranspiración de referencia.

- **Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor (Δ)**

Corresponde a la pendiente de la relación entre la presión de saturación de vapor y la temperatura, está pendiente (Δ) a una temperatura dada se observa en la ecuación (7), y se calcula utilizando la temperatura media diaria del aire (T_{media}), según Allen et al. (1998):

$$\Delta = \frac{4098 * \left[0{,}6108 * \exp\left(\frac{17{,}27 * T}{T + 237{,}3}\right)\right]}{(T + 237{,}3)^2} \quad (7)$$

donde:

Δ : Pendiente de la curva de la presión de vapor saturado a temperatura del aire T, medido en $[kPa/°C]$.

T : Temperatura del aire $[°C]$.

- **Presión real de vapor (e_a), a partir de temperatura del punto de rocío**

Como se dijo anteriormente, la temperatura de rocío corresponde a la temperatura a la cual el aire debe ser enfriado para saturarlo. Entonces la presión real de vapor corresponde a la presión de saturación de vapor a temperatura de rocío (en $°C$).

$$e_a = e°(T_{rocío}) = 0{,}6108 * \exp\left[\frac{17{,}27 * T_{rocío}}{T_{rocío} + 237{,}3}\right] \quad (8)$$

- **Presión real de vapor (e_a), a partir de temperatura mínima**

En el caso particular en que no haya disponibilidad de datos de humedad, es posible realizar una estimación de la presión real de vapor asumiendo que la temperatura del punto de rocío sea similar a la temperatura mínima diaria, para esto se asume que cuando sale el sol la

temperatura del aire está cerca de T_{min} y el aire se encuentra casi en punto de saturación, la humedad relativa es cercana al 100%. Luego en la ecuación (9) se reemplaza $T_{rocío}$ por T_{min}:

$$e_a = e°(T_{min}) = 0{,}6108 * \exp\left[\frac{17{,}27 * T_{min}}{T_{min} + 237{,}3}\right] \quad (9)$$

- **Humedad Relativa (HR)**

Este factor representa una medida cuantitativa del nivel de saturación del aire a una temperatura dada. La humedad relativa puede calcularse como la relación entre la presión real de vapor a una temperatura dada y la presión de saturación de vapor a la misma temperatura T. Puede describirse entonces, como la relación entre la cantidad de agua que el aire tiene realmente a una temperatura determinada y la cantidad que podría llegar a tener si estuviera saturado a esa misma temperatura, este cociente normalmente se expresa porcentualmente (Allen et al., 1998).

$$HR = \frac{e_a}{e°(T)} * 100 \quad (10)$$

- **Déficit de presión de vapor ($e_s - e_a$)**

Como su nombre lo indica, el déficit de presión de vapor es la diferencia entre la presión de saturación y la presión real de vapor durante un periodo de tiempo, en este caso se utilizará una escala temporal diaria. Para el cálculo de e_s se usará la ecuación (6) con datos de T_{max} y T_{min}. Para e_a dependiendo de las mediciones con las que se cuenta, se usará la ecuación (8) o (9).

3.1.5. Radiación

La radiación solar es la fuente energética de mayor importancia del planeta, y como se dijo anteriormente el proceso de la evapotranspiración queda determinado por la cantidad de energía que se encuentra disponible para la evaporación. Esta cantidad de energía disponible se encuentra determinada por su ubicación geográfica y la temporada. Esto quiere decir que la cantidad de radiación va a depender de la latitud y de la estación del año en que se encuentre la zona de estudio, ya que la radiación es diferente según la posición que la Tierra tenga relativa al Sol. También debe ser tomado en consideración que no toda la radiación que llega a la Tierra alcanza la superficie en estudio, ya que esta dependerá de la transparencia de la atmósfera. Por lo tanto, una parte de la radiación podrá ser reflejada o absorbida por las nubes y la otra parte que ingresa será utilizada para calentar la atmósfera y el suelo para luego estar disponible para la evapotranspiración.

- **Radiación Extraterrestre (R_a)**

La radiación solar que llega a la Tierra en la parte superior de la atmósfera se le llama radiación extraterrestre, y está condicionada por el ángulo que existe entre la superficie de la atmósfera y la dirección que tienen los rayos del Sol. O sea, por la ubicación geográfica y por el momento del día, además es variable para cada estación del año, debido a los movimientos de rotación y traslación de la Tierra alrededor del Sol. En la Figura 3.1 se puede observar cómo cambia la Radiación extraterrestre a lo largo de un año, en distintas latitudes representativas del país y en la Línea del Ecuador (latitud 0°). Alcanzando sus valores máximos en la época estival y mínimos en temporada invernal del hemisferio sur.

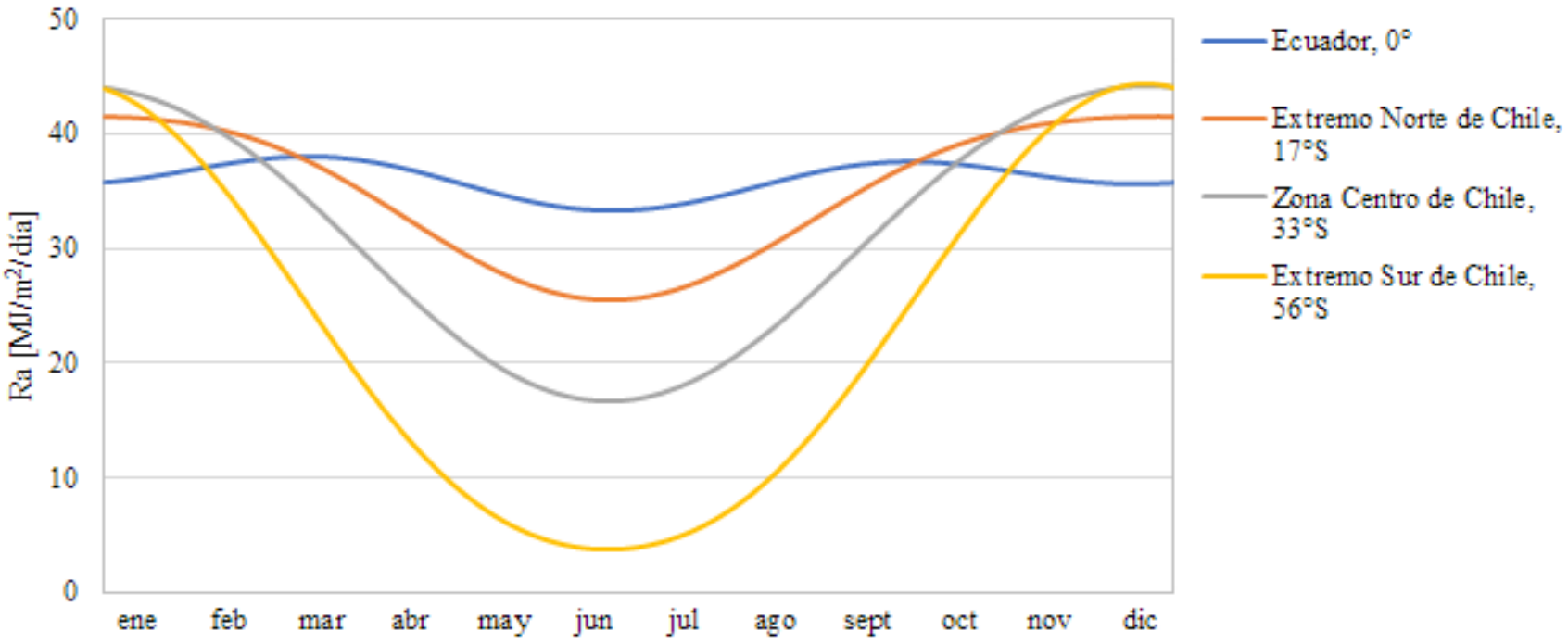


Figura 3.1: Variación anual de la radiación extraterrestre (R_a) en la Línea del Ecuador, Extremo norte de Chile, Zona Centro y Extremo sur de Chile.

La Radiación extraterrestre es en función de la constante solar, día del año (posición de la Tierra respecto del Sol), y latitud de la zona de estudio. La fórmula que describe R_a se observa en la ecuación (11), en este caso el cálculo se realiza para periodos diarios (Allen et al., 1998).

$$R_a = \frac{24 * 60}{\pi} G_{sc}\, d_r\, [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \qquad (11)$$

donde:

R_a : Radiación extraterrestre, en $[MJ/m^2/día]$.

G_{sc} : Constante solar, igual a 0,082 $[MJ/m^2/min]$.

d_r : Distancia relativa inversa Tierra-Sol.

ω_s : Ángulo de radiación a la puesta del sol, en $[rad]$.

φ : Latitud, en $[rad]$.

δ : Declinación solar, en $[rad]$.

La distancia relativa inversa Tierra-Sol (d_r) es:

$$d_r = 1 + 0{,}033 * \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (12)$$

La declinación solar, se describe como:

$$\delta = 0{,}409 * \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1{,}39\right) \quad (13)$$

Para ambas ecuaciones J corresponde al día del año, que va desde 1 (1 de enero) a 365 (31 de diciembre), en el caso de corresponder a año bisiesto se suma 1 a los días posteriores al 29 de febrero, de esta manera el día 366 será ahora 31 de diciembre. El ángulo de radiación a la puesta del sol (ω_s), es función de la latitud de la zona en estudio y la declinación solar, ambas en radianes, y se presenta a continuación:

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) * \tan(\delta)] \quad (14)$$

- **Radiación de onda corta (R_s)**

Como se señaló anteriormente, cuando la radiación atraviesa la atmósfera una parte de ella es reflejada, absorbida o dispersada por la atmósfera, las nubes o gases. La radiación que logra llegar a un plano horizontal en la superficie de la Tierra es la radiación solar o radiación de onda corta, debido a que la energía emitida por el sol es mediante ondas electromagnéticas de corta longitud de onda. Esta radiación también es conocida como radiación global y corresponde a la suma de radiación directa y radiación difusa. A continuación, se expone la fórmula de Angstrom modificada por Prescott (1940), que describe la relación entre la radiación de onda corta con la radiación extraterrestre

$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N}\right) R_a \quad (15)$$

donde:

R_s : Radiación solar o radiación de onda corta, en $[MJ/m^2/día]$.

R_a : Radiación extraterrestre, en $[MJ/m^2/día]$.

n : Duración real de la insolación, en $[hora]$.

N : Duración máxima posible de la insolación, en $[hora]$.

$\frac{n}{N}$: Duración relativa de la insolación, adimensional.

a_s : Constante de regresión que expresa la fracción de radiación extraterrestre que llega a la tierra en días completamente nublados ($n = 0$).

$a_s + b_s$: Fracción de la radiación extraterrestre que llega a la tierra en días despejados, con ($n = N$).

Allen et al. (1998) recomienda valores de $a_s = 0{,}25$ y $b_s = 0{,}50$ en el caso que no haya disponibilidad de datos reales de radiación solar y tampoco se hayan realizado calibraciones previamente. En este caso se adoptan dichos valores, ya que AGRIMED (2015) igualmente recomienda estos valores. La duración máxima de la insolación (N), al igual que la radiación extraterrestre depende de la posición de la Tierra respecto al Sol, es decir, se encuentra determinada por el ángulo de radiación a la hora de la puesta del sol ω_s ecuación (14), entonces es función de la latitud y del día del año, y está descrita por la ecuación (16)

$$N = \frac{24}{\pi}\omega_s \tag{16}$$

En la Figura 3.2 se muestra una gráfica que ilustra la variación anual de las horas de luz durante un año en distintas latitudes representativas del país y en la Línea del Ecuador.

- **Duración solar relativa (n/N)**

Esta relación entre la duración real de insolación (n) y la duración máxima de insolación durante un día representa la nubosidad que experimenta la zona durante el día. Por ejemplo, si se tiene un día completamente nublado $n = 0$, luego la relación $\frac{n}{N} = 0$, realizando el cálculo para un día despejado se tendrá que $n = N$ entonces la duración solar relativa será igual a 1.

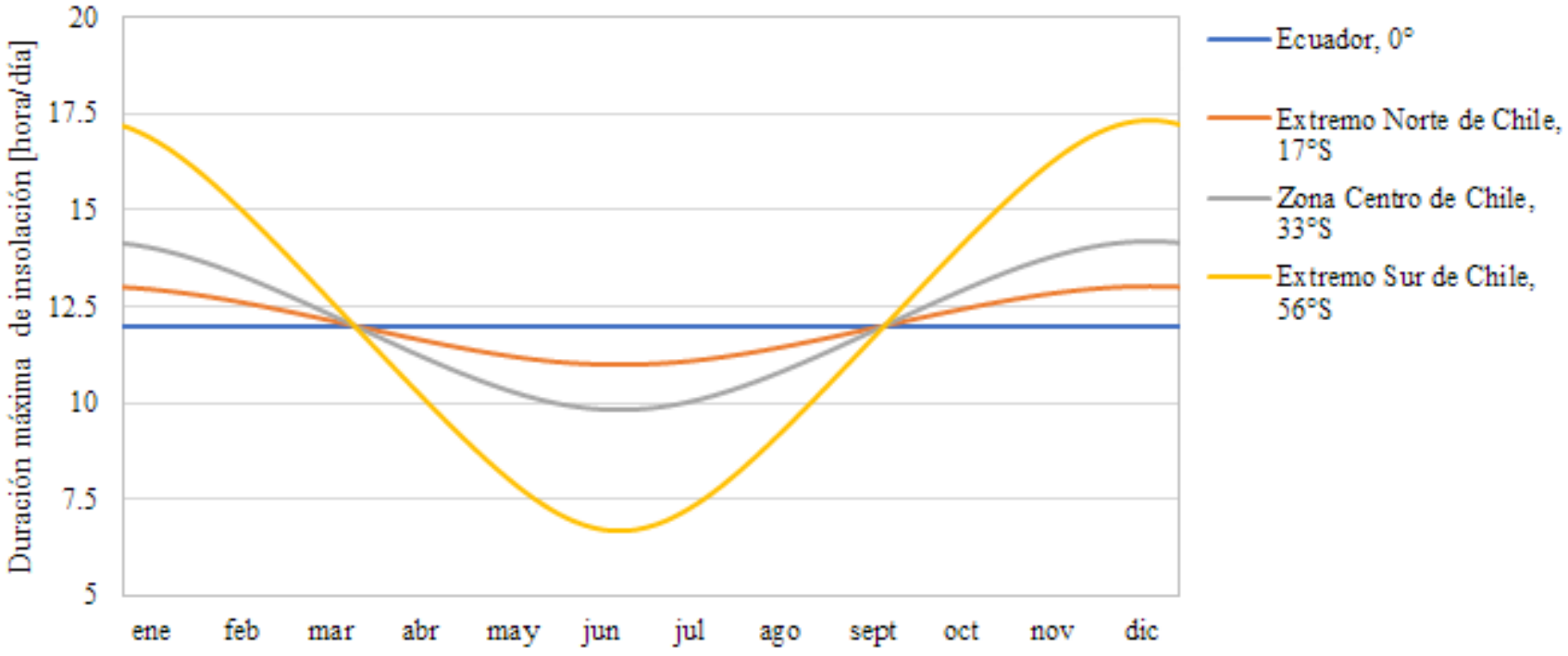


Figura 3.2: Variación anual de las horas de luz durante un año en la Línea del Ecuador (latitud 0°), Extremo norte, Zona Centro y Extremo Sur de Chile.

- **Radiación Solar en un día despejado (R_{so})**

La radiación solar en días despejados ocurre cuando $n = N$, y se calcula de manera similar a la radiación solar R_s.

$$R_{so} = (a_s + b_s)\, R_a \tag{17}$$

donde:

R_{so} : Radiación solar de onda corta en un día despejado, en $[MJ/m^2/día]$.

$a_s + b_s$: Fracción de la radiación extraterrestre que llega a la tierra en días despejados, con $(n = N)$.

Cuando los valores calibrados de a_s y b_s no estén disponibles se utiliza la siguiente relación, donde R_{so} depende de la altitud z [m.s.n.m.] y de R_a (Allen et al., 1998).

$$R_{so} = (0{,}75 + 2 * 10^{-5} * z)\, R_a \tag{18}$$

Por lo tanto, se adopta esta función para estimar el valor de R_{so}.

- **Radiación Relativa de onda corta (R_s/R_{so})**

Esta relación representa la nubosidad que existe en la atmósfera, ya que el primer término de radiación de onda corta expresa la radiación solar que llega a la superficie de manera real, y el segundo término radiación solar de un día despejado indica la máxima radiación que llegaría a la superficie si no existieran nubes durante todo el día. Su valor aumenta de manera proporcional a

un aumento de la radiación de onda corta, por ejemplo, si existe escasa nubosidad, por lo tanto, mayor número de horas de sol en el día este valor será cercano a 1.

- **Radiación neta solar (R_{ns})**

Corresponde a la fracción de radiación solar de onda corta que no es reflejada por la superficie, también se denomina Radiación neta de onda corta. La fracción de radiación que si es reflejada por la superficie se llama albedo (α). La función que relaciona ambas variables es de acuerdo con Allen et al. (1998):

$$R_{ns} = (1 - \alpha)\, R_s \tag{19}$$

donde:

R_{ns} : Radiación neta solar, en $[MJ/m^2/día]$.

α : Coeficiente de reflexión del cultivo o albedo, adimensional.

R_s : Radiación solar o de onda corta, en $[MJ/m^2/día]$.

- **Albedo (α)**

Esta variable que influye directamente en el cálculo de la radiación neta de onda corta va a depender del tipo de superficie que recibe esta radiación, su valor fluctúa entre 0 y 1 mientras más alto sea mayor será la radiación solar reflejada. Por ejemplo, la nieve recién caída alcanza valores cercanos a $\alpha = 0{,}95$ y superficies que reflejan poco como sería un suelo húmedo y desprovisto de vegetación tiene albedo cercano a $\alpha = 0{,}05$ (Instituto Murciano de Investigación y desarrollo Agrario y Alimentario IMIDA, 2019).

- **Radiación neta de onda larga (R_{nl})**

Una parte de la radiación que llega a la Tierra es absorbida por ella y se transforma en energía térmica, esta a su vez es emitida por el planeta en forma de radiación, al ser de una longitud de onda más larga que la radiación emitida por el Sol, se le denomina de esa forma. Esta radiación de onda larga que emite la Tierra una parte es absorbida por la atmósfera y otra liberada al espacio, la atmósfera aumenta su temperatura, y luego libera esa energía térmica en forma de radiación de onda larga, parte de esta se dirige nuevamente a la superficie terrestre. Entonces la diferencia que existe entre la radiación de onda larga recibida por la Tierra y emitida por esta se denomina radiación neta de onda larga (R_{nl}). El cálculo de la energía emitida en proporcional a la

temperatura (en $°K$) de la superficie, y se expresa por la Ley de Stefan-Boltzmann. Como se dijo antes, la atmósfera absorbe parte de esta energía y la emite, es por esto que se toma en consideración en el cálculo de la R_{nl} la humedad y nubosidad existente. La fórmula que relaciona todas estas variables se encuentra en la ecuación (20), según Allen et al. (1998).

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{{T_{max,K}}^4 + {T_{min,K}}^4}{2}\right] (0{,}34 - 0{,}14\sqrt{e_a}) \left(1{,}35\frac{R_s}{R_{so}} - 0{,}35\right) \quad (20)$$

donde:

R_{nl} : Radiación neta de onda larga, en $[MJ/m^2/día]$.

σ : Constante de Stefan-Boltzmann igual a $4{,}903 * 10^{-9}[MJK^{-4}m^{-2}día^{-1}]$.

$T_{max,K}$: Temperatura máxima absoluta durante un periodo de 24 horas, en $[°K]$.

$T_{min,K}$: Temperatura mínima absoluta durante un periodo de 24 horas, en $[°K]$.

e_a : Presión de vapor real, en $[kPa]$.

R_s/R_{so}: Radiación relativa de onda corta, toma valores ≤ 1.

R_s : Radiación solar calculada, en $[MJ/m^2/día]$.

R_{so} : Radiación solar en un día despejado, en $[MJ/m^2/día]$.

- **Radiación Neta (R_n)**

La radiación neta es la diferencia entre la radiación neta de onda corta (R_{ns}) y la radiación neta de onda larga (R_{nl}). En este término refleja el equilibrio existente en la superficie de la Tierra, en él se conjugan la radiación absorbida y reflejada tanto de onda corta como de onda larga, y se describe según la ecuación (21).

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (21)$$

- **Flujo de Calor del Suelo (G)**

Corresponde a la energía que se utiliza para calentar el suelo, toma valores positivos cuando el suelo se calienta y valores negativos cuando se enfría. La cantidad de energía utilizada por el suelo deberá ser agregada o restada a la radiación solar. El valor de G en comparación con R_n es muy pequeño, particularmente cuando se tiene una superficie cubierta por vegetación y el periodo de cálculo es de 24 horas. Basándose en la idea de que la temperatura del suelo tiene

similar tendencia a la temperatura del aire, el cálculo de G se relaciona con la temperatura del aire al momento del cálculo y del tiempo anterior, la capacidad calorífica del suelo, el intervalo de tiempo a calcular y la profundidad efectiva del suelo. Esta profundidad efectiva para periodos de tiempo pequeños (unos pocos días) alcanza de 10 a 20 cm y para intervalos mensuales puede ser de 2 o más metros. Entonces para periodos diarios, la magnitud del flujo de calor bajo el suelo es pequeño, por lo tanto, puede ser ignorada (Allen et al., 1998), entonces se toma:

$$G_{día} \approx 0 \ [MJ/m^2/día] \tag{22}$$

3.1.6. Viento (u_2)

El viento interviene en el proceso donde se remueve el vapor de la superficie evaporante hacia la atmósfera, es decir, el viento promueve el transporte del vapor ayudando en el retiro de este desde la superficie. Sin embargo, su efecto puede ser de mayor o menor importancia dependiendo de las otras variables que intervienen en la evapotranspiración. Por ejemplo, si se tiene una región con condiciones de gran humedad y alta presencia de nubes, por muy alta que sea la velocidad del viento, este solamente puede remover una masa de aire saturado por otra con menor grado de saturación, pero cercana a la saturación, influyendo de manera leve en la estimación de la evapotranspiración. En cambio, si se tiene una zona árida con condiciones de altas temperaturas y aire seco, se dispone de mayor energía para evapotranspirar y sumado a una velocidad de viento alta, en este caso el viento transportará el aire saturado y lo reemplazará por una masa de aire seco, entonces la evapotranspiración se verá altamente influenciada por el viento (Allen et al., 1998).

Para el cálculo de la evapotranspiración se requiere que la velocidad del viento sea medida a 2 metros de altura sobre la superficie. En el caso que el dato registrado haya sido medido a una altura diferente se utiliza la ecuación (23) para convertir el registro medido a la altura estándar de 2 m (Allen et al., 1998):

$$u_2 = u_z \frac{4{,}87}{\ln(67{,}8\, z - 5{,}42)} \tag{23}$$

donde:

u_2 : Velocidad del viento a 2 m sobre la superficie, en $[m/s]$.

u_z : Velocidad del viento medido a altura z sobre la superficie, en $[m/s]$.

z : Altura a la cual se realizó la medición, en $[m]$.

Se recomienda que la velocidad del viento a $2\ m$ de altura, debe estar limitada por valores mayores que $0{,}5\ [m/s]$ para el cálculo de la evapotranspiración a través del método de Penman Monteith. Este límite se aplica para explicar los efectos de inestabilidad y flotabilidad del aire al promover el intercambio de vapor en la superficie cuando el aire está en calma. Este efecto ocurre cuando la velocidad del viento es baja y la flotabilidad del aire caliente es la que induce el intercambio de aire en la superficie. Limitar el viento $u_2 \geq 0{,}5\ [m/s]$ en la ecuación de ET_o mejora las estimaciones en condiciones de velocidad de viento muy bajas (Allen et al., 1998).

3.2. Método de Blaney y Criddle

Este método es simple, ya que solo utiliza mediciones de temperatura para entregar un resultado, originalmente fue desarrollado para calcular la evapotranspiración en $[mm/día]$ como media para un periodo mensual (Allen y Pruitt, 1986). Sin embargo, este método puede ser modificado para estimar valores diarios de ET con datos de temperatura media diaria (ASCE, 1990). Cabe destacar que no es muy preciso, y sus resultados deben ser tomados como referencia en orden de magnitud, esto es apreciable en zonas de condiciones climáticas extremas, ya que la evapotranspiración es subestimada en zonas áridas, soleadas y ventosas, mientras que se sobrestima en zonas húmedas, nubosas y con baja velocidad de viento (Brouwer y Heibloem, 1986). La ecuación que describe este método es:

$$ET_o = p\ (0{,}46\ T_{media} + 8) \tag{24}$$

donde:

ET_o : Evapotranspiración de referencia, en $[mm/día]$.

T_{media} : Temperatura media diaria, en $[°C]$.

p : Porcentaje de horas de luz en el día en relación con el total anual.

El término (p) proviene de la relación que existe entre las horas de luz solar que hay durante un día del año y la suma total de horas de luz en un año, es decir, p depende principalmente del día del año en que sea medido (J) y la latitud de la zona (φ). Para obtener el valor de p en un día específico se aplican las ecuaciones (13) y (14), que describen las variables

declinación solar (δ) y ángulo de radiación a la puesta del sol (ω_s), respectivamente. Se presentan las ecuaciones necesarias para calcular p en un día y latitud determinados.

$$h(J,\varphi) = \omega_s(J,\varphi) \cdot \frac{24}{\pi} \tag{25}$$

$$h_{año}(\varphi) = \sum_{J=1}^{365} h(J,\varphi) \tag{26}$$

$$p(J,\varphi) = \frac{h(J,\varphi)}{h_{año}(\varphi)} \tag{27}$$

donde $h(J,\varphi)$ es la cantidad de horas de sol del día J en la latitud φ, es decir, las horas que hay desde la salida hasta la puesta del sol. El valor $h_{año}(\varphi)$ corresponde a la sumatoria de las horas de sol diaria en un año, obteniendo con estos el valor de p, específico para cada día y latitud.

3.3. Método de Hargreaves

Este método nace de muchos intentos de estimar la evapotranspiración basándose en la medición de la evapotranspiración de bandeja. Hargreaves (1975), luego de años de recopilación de datos evapotranspiración medida, publicó su fórmula de estimación que se puede observar en la ecuación (28). Fue desarrollado para ser evaluado en los ámbitos de la agricultura y ser utilizado principalmente con información climática mensual. Sin embargo, ha sido ampliamente estudiado y comparado con otras metodologías teniendo buenos resultados de correlación en rangos menores de tiempo, como una media móvil diaria para 5 días (Hargreaves y Allen, 2003).

$$ET_o = 0{,}0135\ R_s\ (T + 17{,}8) \tag{28}$$

donde:

ET_o : Evapotranspiración de referencia, en $[mm/día]$.

R_s : Radiación solar global en la superficie, en $[mm/día]$.

T : Temperatura media diaria, en $°C$.

Debido a lo complejo que resulta adquirir información para calcular la R_s, o por la falta de esta información es que se le realizó una simplificación al método original (Hargreaves et al., 1985). Donde la radiación solar global es proporcional a la Radiación extraterrestre (R_a) y la amplitud térmica (TR), de la forma:

$$R_s = 0{,}16\, R_a\, TR^{0{,}5} \tag{29}$$

donde TR corresponde a la diferencia entre la temperatura máxima y la temperatura mínima del día, en $°C$, y R_a deberá estar en las mismas unidades que R_s , es decir $[mm/día]$. Luego la fórmula de Hargreaves en su versión simplificada quedará:

$$ET_o = 0{,}0022\, R_a\, (T + 17{,}8)\, TR^{0{,}5} \tag{30}$$

Sin embargo, Hargreaves y Samani (1985) recomiendan que el coeficiente sea aumentado a 0,0023, quedando de la forma:

$$ET_o = 0{,}0023\, R_a\, (T + 17{,}8)\, TR^{0{,}5} \tag{31}$$

Se puede observar que la ecuación se invalida cuando se tienen temperaturas medias bajo $-17{,}8\,°C$, por lo que se limita el rango de temperaturas a ese valor (Weiß y Menzel, 2008). En esta oportunidad resulta importante destacar que la unidad estándar para expresar la energía recibida por unidad de superficie en el tiempo es megaJoule por metro cuadrado por día ($MJ/m^2/día$). Y en este caso el método de Hargreaves solicita que la radiación sea entregada en las mismas unidades que la evapotranspiración ($mm/día$). De esta forma para convertir las unidades se utiliza como factor de conversión el inverso del calor latente de vaporización $1/\lambda = 0{,}408$

$$Evaporación\ equivalente\ \left[\frac{mm}{día}\right] = 0{,}408 * Radiación\ \left[\frac{MJ}{m^2 día}\right] \tag{32}$$

3.4. Método de Turc

Este método fue originalmente desarrollado para la zona sur de Francia y el norte de África por Turc en el año 1961. Esta ecuación relaciona variables climáticas de relativamente fácil acceso, como la radiación global, temperatura y humedad y fáciles de aplicar en su metodología. La ecuación de Turc, tomado de Comisión Nacional de Riego (1997), para estimar evapotranspiración diaria se observa a continuación:

$$ET_o = 0{,}013 * \frac{T}{T + 15} * (R_s + 50) * \left(1 + \frac{65 - HR}{120}\right) \tag{33}$$

donde:

T : Temperatura media del aire, en $[°C]$.

R_s : Radiación solar, en $[cal/cm^2/día]$.

HR : Humedad relativa media porcentual [%].

El último término de la ecuación (33) toma valor 1 para $HR > 65\%$. Además, es importante destacar que este método tiene limitaciones respecto a la temperatura media, esta no debe ser menor que 0 $°C$ (Djaman et al, 2015). La radiación solar definida en la ecuación (33) corresponde a descrita en la ecuación (15), por lo que para hacer el cambio de unidades de $[MJ/m^2/día]$ a $[cal/cm^2/día]$ se debe aplicar el factor 4,1868 10^{-2}, es decir:

$$R_s\left[\frac{cal}{cm^2\ día}\right] = \frac{1}{4{,}1868 * 10^{-2}} * R_s\left[\frac{MJ}{m^2\ día}\right] \quad (34)$$

3.5. Estimadores de Desempeño

Con el objetivo de evaluar los resultados obtenidos se utilizan tres estimadores de desempeño, error porcentual (PE), coeficiente de determinación (R^2), error cuadrático medio normalizado (NRMSE), los que dependiendo de su naturaleza indican un mejor o peor ajuste entre los datos comparados. En la Tabla 3.1 se resume brevemente los estimadores de error utilizados en el presente documento.

Tabla 3.1. Resumen de estimadores de error.

Estimador	**Ecuación**	**Calificación de desempeño ***
Error porcentual (PE)	$PE = \frac{\sum(Y_{Estimado} - Y_{Observado})}{\sum Y_{Observado}} * 100\ [\%]$ (35)	Buen desempeño: $0 \leq \lvert PE \rvert \leq 20$ $PE < 0$ subestimación $PE > 0$ sobrestimación
Coeficiente de determinación (R^2)	$R^2 = \frac{\sigma_{XY}^2}{\sigma_X^2 * \sigma_Y^2}$ (36) σ_{XY}^2 es la covarianza de (X,Y) σ_{XY}^2 es la varianza de la variable X σ_{XY}^2 es la varianza de la variable Y.	Buen desempeño: $0{,}8 \leq R^2 \leq 1$
Error cuadrático medio normalizado (NRMSE)	$NRMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Y_{Estimado} - Y_{Observado})^2}}{n * \overline{Y_{Observado}}}$ (37)	Buen desempeño: $0 \leq NRMSE \leq 0{,}2$

*Calificación del desempeño de acuerdo con Lang et al. (2017).

4. LUGAR DE ESTUDIO

Chile se encuentra ubicado en el hemisferio sur del planeta, aproximadamente entre las latitudes 17°30’ en su límite norte y 56°30’ en su extremo sur en el continente americano, cuenta con una longitud de norte de a sur de 4.300 km aproximadamente, una extensión transversal media de 180 km y un área aproximada de 756.626 km^2 (Dirección General de Aguas DGA, 1986), por el oeste limita con el Océano Pacífico y por el este con la Cordillera de Los Andes, de esta forma tiene altitudes que varían desde 0 msnm hasta los 6.893 msnm en el volcán Nevado Ojos del Salado. En este contexto existe una amplia diversidad climática en el país, que se ve acentuada por factores como la influencia oceánica, la corriente de Humboldt y el Anticiclón del Pacífico. Además, Chile posee otros elementos morfológicos como la Cordillera de la Costa y la Depresión Intermedia, que entregan gran variedad de vegetación natural, orografía, suelos y recursos hídricos (DGA, 2016).

4.1. Zonas Naturales

Dadas las diferencias mencionadas anteriormente, se ha considerado la subdivisión del país en cinco macrozonas, esta clasificación se basa en la similitud climática y sus características orográficas. Estas 5 macrozonas de denominan: Zona Norte, Zona Norte Chico, Zona Centro, Zona Sur y Zona Austral, las cuales se encuentran representadas geográficamente en la Figura 4.1, y la descripción de cada una de estas macrozonas se explica a continuación.

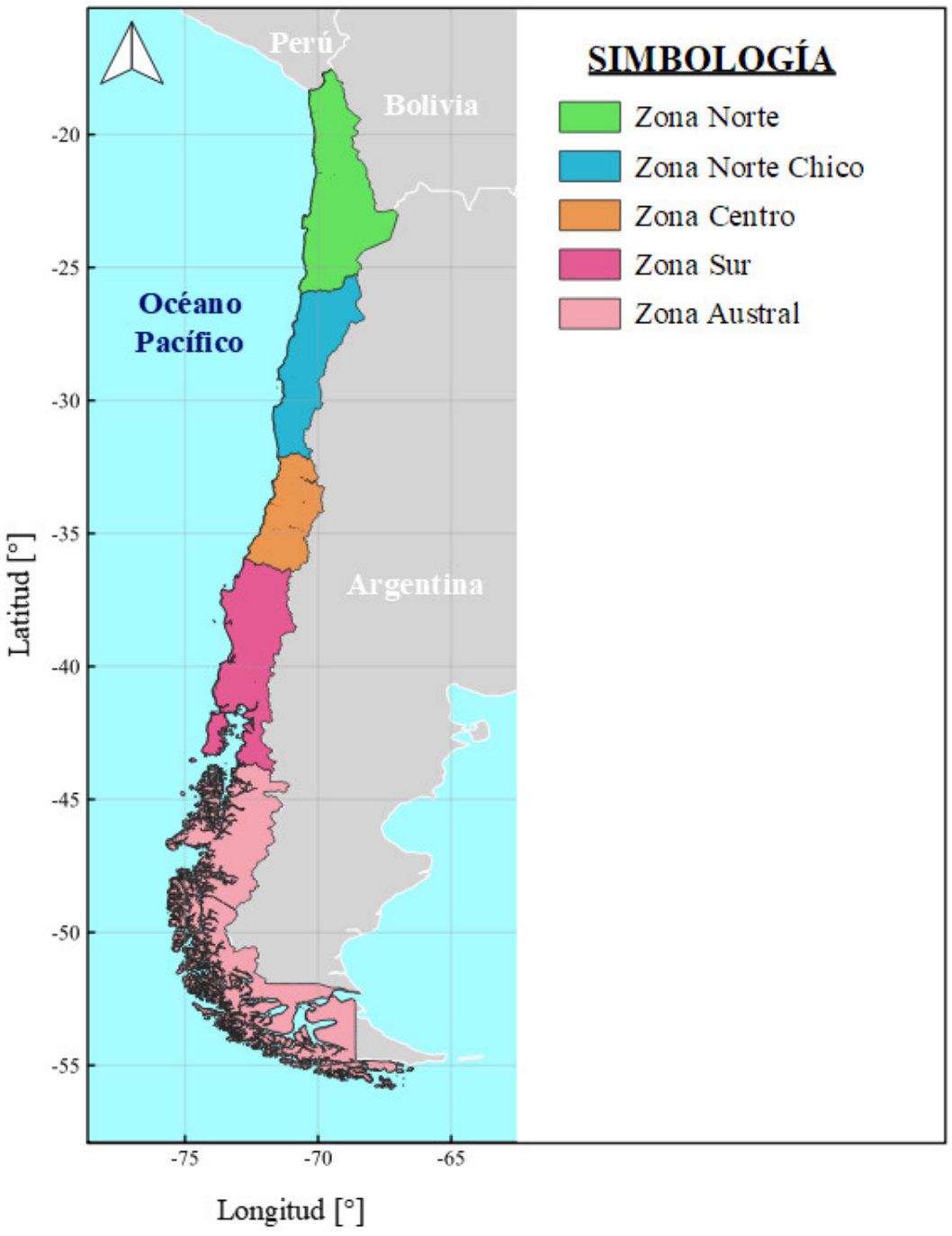


Figura 4.1: Macrozonas de Chile.

4.1.1. Zona Norte (ZN)

Está conformada por las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá y Antofagasta. Los relieves predominantes que, a su vez, dan forma a esta zona son las cordilleras de la Costa y de los Andes, ocurriendo entre ambos cordones montañosos la denominada Depresión Intermedia y el altiplano. La Cordillera de la Costa nace unos 20 km al sur del puerto de Arica, donde el cerro Camaraca es un primer testimonio de ella, e irrumpe abruptamente con el océano Pacífico en casi toda su extensión, presentándose en ciertas latitudes la planicie litoral, lugar que ha permitido el asentamiento humano. Y se encuentra comprendida entre las latitudes sur 17°30’ y 25°40’ aproximadamente.

La zona norte corresponde al área geográfica más seca de Chile, donde predominan los climas áridos y semiáridos, se encuentra bajo la influencia permanente del Anticiclón del

Pacífico, y se caracteriza por la ausencia casi total de precipitaciones en el sector costero e interior (DGA, 1986). Sin embargo, presenta una abundante nubosidad en su franja costera, denominada camanchaca, que a pesar de la ausencia de lluvia permite el desarrollo de una débil vegetación desértica del tipo hierba y subarbusto, que se ubica en las laderas de las quebradas, vegetación que se encuentra adaptada a esta condición de ambiente seco. La depresión intermedia presenta un clima desértico severo y escasa nubosidad, precipitación anual menor a 10 mm. Pese a esto, presenta vegetación en de tipo freatófita en cauces y quebradas, tamarugos que se alimentan de aguas subterráneas y vegetación cactácea en zonas preandinas. En las zonas altiplánicas y cordilleranas se tiene clima de estepa donde predominan las temperaturas extremas en día y noche, una alta amplitud térmica, con lluvias en temporada estival. En este ambiente se observa el crecimiento de vegetación altiplánica tales como gramíneas silvestres y hierbas perennes adaptadas a la escasez hídrica, (DGA, 1986).

4.1.2. Zona Norte Chico (Znc)

Esta zona se conforma por la Región de Atacama, Coquimbo y una parte del norte de la Región de Valparaíso. El Río Copiapó divide la macrozona norte en “norte grande” y “norte chico” hacia el sur. En relación a las características climáticas se puede decir que tiene condiciones similares a la anterior expuesta, sin embargo, el clima desértico presente en esta zona muestra un aumento paulatino de pluviosidad invernal hacia el sur dando paso a clima estepario seco, las precipitaciones anuales en la zona cordillerana son del orden de 170 mm, concentrándose en el periodo estival (BCN, s.f.). Y se encuentra comprendida entre las latitudes sur 25°40’ y 32°10’ aproximadamente.

El relieve, compuesto por los tres elementos morfológicos presente en el sector anterior, se ve modificado a partir de Chañaral al norte de la Región de Copiapó, ya que surge un paisaje confuso en el cual no es posible distinguir de forma separada la Cordillera de la Costa y la depresión intermedia, ya que la erosión de los ríos es la que ha determinado la orientación del relieve (CORFO, 2013) Es por esto que esta zona también es denominada sector de los valles transversales, cuyos cauces se presentan de forma permanente gracias a las lluvias cordilleranas, que permiten la existencia de vegetación de tipo freatófita. La vegetación presente en esta zona tiene características de estepa de espino y arbustos, y cactáceas en el sector costero debido a la humedad ambiental (DGA, 1986).

4.1.3. Zona Centro (ZC)

Se encuentra conformada por las regiones de Valparaíso, Metropolitana de Santiago, Libertador General Bernardo O'Higgins, del Maule, Ñuble y del Bío Bío. Esta parte del país se conforma por cuatro entidades morfológicas Codillera de los Andes, Depresión Intermedia o valle longitudinal, Cordillera de la Costa y la planicie litoral. Estos cuatro elementos se desarrollan ampliamente a lo largo de toda la zona centro, la cordillera de los Andes presenta en su corazón relieves volcánicos que sobreponen sus estructuras en las cumbres de la montaña, la cordillera de la Costa de igual forma presenta modificaciones a medida que avanza hacia mayores latitudes, presentando grandes elevaciones en el extremo norte y más al sur se deprime transformándose en un cordón de cumbres y grandes planicies exteriores descendiendo en su altura (CORFO, 2013). Y se encuentra comprendida entre las latitudes sur 32°10' y 36°15' aproximadamente.

Esta zona presenta variedad de climas templados cálidos, con influencias anticiclonales y ciclonales alternadas, presenta clima tipo mediterráneo con una prolongada estación seca, mostrando precipitaciones medias anuales del orden de 943 mm/año (DGA, 2016). La cordillera andina presenta un clima de hielo por efecto de la altura, desarrollándose en ella vegetación tipo de estepa arbustiva. La Cordillera de Los Andes, muy alta en este sector, tiene gran importancia como acumulador de nieves, por lo que la alimentación de los ríos se debe primordialmente al derretimiento de primavera-verano (DGA, 1986). Al tener una mayor precipitación y escorrentía producto de los deshielos, la zona presenta los suelos más fértiles del país, permitiendo gran producción de verduras, frutas y hortalizas. La vegetación predominante en el sector costero se caracteriza por matorrales que hacia el sur toman características arbóreas.

4.1.4. Zona Sur (ZS)

La zona sur comprende las regiones La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos. El cordón montañoso de la Cordillera de Los Andes a partir de la latitud sur 37° se deprime hacia el sur, no sobrepasando, salvo excepciones, los 2.000 msnm al sur, otro elemento morfológico predominante corresponde a la Depresión Intermedia, que constituye el área principal de acumulación de sedimentos cuaternarios, representados por depósitos fluviales, fluvioglaciales y glaciales, su altura media varía de 300 a 500 m.s.n.m., y hacia el sur se observa fuertemente ondulada e incluso desarticulada, debido al depósito de materiales de acarreo y afloramientos de

rocas fundamentales (DGA, 1986). La Cordillera de la Costa se deprime bruscamente a menos de 1.000 m, se desarticula e incluso desaparece totalmente en algunos sectores. Hacia el océano Pacífico se desarrolla en varios niveles de terrazas, presentando espesores variables de rellenos de tipo sedimentario marino, (DGA, 1986). Se encuentra comprendida entre las latitudes sur 36°15' y 44° aproximadamente.

Se caracteriza por un clima templado lluvioso a marítimo lluvioso con abundantes precipitaciones que aumentan hacia el sur, con una estación lluviosa cada vez más prolongada siendo el promedio de lluvia caída de 2.420 mm/año. La abundante precipitación favorece la presencia de bosques nativos y plantaciones forestales proporcionando materia prima para la industria maderera (DGA, 2016). La vegetación va transformando su carácter arbóreo hasta terminar en selva valdiviana hidromórfica, la estepa de espino se intensifica, dando paso a una vegetación de tipo parque a los 39° LS finalmente transformándose a un bosque mixto (DGA, 1986).

4.1.5. Zona Austral (ZA)

La zona austral abarca las regiones de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo y Magallanes. Esta zona se desarrolla a partir del paralelo 44° Sur, y continúa con de la misma forma que la macrozona anterior, es decir, en dos fajas longitudinales y una de ellas parcialmente sumergida. La cordillera de la Costa se presenta en forma de archipiélago e islas y la Depresión Intermedia completamente sumergida bajo el mar, la cordillera de Los Andes comienza con alturas no superiores a los 2.000 m.s.n.m. A partir de los 47°LS. solo es posible apreciar la cordillera de Los Andes que de forma local se eleva por sobre los 3.000 m.s.n.m., este aumento en la altitud permite la existencia de la más grande superficie de hielo de Sudamérica con un total de 16.361 glaciares cuyo volumen de glaciar alcanza los 3.463 km^3 (DGA, 2016). Luego de los 52° LS, Chile abarca territorio hacia el oriente de la Cordillera de Los Andes, extendiéndose a través de las pampas magallánicas. En cuanto a su precipitación, es posible decir que es régimen pluviométrico oceánico y su promedio alcanza los 2.963 mm/año. Se encuentra comprendida aproximadamente entre las latitudes sur 44° y 56°.

Respecto al clima y vegetación de esta macrozona, se observan los climas de influencia ciclonal. Al norte predomina el clima marítimo templado-frío lluvioso de costa occidental, caracterizado por elevadas precipitaciones, y sus temperaturas medias anuales de 9 a 10°C, baja

amplitud térmicas e intenso viento de oeste durante los meses estivales, el clima al oriente y en el sector transandino se hace menos lluvioso y más continental, con características de clima estepario frío. Al poniente su vegetación predominante es la selva hidromórfica, muy tupida y rica en especies, hacia el oriente toma características de bosque trasandino y vegetación xeromórfica en la estepa. Más hacia el sur (47° a 52°) se presenta un clima templado frío lluvioso, con temperaturas medias de 9°C y fuertes vientos del oeste, que impiden el desarrollo extenso de vegetación arbórea, en zonas más protegidas de este, prolifera ampliamente bosque magallánico siempre verde. En los sectores andinos se desarrollan grandes extensiones de glaciares (clima de hielo). Luego el sector isleño (52° a 56°) desarrolla clima de tundra, temperaturas medias muy reducidas (6°C) y las elevadas precipitaciones, promueven la vegetación característica de musgos y líquenes. Hacia el oeste, en la pampa magallánica existe un clima de estepa fría, por acción de la Cordillera de Los Andes y su función divisoria este clima es cada vez más seco tomando características áridas, existiendo una disminución en la precipitación a menos de 400 mm/año; la vegetación natural consiste en matorrales y praderas permanentes (DGA, 1986).

5. BASE DE DATOS

La información empleada en este estudio proviene de cuatro fuentes, y se pueden separar en dos tipos de datos espaciales: puntuales y distribuidos. El primer tipo de dato corresponde a los obtenidos a través de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) y mediante el Explorador solar, los datos con información espacialmente distribuida se obtienen desde productos grillados pertenecientes al Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia $(CR)^2$ y productos satelitales MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer).

5.1. Explorador Solar

El Ministerio de Energía, hace unos años implementó la plataforma en línea denominada Explorador Solar, https://solar.minenergia.cl/exploracion. Esta herramienta ha sido diseñada para facilitar la exploración del recurso solar en Chile, en ella se pueden encontrar variables de relevancia para este estudio como lo es la nubosidad y el viento. Es posible descargar esta información seleccionando un punto, indicando su latitud y longitud, las variables meteorológicas se presentan en una resolución espacial de 1 km y de forma horaria desde el 1 de enero de 2004 hasta 26 de diciembre 2016, indicando para el caso de nubosidad 1 si hay presencia de nubes y 0 si no hay presencia de nubes (Molina et al.,2017), en el caso del viento se indica su velocidad en unidades m/s a 2 metros sobre la superficie (Ministerio de Energía de Chile, 2016). Se establece que el periodo de tiempo en el que se manejan las variables de este estudio corresponde al disponible según esta base de datos, es decir, del año 2004 hasta el año 2016.

5.2. Estaciones Meteorológicas

Se cuenta a lo largo y ancho de país, con una red de estaciones meteorológicas que miden diferentes variables climatológicas, que se encuentran a libre disposición para su uso en la plataforma en línea https://climatologia.meteochile.gob.cl/, perteneciente a la Dirección Meteorológica de Chile. Las variables de interés de este estudio corresponden a Temperatura del aire, Punto de Rocío, Humedad del aire y Viento, además la Evaporación total diaria.

5.2.1. Temperatura del aire, Punto de Rocío, Humedad del aire y Viento

Las variables climatológicas de Temperatura del aire, Punto de Rocío, Humedad del aire y Viento se presentan en archivos formato tipo “.xls” y los datos son entregados de forma horaria, por lo que deben ser tratados para su uso y manejo en la estimación de la evapotranspiración,

según corresponda. Se ha realizado un catastro dentro de las 941 estaciones con datos disponibles en formato digital, y se han seleccionado las que cuentan con un registro de datos suficiente, es decir, que abarque un periodo de tiempo igual o superior al rango temporal disponible de las otras fuentes de información, en este caso se ha acotado la búsqueda al espacio de tiempo de los datos del explorador solar, según se indica en el acápite 5.1, es decir, desde el año 2004 al año 2016 inclusive. En la Tabla 5.1 se presentan las estaciones meteorológicas ordenadas por latitud de forma decreciente, indicando el código de estación, institución propietaria de la estación, su ubicación geográfica en coordenadas y altura en metros, y la región a la que pertenecen las estaciones meteorológicas seleccionadas.

Tabla 5.1. Estaciones Meteorológicas disponibles.

Código Nacional	**Propietario de la Estación**	**Latitud [°]**	**Longitud [°]**	**Elevación [m.s.n.m.]**	**Región**
200006	Dirección Meteorológica de Chile	-20,549	-70,181	48	Región de Tarapacá
220002	Dirección Meteorológica de Chile	-22,498	-68,893	2.321	Región de Antofagasta
230001	Dirección Meteorológica de Chile	-23,454	-70,445	112	Región de Antofagasta
290004	Dirección Meteorológica de Chile	-29,914	-71,207	137	Región de Coquimbo
320041	Dirección Meteorológica de Chile	-32,949	-71,476	141	Región de Valparaíso
320051	Dirección Meteorológica de Chile	-32,846	-70,119	2.955	Región de Valparaíso
330007	Dirección Meteorológica de Chile	-33,065	-71,556	330	Región de Valparaíso
330019	Dirección Meteorológica de Chile	-33,455	-70,549	650	Metropolitana de Santiago
330020	Dirección Meteorológica de Chile	-33,445	-70,683	520	Metropolitana de Santiago
330021	Dirección Meteorológica de Chile	-33,378	-70,788	482	Metropolitana de Santiago
330030	Dirección Meteorológica de Chile	-33,656	-71,613	77	Región de Valparaíso
330077	Dirección Meteorológica de Chile	-33,350	-70,294	2.750	Metropolitana de Santiago
330111	Dirección Meteorológica de Chile	-33,458	-70,949	1.068	Metropolitana de Santiago

Código Nacional	Propietario de la Estación	Latitud [°]	Longitud [°]	Elevación [m.s.n.m.]	Región
330112	Dirección Meteorológica de Chile	-33,615	-70,351	928	Metropolitana de Santiago
330113	Dirección Meteorológica de Chile	-33,706	-71,008	275	Metropolitana de Santiago
340031	Dirección Meteorológica de Chile	-34,969	-71,217	229	Región del Maule
360011	Dirección Meteorológica de Chile	-36,586	-72,037	155	Región de Ñuble
360019	Dirección Meteorológica de Chile	-36,781	-73,066	13	Región del Biobío
360042	Dirección Meteorológica de Chile	-36,904	-71,410	1.708	Región de Ñuble
370033	Dirección Meteorológica de Chile	-37,397	-72,424	118	Región del Biobío
380013	Dirección Meteorológica de Chile	-38,768	-72,632	86	Región de la Araucanía
380029	Dirección Meteorológica de Chile	-38,934	-72,653	96	Región de la Araucanía
390006	Dirección Meteorológica de Chile	-39,657	-73,087	18	Región de Los Ríos
400009	Dirección Meteorológica de Chile	-40,614	-73,058	61	Región de Los Lagos
410005	Dirección Meteorológica de Chile	-41,448	-73,096	87	Región de Los Lagos
420004	Dirección Meteorológica de Chile	-42,930	-72,701	10	Región de Los Lagos
420014	Dirección Meteorológica de Chile	-42,347	-73,715	174	Región de Los Lagos
430002	Dirección Meteorológica de Chile	-43,189	-71,852	347	Región de Los Lagos

5.2.2. Evaporación total diaria

La Dirección Meteorológica de Chile cuenta con un total de 27 estaciones meteorológicas que presentan estadística de Evaporación o Pérdida de Agua desde un Tanque PAM, este elemento mide la cantidad de evaporación de agua a partir del uso de un tanque Weather Bureau Clase A tipo PAM. Y se han seleccionado 5 estaciones que poseen datos medidos en el periodo de tiempo estudiado según capítulo 5.1, información que se puede observar en la Tabla 5.2. Esta variable se encuentra disponible dentro del catálogo de elementos en la plataforma en línea de la

D.M.C. presentándose en escala diaria, y se ha recopilado y almacenado la estadística para su manejo. La Figura 5.1 muestra un mapa ilustrativo de la ubicación geográfica de las estaciones presentadas anteriormente, asociadas a la macrozona correspondiente.

Tabla 5.2. Estaciones con medición de Evaporación de Tanque PAM.

Código Nacional	**Años de registro**	**Región**	**Macrozona**
230001	2004-2010	Región de Antofagasta	Zona Norte
	2012-2016		
290004	2004-2016	Región de Coquimbo	Zona Norte Chico
330020	2004-2016	Metropolitana de Santiago	Zona Centro
360019	2004-2016	Región del Biobío	Zona Sur
410005	2004-2016	Región de Los Lagos	Zona Sur

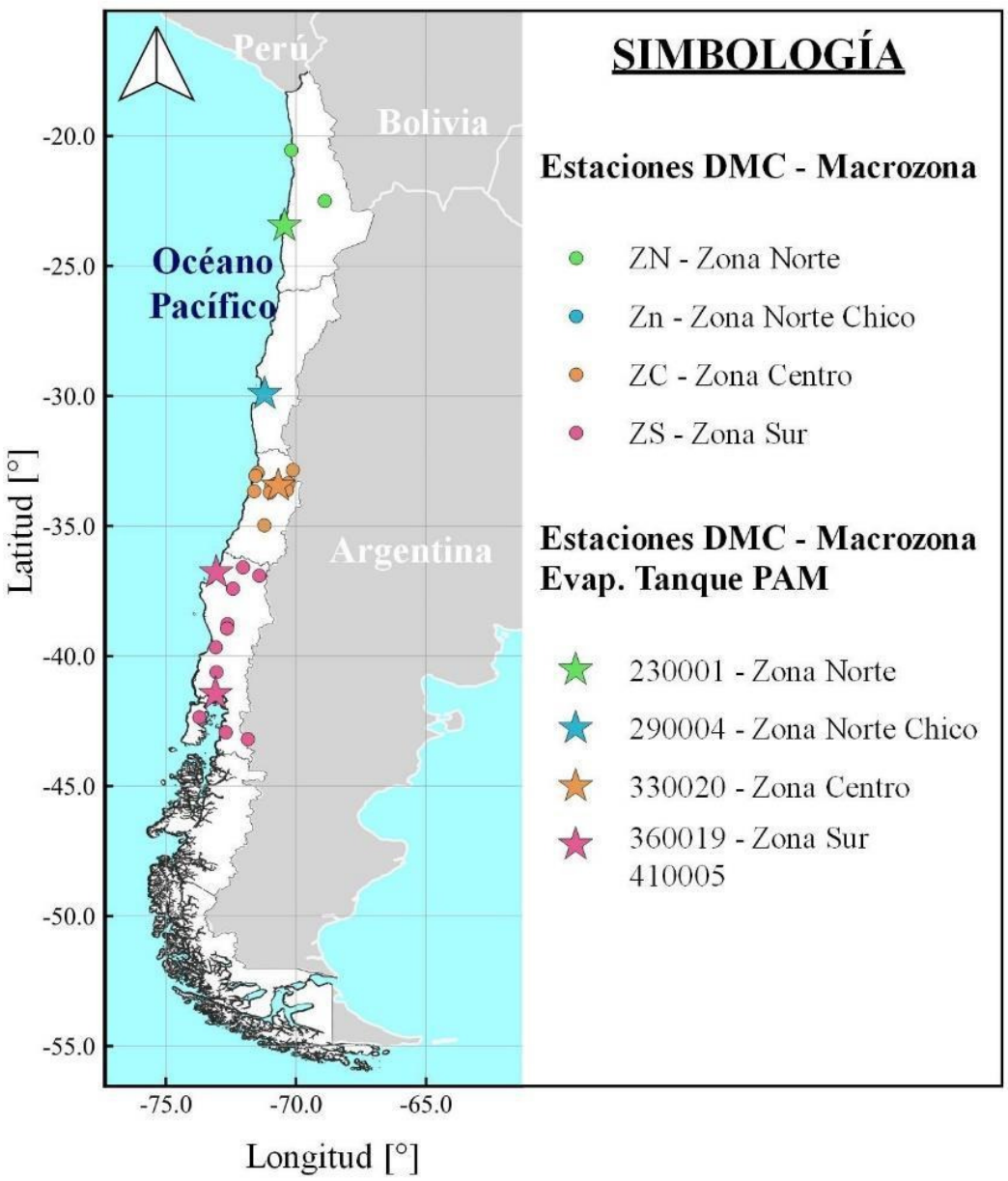


Figura 5.1: Ubicación geográfica de estaciones meteorológicas de con estadística de temperatura del aire, punto de rocío, humedad del aire, viento y evaporación medidas, discretizadas por Macrozonas.

5.3. Productos Grillados CR2MET

El Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)^2, ha elaborado el conjunto de datos CR2MET, que agrupa información meteorológica de precipitación y temperaturas en una grilla rectangular de 0,05° latitud-longitud para todo el territorio continental chileno, generando matrices de dimensiones 800 filas y 220 columnas, estadística diaria extensa que cubre los años desde 1979 hasta 2016. La metodología que ha sido utilizada para la elaboración de estos productos de temperaturas extremas (máximas y mínimas) involucra información local, es decir, topografía y datos observados de temperatura, variables a gran escala de ERA-Interim, además se utilizaron datos de temperatura superficial a través de productos satelitales MODIS (Álvarez-Garretón et al, 2018). En particular para este estudio se utilizará información relativa a las temperaturas extremas diarias (máxima y mínima) que se encuentra disponible para su descarga en la plataforma en línea https://www.cr2.cl/datos-productos-grillados/. Además, se destaca que dadas las restricciones temporales presentadas por las variables del acápite 5.1, se ha decidido utilizar solamente información comprendida entre los años 2004 a 2016.

5.4. Productos Satelitales MODIS

A bordo de los satélites TERRA y AQUA, pertenecientes a la agencia del gobierno estadounidense NASA, se encuentra el instrumento MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), estos orbitan alrededor de la Tierra de forma que TerraMODIS y AquaMODIS visualizan el planeta completo en periodo de 1 a 2 días, adquiriendo información de 36 bandas espectrales, esta información es trabajada posteriormente y se genera lo que se conoce como Productos MODIS. En este estudio serán utilizados los productos relativos al albedo y la evapotranspiración.

5.4.1. Albedo (MODIS MCD43C3)

El producto MCD43C3 MODIS/Terra+Aqua BRDF/Albedo Daily L3, provee información de black-sky albedo reflectancia hemisférica directa (BSA) y white-sky albedo reflectancia bihemisférica (BSA) tomadas al medio día en horario local, por lo que es posible encontrar información a escala global en una resolución espacial con celdas de 0,05° (5.600 m en el ecuador). Estos se encuentran separados de acuerdo a las bandas espectrales de MODIS de 1 a 7, espectro visible, cercano a infrarojo (NIR), entre otras que entregan información de cobertura de nieve, calidad e incerteza. Este set de datos es producido utilizando información continua de

16 días, tanto de Terra como Aqua, para lograr el producto de resolución temporal de forma diaria. De la plataforma online que dispone la USGS y NASA se ha descargado el producto MCD43C3 MODIS/Terra+Aqua BRDF/Albedo Daily L3, para el periodo comprendido entre los años 2004 y 2016, https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd43c3v006/.

5.4.2. Evapotranspiración (MOD16A3GF)

El producto MOD16A3GF MODIS/Terra Net Evapotranspiration Gap-Filled Yearly L4, contiene información anual con resolución de celdas de 500 m, el algoritmo utilizado en este producto se basa en la ecuación de Penman-Monteith incluyendo *inputs* de datos meteorológicos diarios junto a productos de sensores remotos de MODIS como vegetación, albedo y cobertura de suelo. Este producto presenta información de evapotranspiración anual (ET), flujo de calor latente medio diario (LE), evapotranspiración potencial anual (PET), flujo de calor latente potencial medio diario (PLE) y una capa de control de calidad. Se destaca que este producto se genera al final de cada año ya pasado, por lo que no es posible obtenerlo en tiempo real. En este caso se utilizará la capa llamada PET_500m, que corresponde a evapotranspiración total anual. De la plataforma online disponible (https://lpdaac.usgs.gov/products/mod16a3gfv006/), se descarga el set de datos del periodo comprendido entre los años 2004 a 2016, ambos incluidos.

Tanto para el producto de Albedo como para Evapotranspiración (PET) se cuenta con estadística desde el año 2000 en adelante, sin embargo, será utilizada la información en el rango de tiempo anteriormente determinado en el acápite 5.1.

5.5. Resumen Base de Datos

A continuación, se presenta la Tabla 5.3 que resume información relevante de las variables climatológicas recién presentadas, describiendo el formato de archivo en que se encuentran, junto con la resolución espacial y temporal de estas, además la fuente propietaria de la información y finalmente su dirección URL para la obtención de los datos.

Tabla 5.3. Resumen de variables y su fuente.

Dato	Formato	Resolución		Fuente	URL
		Espacial	Temporal		
Viento Duración real de la insolación	Archivo de valores separados por comas	1km	horaria	Explorador solar	https://solar.minenergia.cl/exploracion
Temperatura máxima, mínima y media	netCDF	0,05°	diaria	CR2MET	https://www.cr2.cl/datos-productos-grillados/
Elevación	GeoTIFF	90m	-	Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM)	https://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/
Albedo	HDF-EOS	0,05°	diaria	USGS / NASA MODIS	https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd43c3v006/
PET	HDF-EOS	500m	anual	USGS / NASA MODIS	https://lpdaac.usgs.gov/products/mod16a3gfv006/
Humedad Viento Punto de Rocío Temperatura máxima, mínima y media	Archivo de valores separados por comas	puntual	horaria	Dirección Meteorológica de Chile	https://climatologia.meteochile.gob.cl/
Evaporación total diaria	Excel	puntual	diaria	Dirección Meteorológica de Chile	https://climatologia.meteochile.gob.cl/

6. METODOLOGÍA

El procedimiento aplicado en la presente memoria está conformado por 2 actividades, tratamiento de datos y el cálculo de ET con cada método, cada una de estas engloba un grupo de subtareas de acuerdo al esquema presentado en la Figura 6.1. A continuación, se presentan los métodos utilizados para el tratamiento de los datos. Estos serán presentados según la fuente de la cual se hayan obtenido.

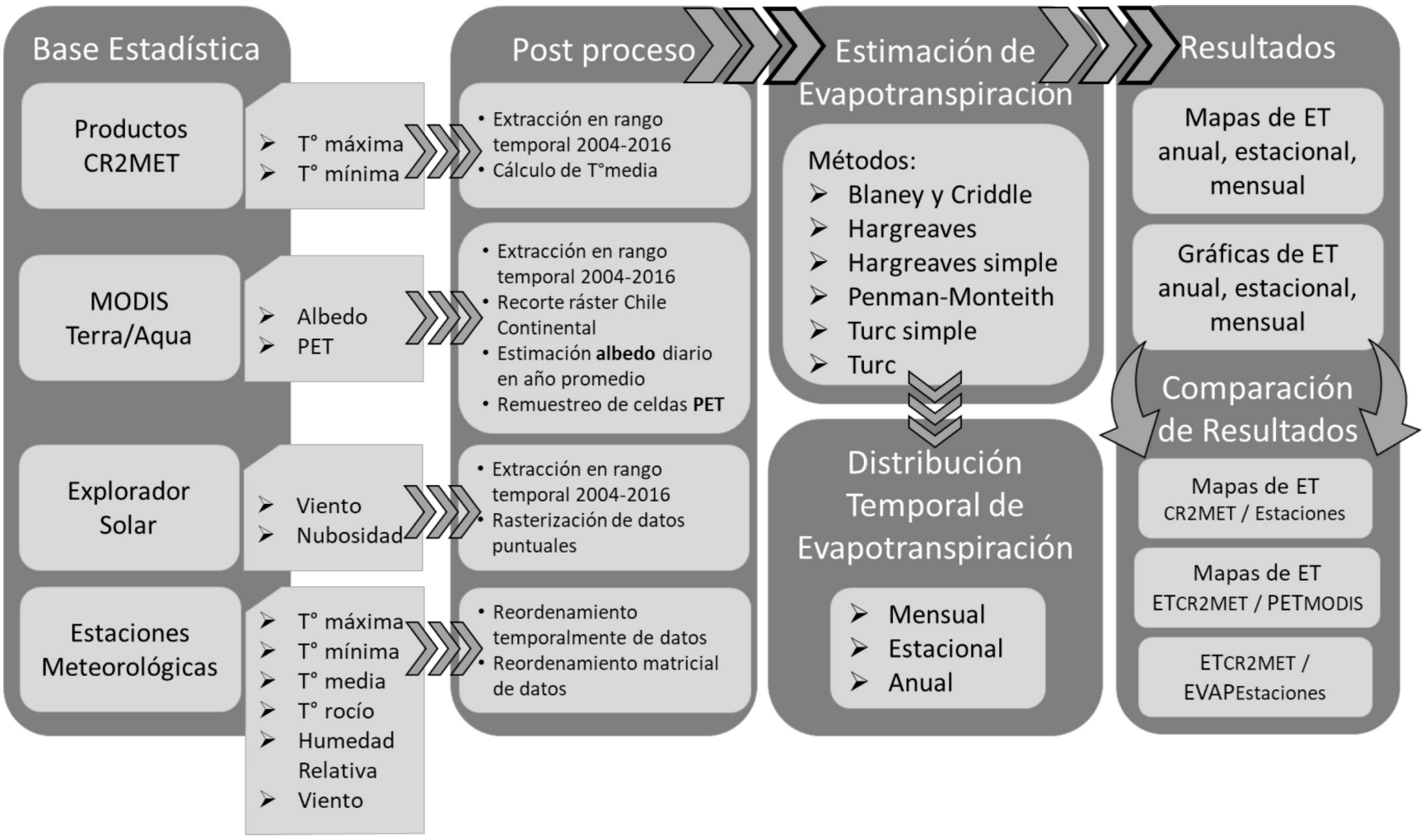


Figura 6.1: Esquema Metodológico.

6.1. Tratamiento de datos

6.1.1. Explorador Solar

Como se mencionó anteriormente, esta herramienta gratuita entrega información de velocidad de viento y nubosidad, esta última indica la presencia o ausencia de nubes y será utilizada para calcular el factor n (duración real de la insolación, en horas) relevante en el cálculo de la radiación de onda corta (R_s).

Para comenzar es pertinente aclarar que el Explorador Solar entrega información de un sitio en particular, y para efectos de esta memoria se necesita información grillada cada 0,05

grados, estadística que resulta de alto costo de tiempo descargar de forma manual. Por lo que se ha decidido elegir algunos puntos del país como representativos, para luego rellenar las celdas adyacentes con ellos. Estos puntos seleccionados corresponden a los centroides geométricos de cada subcuenca de Chile contenidas en polígonos en formato vectorial ESRI-shapefile, esta información se trabaja en el software QGIS desde el cual se extrae la coordenada geográfica de cada uno. En total se tienen 489 subcuencas, y la misma cantidad de puntos representativos (centroide). En la Figura 6.2 se esquematiza lo obtenido a partir de QGIS, para subcuencas de las regiones de Arica y Parinacota hasta la región de Atacama con sus respectivos centroides. Con esta información se procede a extraer los datos para cada variable.

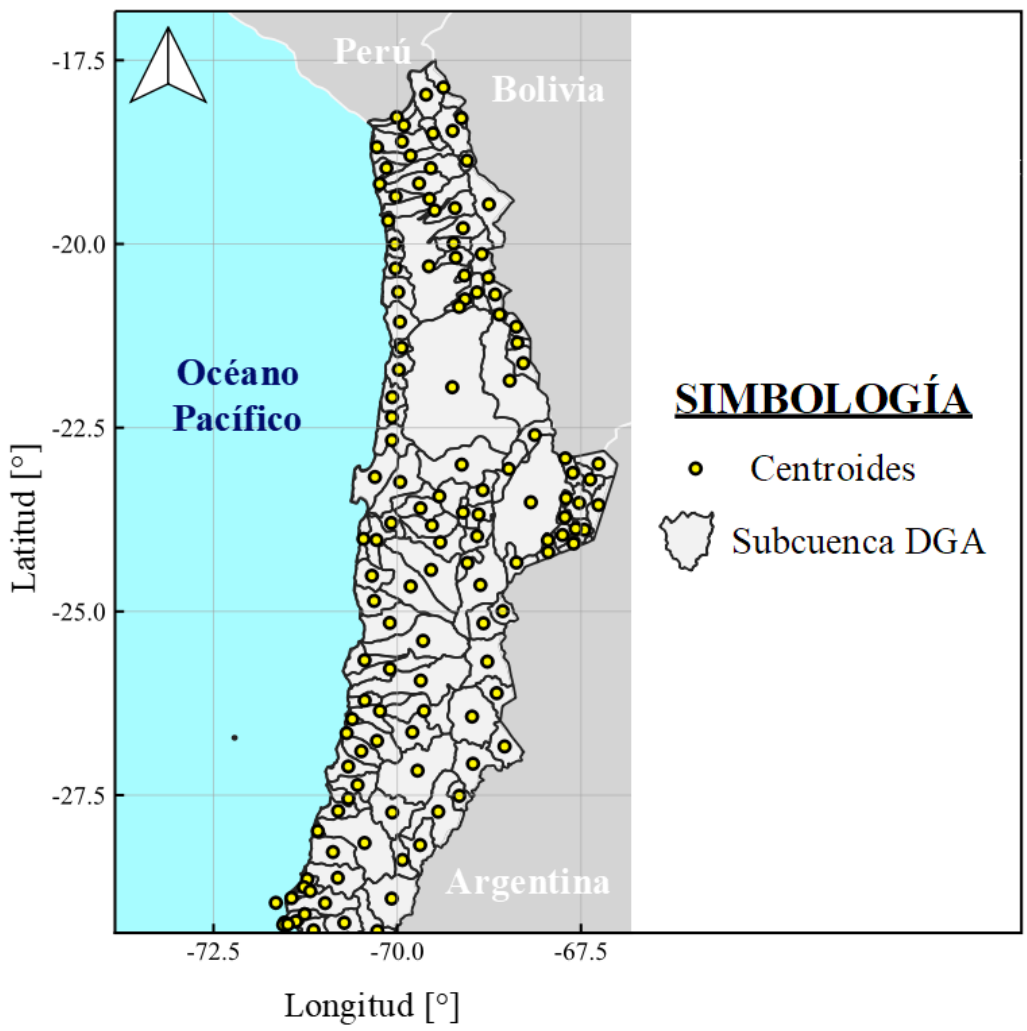


Figura 6.2: Polígonos ESRI-Shapefile de subcuencas con sus respectivos centroides geométricos, en la zona norte de Chile.

- **Velocidad del Viento**

En primer lugar, se realiza una evaluación de la estadística por cada punto, analizando si es que está completa o incompleta, de ser así se descarta y prosigue con el siguiente punto, en el caso contrario se calcula de promedio de los datos para obtener la velocidad media diaria del viento. Luego para rellenar las celdas de tamaño 0,05 grados, a cada una de ellas se le asigna el

mismo valor que el centroide más cercano, de manera que exista una influencia de la velocidad del viento del centroide en los puntos dentro de la cuenca y aledaños a esta. Se ha elaborado una subrutina en MATLAB que desarrolla todos estos pasos y puede ser vista en detalle en el ANEXO B.

- **Duración real de la insolación**

De la misma forma que para la velocidad del viento, se analiza si la estadística está completa o incompleta, descartando la estadística del punto si es que esta se encuentra incompleta. En este caso no es necesario un valor de nubosidad media, sino contabilizar las horas del día que efectivamente el cielo se encuentra despejado, información recopilada a través del Explorador Solar (ver capítulo 5.1).

Se ha elaborado una subrutina en MATLAB para asignar a las celdas la estadística horaria de cielo despejado, es decir, cada celda tendrá información de insolación o nubosidad en cada hora del periodo de tiempo de 2004 a 2016. Para llevar a cabo este relleno de información se utiliza el método Interpolación con la Distancia Inversa Ponderada (IDW), este método determina los valores de una celda a través de una combinación ponderada de un conjunto de puntos, donde la distancia de la celda a rellenar hasta los centroides de las subcuencas es el factor que pondera los valores de cada centroide, es decir, los puntos que mayor influencia tienen en la celda a rellenar son los que se hayan más cercanos y los más lejanos tienen poca o nula influencia en ella. Existen dos maneras de limitar la influencia de los datos lejanos en el espacio, acotando la búsqueda de puntos cercanos a un número determinado o asignando un radio de búsqueda, en este caso se decanta por la segunda opción. La subrutina elaborada para estos propósitos se encuentra en el ANEXO B.

Además, se requiere conocer la hora de amanecida o salida del sol (h_{AM}) y la hora del anochecer o puesta del sol (h_{AN}), estos datos son particulares para cada celda ya que dependen de ω_s en grados, que a su vez depende de la latitud (φ) de la declinación solar (δ) y del día del año (J). Las horas h_{AM} y h_{AN} teóricas se calculan de la siguiente forma:

$$h_{AM} = 12 - \frac{\omega_s}{15} \qquad [horas]$$
$$h_{AN} = 12 + \frac{\omega_s}{15} \qquad [horas] \tag{38}$$

Con la información de cielo despejado cada hora y las horas h_{AM} y h_AN de cada celda en el tiempo, se puede contabilizar la cantidad de horas reales de insolación en cada día del periodo en estudio, realizando un conteo de horas de cielo despejado en cada día tomando como rango válido desde h_{AM} hasta h_{AN}.

6.1.2. CR2MET

- **Temperatura Máxima (T_{max}) y Temperatura Mínima (T_{min})**

Los archivos de CR2MET se presentan en formato netCDF ".nc", por lo que se utilizan funciones en MATLAB que permiten abrir estos archivos y extraer desde ellos los datos que se requieren. Como se menciona en el capítulo 5.3, este archivo puede ser representado como una matriz en tres dimensiones, que registra en cada página los días y cada celda es un área de 0,05 por 0,05 grados en el mapa. En este caso para el manejo de los datos, se extrae la información de T_{max} y T_{min} del periodo requerido, además se obtiene la latitud y longitud de cada celda, asimismo este archivo le asigna un valor numérico a los datos faltantes, los que son rellenados posteriormente como "NaN" (Not a Number). El dato extraído de los archivos CR2MET se encuentra escalado y desfasado por el factor de escala a y el desfase b, sin embargo, para estos datos de temperatura el desfase es cero ($b = 0$), entonces la transformación de datos se realiza de la forma:

$$T_c = (a * T) \quad [°C] \tag{39}$$

donde T corresponde al dato de temperatura directamente extraído del archivo netCDF. En MATLAB se ha desarrollado una función que reproduce estos pasos.

- **Temperatura media**

El CR2MET cuenta con información de temperatura media, la que es tratada de igual manera que las temperaturas máximas y mínimas, sin embargo, esto se realiza solamente para los métodos de estimación de evapotranspiración que utilicen únicamente esta variable (T_{media}), ya que la extracción de datos desde el archivo CR2MET es un proceso lento. Entonces para calcular la temperatura media se realiza dentro de la misma subrutina un promedio diario entre los datos de temperatura máxima y mínima tal como lo indica la ecuación (4), para cada celda y día de registro.

6.1.3. NASA Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM)

- **Elevación**

SRTM dispone de archivos tipo GeoTIFF ".tif", en celdas de 5 x 5 grados, las que contienen información grillada de 90 metros por celda. El procedimiento se realiza con el software QGIS y consiste en agrupar estas celdas para conformar el área que engloba al país y con un polígono que delimita a Chile continental recortarlo para tener el Modelo Digital de Elevación para Chile (MDE o DEM por sus siglas en inglés). Luego los pixeles de 90 metros deben pasar a tamaño de 0,05 grados (5km aproximadamente), ya que este es el tamaño de la grilla que se utiliza y es la misma magnitud que presentan las celdas del $(CR)^2$, esto se realiza utilizando las herramientas disponibles en QGIS, remuestreo mediante interpolación bilineal. Posteriormente se extrae del ráster de elevaciones la información de altura de cada celda y desde la tabla de atributos se obtiene la elevación asociada a una latitud y longitud. Con esta información se elabora una subrutina en MATLAB que lo reordena y lo transforma en una matriz con las mismas dimensiones que las matrices del $(CR)^2$, es decir, 800x220 celdas.

6.1.4. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)

- **Albedo (MCD43C3)**

Estos archivos son formato tipo HDF-EOS, dentro de su set de datos se encuentran las capas de Black-Sky albedo (BSA) o reflectancia hemisférica directa y White-Sky albedo (WSA) que corresponde a la reflectancia bi-hemisférica (Song et al, 2019). El albedo bajo condiciones atmosféricas reales puede ser estimado realizando una interpolación entre el BSA y WSA como función de la fracción difusa (S), que resulta ser una función de la profundidad óptica τ (Schaaf, 2002). Sin embargo, estos valores deben ser calibrados con mediciones reales, las que en este caso no se encuentran disponibles. Por lo que se decide utilizar WSA que representa la radiación de onda corta en todas las direcciones. Es relevante mencionar que cada uno de estos archivos en bruto tienen un tamaño aproximado de 200 MB, y que al ser información diaria solamente un año de estadística requiere 170 GB de almacenamiento, lo que genera alta demanda de espacio en la computadora y un alto costo de tiempo para su descarga, tomando en cuenta que son necesarios 13 años de información.

Se elabora una subrutina que en primer lugar recorte solo los datos que son necesarios, ya que el archivo contiene información de albedo en todas las latitudes y longitudes del planeta,

entonces se extrae la cuadrícula que engloba las celdas correspondientes a Chile (800x220), luego se crean matrices de tres dimensiones que contiene en cada hoja información de albedo en celdas, por cada día del año. Cabe destacar que estos archivos asignan un valor numérico a los datos faltantes y aplican un fator de escala a los datos registrados, por lo que se modifican los valores faltantes por NaN y se aplica el factor de escala al resto de los datos.

El tratamiento que se hace para las matrices de cada año comienza homogeneizando el tamaño de estas, ya que la tercera dimensión de algunas es de 365 (días) y otras de 366 (días) por los años que son bisiestos, entonces se dejan todas de igual magnitud (800x220x365) eliminando la hoja que corresponda al día 29 de febrero. A continuación, se promedia cada día de todos los años, dejando fuera de este promedio los datos faltantes (NaN), así se tendrá un valor de albedo para cada día de un año promedio, evitando de esta manera periodos prolongados de tiempo donde no se tiene registro lo que imposibilitaría el cálculo de la ET_o.

- **Evapotranspiración (MOD16A3GF)**

Este producto de MODIS viene en formato tipo HDF-EOS, dentro de su data set contiene lo que se denomina PET (Potencial Evapotranspiration) en $[kg \cdot m^{-2} \cdot año^{-1}]$, que será utilizado en esta memoria. En primer lugar, MODIS presenta este producto en un sistema de coordenadas sinusoidal, y en celdas de 1200 km por lado y esta celda se encuentra dividida en una grilla de 500 metros, para ubicar a Chile en estas se deben descargar 9 losetas. Mediante las herramientas que provee QGIS se modifican las losetas transformando el Sistema Coordenado Sinusiodal a Coordenadas Geográficas, y se agregan estas losetas para conformar un solo ráster de evapotranspiración, luego se recorta con un polígono que contiene los límites de Chile continental, y se redimensiona el tamaño de la celda de 500 m a 0,05 grados, para ser trabajado en las mismas condiciones que las otras imágenes. Esto se hace para los años de estadística que son necesarios. Finalmente se tiene un set de ráster, que contiene la Evapotranspiración anual para cada año de estudio.

Es importante destacar que, el producto utilizado (MOD16A3GF) deriva del producto Terra MODIS Net Evapotranspiration Yearly L4 Global 500 m SIN Grid (MOD16A3), que al momento de realizar esta memoria se encontraba temporalmente deshabilitado debido a errores inesperados en los datos de entrada, por problemas de cobertura de nubosidad en el *input* Leaf Area Index (LAI)/Fraction of Photosynthetically Active Radiation. Lo mismo ocurre con el

satélite Aqua, que se encontraba deshabilitado. Sin embargo, se utilizarán de igual manera debido a que solo será usado como información de referencia para comparación.

6.1.5. Estaciones meteorológicas

Se realizó un catastro de todas las estaciones meteorológicas disponibles en la plataforma de la Dirección Meteorológica de Chile - Servicios Climáticos, que cuenten simultáneamente con información de humedad relativa, punto de rocío, velocidad del viento y registro de temperatura, para el periodo de tiempo de estudio determinado anteriormente.

- **Humedad, Punto de rocío y Viento**

El tratamiento de estas variables, dado el formato en que se presentan, es igual para las tres. Estos archivos vienen en formato ".csv" con fecha del registro e información horaria de este, a través de una subrutina elaborada en MATLAB se desagregan estos datos (fecha y hora) y posterior a eso se realiza un promedio diario, quedando una matriz con registros medios diarios de humedad relativa, punto de rocío y viento. Cabe destacar que esta última variable por defecto medida en $nudos$ y a una altura de 10 metros, y es necesario que se encuentre en unidades de m/s y registro a 2 metros sobre la superficie, por lo que se aplica un factor de conversión de unidades y luego lo visto en la ecuación (23). En el caso de existir periodos de tiempo sin registro estos se escriben como NaN y son excluidos del cálculo de la media

- **Temperaturas**

Es posible obtener de este registro horario los valores de temperatura máxima, mínima y media para cada día. En este caso se realiza el mismo procedimiento anterior para la temperatura media, pero al momento de extraer la estadística horaria para el día se registra el valor máximo y el mínimo, luego se promedian estos datos para obtener T_{media}, ver ecuación (4). Los periodos que no cuentan con datos no son tomados en cuenta y son anotados como NaN.

6.2. Cálculo de ET con cada método

A continuación, se presenta un desglose de los métodos utilizados para estimar la evapotranspiración de referencia y junto con ellos las variables utilizadas por cada uno de ellos para el cálculo, para revisión de las subrutinas utilizadas ver ANEXO A. Se separan las estimaciones realizadas con registros puntuales, es decir, desde estaciones meteorológicas, y las que no utilizan estos registros para el cálculo. Destacando que existen metodologías que no se

podrían llevar a cabo únicamente con datos de estación, ya que estas solamente proveen humedad relativa, temperaturas, punto de rocío y viento. Para todas las metodologías de estimación de evapotranspiración potencial es necesario ingresar a las subrutinas el espacio temporal, es decir la fecha de inicio y fecha final del periodo de cálculo requerido.

6.2.1. Metodologías de cálculo utilizando productos grillados, datos espaciales e imágenes satelitales

- **Blaney y Criddle (BC)**

  Cada método de estimación de evapotranspiración de referencia necesita para su cálculo un set de variables, siendo el de mayor simpleza en cuanto a la cantidad de variables el método de Blaney y Criddle que como se observa en la ecuación (24) solamente utiliza estadística de temperatura media, y la información geográfica (latitud). Entonces para llevar a cabo la estimación de la ET_o son sólo necesarios los datos de temperatura media de CR2MET y la latitud asociada a cada celda.

- **Hargreaves (HA)**

  El método de Hargreaves considera dos versiones, una que involucra la radiación de onda corta (R_s) y otra en la que se simplifica esta variable. En la versión no simplificada del método de Hargreaves se necesita el registro de temperatura media desde los archivos netCDF de CR2MET, para el cálculo de la R_s se requiere información de n (horas de insolación real) que se obtienen de los datos trabajados a partir del registro del Explorador Solar, N y R_a que utilizan la información de latitud de cada celda, datos almacenados junto a la T_{media} en el archivo del CR2MET.

- **Hargreaves Simplificado (HS)**

  Para la adaptación simple (ver ecuación (29)) se necesita la variable TR o rango de temperaturas, temperatura media y la radiación extraterrestre (R_a). Por lo tanto, para la estimación de la evapotranspiración son necesarios los datos de temperatura máxima y mínima desde el CR2MET a partir del cual también se puede obtener la T_{media} como se estipula en la ecuación (4), para el cálculo de la R_a solamente es necesaria la latitud de cada celda, que también se encuentra dentro de los productos CR2MET de temperatura.

- **Turc (TU)**

  La estimación de evapotranspiración de referencia a través de este método necesita información T_{max} y T_{min} para el cálculo de la humedad relativa, y para optimización del tiempo

de computación se usan las temperaturas extremas para obtener T_{media}, entonces son necesarios los datos de temperatura máxima y mínima del CR2MET. Para calcular la tercera variable de relevancia, que corresponde a RG o radiación de onda corta se requiere, al igual que el método de Hargreaves (HA), las horas de insolación real (n) obtenido de los registros tratados desde Explorador Solar, N y R_a que utilizan la latitud de cada celda, información contenida junto a las temperaturas extremas en el archivo del CR2MET.

- **Turc Simplificado (TS)**

  De la misma forma que el método de Hargreaves, se calcula una versión simplificada del método de Turc (TS), donde se utilizan las mismas variables para el cálculo de T_{media} y HR que las utilizadas en TU. Sin embargo, el cálculo se modifica para calcular la radiación de onda corta, ya que se utiliza lo expuesto en la ecuación (29), para lo cual se reutilizan las temperaturas extremas para el cálculo de TR y R_a solamente incorpora la variable latitud que proviene de los mismos datos del archivo netCDF del CR2MET.

- **Penman Monteith (PM)**

  Este método es el que mayor cantidad de variables utiliza, la subrutina que se ha elaborado para estimar la evapotranspiración de referencia, en primer lugar, extrae desde el producto del CR2MET la temperatura máxima y la mínima, que serán usadas para el cálculo interno de la temperatura media, y a través de una función elaborada dentro de la misma subrutina se calcula presión de vapor saturado y la presión real de vapor (e_s y e_a respectivamente). La fórmula que describe el método de FAO Penman Monteith (1) requiere la velocidad del viento (u_2), información trabajada a partir de los datos obtenidos del Explorador Solar, también necesita de la constante psicrométrica (γ) y la pendiente de la curva de presión de vapor (Δ), la segunda de estas variables se obtiene calculando la ecuación (2) y (3) utilizando información de elevación en cada celda, esta se extrae con la metodología indicada en la subsección 6.1.3 antes mencionada, la tercera variable se desarrolla según indica la ecuación (7) utilizando la T_{media} obtenida anteriormente dentro de la subrutina.

  Continuando con el procedimiento, es necesario el valor de la radiación neta (R_n) que según la ecuación (21) se debe calcular la radiación neta de onda corta (R_{ns}) y la radiación neta de onda larga (R_{nl}). Para poder calcular la R_{ns} se exige como *input* la información de insolación real (n) para estimar la R_s, luego se incorpora la variable albedo desde imágenes MODIS y se

continúa según la ecuación (19). Para la R_{nl} se requiere como dato de entrada la temperatura máxima y temperatura mínima de la celda en unidades $°K$, por lo que se aplica a estas el factor de conversión de grados Celsius a Kelvin, otro factor relevante es la presión de vapor real que fue anteriormente calculada, y finalmente la radiación relativa de onda corta (R_s/R_{so}), R_s fue obtenida anteriormente y R_{so} se calcula según la ecuación (18) que utiliza la elevación en metros de cada celda. Finalmente utilizando estas variables se puede calcular la radiación neta de onda corta y de onda larga cuya diferencia se traduce en Radiación Neta.

Todos estos pasos permiten calcular entonces la evapotranspiración de referencia según el método Penman Monteith, que según una consulta de expertos realizada en mayo de 1990, se recomienda como el único método estándar para la definición y el cálculo de la evapotranspiración de referencia (Allen et al., 1998).

6.2.2. Metodología de cálculo utilizando información de estaciones meteorológicas, explorador solar e imágenes satelitales

- **Blaney y Criddle (BC)**

Tal como se observa en la ecuación (24) este método solamente utiliza estadística de temperatura media, y la información geográfica (latitud). Estas dos se han tabulado para cada estación tal como lo señala la subsección 6.1.5, y la estimación de la ET_o es fácilmente obtenida para el periodo de tiempo de estudio determinado.

- **Hargreaves (HA)**

Para este método son necesarios los registros de temperatura media, para el cálculo de la R_s se precisa información horas de insolación real y se utilizan los datos trabajados a partir del registro del Explorador Solar, las variables N y R_a requieren de la latitud de cada estación, para lo cual solamente es necesario acceder a la tabla de datos.

- **Hargreaves Simplificado (HS)**

Este método necesita la variable TR o amplitud térmica, temperatura media y la radiación extraterrestre (R_a). Se requiere de estadísticas de temperatura máxima y mínima, temperatura media, y para el cálculo de R_a solamente es necesaria la latitud de cada estación. De esta manera y mediante la ecuación (31) es posible estimar la evapotranspiración de referencia a través del método de Hargreaves de forma simplificada.

- **Turc (TU)**

Para estimar la evapotranspiración de referencia, tal como indica la ecuación (33), se utiliza estadística de humedad relativa, también incorpora en su metodología la temperatura media y para calcular la tercera variable R_s (radiación de onda corta), al igual que el método de Hargreaves (HA), se requiere de las horas de insolación real datos trabajados a partir de los registros del Explorador solar, N y R_a que utilizan la latitud de cada estación.

- **Turc Simplificado (TS)**

La versión simplificada de Turc utiliza las variables HR y T_{media}. El procesamiento de datos se modifica cuando se calcula la radiación de onda corta, empleando T_{max} y T_{min} para el cálculo de TR, y R_a solo usa la variable latitud de cada estación meteorológica.

- **Penman Monteith (PM)**

Para desarrollar este método se cargan en la subrutina de MATLAB las temperaturas media, máxima y mínima, al igual que la temperatura de rocío. La temperatura media se utiliza en el cálculo de Δ, las temperaturas extremas son necesarias para calcular e_s, y la temperatura máxima junto al punto de rocío las requiere e_a. La elevación es propiedad de cada estación y se encuentra tabulada al igual que la ubicación geográfica, en este caso se utiliza para calcular γ. Luego se incorpora la variable velocidad del viento (u_2), que anteriormente fue tratada para que sea en las mismas unidades que este método define.

El proceso continúa con el cálculo de la radiación de neta de onda corta, como ya se ha explicado, se calculan la duración máxima de insolación (N) y la radiación extraterrestre (R_a) con la latitud de cada estación meteorológica. Luego ubicando la latitud y longitud de las estaciones meteorológicas en las matrices tridimensionales de albedo e insolación real (n), se extrae el registro diario de la celda que contiene la información para cada estación, con todo esto se calcula la radiación neta de onda corta. Para el cálculo de la radiación neta de onda larga se requiere de las T_{max} y T_{min} en grados Kelvin, presión de vapor real e_a y la relación R_s/R_{so} que depende de las variables albedo, n, N y R_a. Así se puede calcular la radiación neta que corresponde a la diferencia entre R_{ns} y R_{nl}. Finalmente incorporando todas estas variables en la ecuación (1) se puede calcular la evapotranspiración de referencia diaria para cada estación.

6.2.3. Distribución temporal de la Evapotranspiración

Para poder asimilar mejor los resultados, y comprender cómo la evapotranspiración evoluciona en distintas etapas temporales, se elaboró una subrutina que permite acumular las estimaciones diarias en meses, posteriormente en temporadas estacionales y finalmente en año hidrológico (desde abril a marzo).

El cálculo acumulado mensual precisa tener un registro completo de cada día del mes, eliminando así de la colección los meses que al menos les falte un valor diario. Con esto se tendrá una ET_o medida en mm/mes. La estadística diaria se encuentra desde el 1 de enero de 2004 hasta el 30 de noviembre de 2016. Se decidió eliminar los meses que se encuentren fuera de un año hidrológico completo, es decir, se descarta la estadística previa a abril de 2004 y posterior a marzo 2016. Luego se calcula el promedio de los meses respectivos, para obtener una evapotranspiración media mensual, teniendo así un valor para cada mes del año (12 meses). De manera similar al desarrollo anterior, se calcula la ET_o acumulada en las estaciones del año, cuyo periodo se observa en la Tabla 6.1. Con esta información se elabora una subrutina que va sumando la evapotranspiración diaria hasta completar el periodo de la estación, y registrando únicamente los valores que se encuentren completos, es decir, no exista dato faltante en algún día. También se eliminan los días de registro que sean previos al 21 de marzo de 2004 y posterior a 20 de marzo de 2016. Luego se promedian los valores de cada estación del año y se tiene una media para cada estación (4 estaciones del año).

Tabla 6.1: Periodo de tiempo de las estaciones del año.

Estación	**Fecha de inicio**	**Fecha de término**
Otoño	20 de marzo	20 de junio
Invierno	21 de junio	20 de septiembre
Primavera	21 de septiembre	20 de diciembre
Verano	21 de diciembre	19 de marzo

Posteriormente se calcula la evapotranspiración anual acumulada, esto se realiza en el periodo de año hidrológico que va desde abril hasta marzo (12 meses). Como ha sido habitual en los otros periodos de tiempo, se eliminan del registro los días previos al 1 de abril de 2004 y posteriores a 31 de marzo de 2016. La Evapotranspiración acumulada anual requiere que el año

no disponga de días sin registro, por lo que serán eliminados los años que al menos les falte un día, luego se calcula la evapotranspiración media anual en $[mm/año]$ con todos los años que cumplan con los requerimientos.

Finalmente, la información de evapotranspiración conseguida a partir de los productos grillados CR2MET, será evaluada y comparada con la ET obtenida a partir de la estadística de estaciones meteorológicas (ver capítulo 5.2.1), con la información mostrada por el producto MODIS (ver capítulo 5.4.2) y con la ET medida en las estaciones meteorológicas (ver capítulo 5.2.2). Este análisis comparativo se realiza en diferentes escalas temporales (ver capítulo 6.2.3) y espaciales tomando relevancia en este caso las zonas naturales que han sido explicadas en el capítulo 4.1.

7. RESULTADOS

En el presente capítulo se exponen los resultados obtenidos en el cálculo de la Evapotranspiración mediante las diferentes metodologías antes descritas. En primer lugar, se muestran las estimaciones de ET mediante el uso de los productos grillados CR2MET, los datos espaciales del Explorador Solar e imágenes satelitales MODIS, generando mapas de Evapotranspiración a diferentes escalas temporales. Luego se presentan los resultados de ET utilizando información de estaciones meteorológicas, e imágenes satelitales. De igual forma se presentan los datos a diferentes escalas temporales. Además, se presenta el producto MODIS de evapotranspiración, para su posterior comparación.

7.1. Estimaciones mediante utilización de productos grillados, datos espaciales e imágenes satelitales.

- **Evapotranspiración media anual [mm/año].**

Se ha calculado la evapotranspiración acumulada para cada uno de los años del periodo estudiado (2004-2016) generando a partir de estos una media anual, que se presenta en la Figura 7.1. Como se puede observar, en general, todas las metodologías implementadas tienen un comportamiento similar, con valores máximos en la zona norte y disminuyendo hacia la zona sur y austral del país. Lo mismo ocurre desde la zona costera hacia la Cordillera de Los Andes, observando un aumento de la ET estimada en el sector donde se ubica la Depresión Intermedia. Blaney y Criddle es uno de los métodos que difiere en sus magnitudes respecto a los demás, ya que este presenta valores de ET del orden de 250 a 1700 mm/año, y una distribución más homogénea en el territorio, este método es altamente controlado por la temperatura media diaria y la latitud (ver ecuación (24)) no influyendo otras variables, además, de acuerdo con ASCE (1990) este método sobrestima el cálculo de la ET en zonas húmedas (como lo son la ZS y ZA), y subestima el cálculo en las zonas áridas como la ZN, lo que explicaría que tenga menores valores de ET hacia el norte del país y mayores hacia el sur en comparación con los otros métodos. Las estimaciones realizadas mediante el método de Hargreaves, tanto su forma normal como la simplificada, muestran una tendencia similar, con valores máximos de 1.827 y 1.995 mm/año y mínimos 124 y 130 mm/año respectivamente, donde la mayor evapotranspiración de referencia ocurre en la zona norte (ZN) del país, y las mínimas en la zona austral (ZA). Penman Monteith es la metodología que presenta una mayor amplitud en el rango de sus estimaciones de ET, tomando

valores máximos cercanos a 2.500 mm/año observable ampliamente en la zona norte y norte chico del país, en particular abarcando en toda su extensión la depresión intermedia y parte del altiplano nortino, la zona austral es la que presenta una menor evapotranspiración con valores cercanos a los 350 mm al año. Turc y Turc simplificado se muestran similares en magnitud con mínimas de 333 y 360 mm/año y evapotranspiración máxima de 1.965 y 2.075 mm/años, lo que indicaría que la simplificación del método genera un leve aumento en el resultado. Cabe destacar que la mínima estimación de evapotranspiración obtenida, por cuatro de las seis metodologías, se ubica en los Campos de Hielo Sur, ubicado en Los Andes Patagónicos en la zona austral de Chile. Los métodos de Turc y Turc simplificado cuentan con un condicionamiento en la zona austral (ZA), en la que no ha sido posible la estimación de la ET por las restricciones mismas del método, que limita el cálculo a temperaturas medias superiores a -15°C, y de esta misma forma se muestran celdas vacías en la alta montaña del norte del país y gran parte de la zona austral.

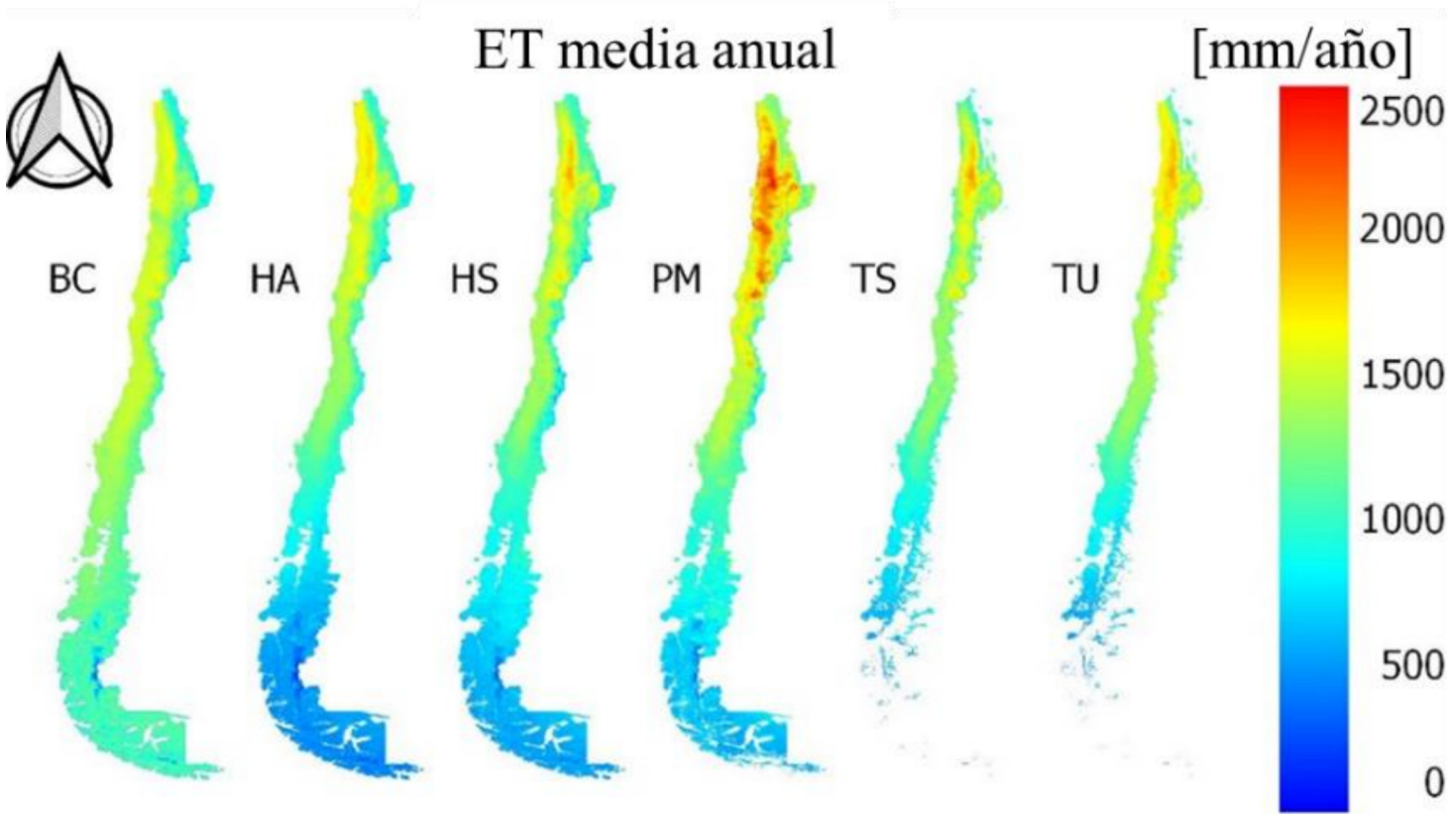


Figura 7.1: Mapa de evapotranspiración media anual (2004-2016), a través de los métodos Blaney y Criddle (BC), Hargreaves (HA), Hargreaves simplificado (HS), Penman-Monteith (PM), Turc simplificado (TS) y Turc (TU).

- **Evapotranspiración media estacional.**

También se ha calculado la evapotranspiración de referencia acumulada en las distintas estaciones del año, mapas que pueden ser observados en la Figura 7.2, en la que se aprecia en general el mismo comportamiento antes mencionado, donde los valores máximos están al norte y los mínimos al sur del país y en la alta montaña al norte. Es posible desprender de estas imágenes que las estaciones frías (otoño e invierno) presentan menores magnitudes acumuladas en comparación con las estaciones cálidas (primavera y verano), representando con colores azulados los valores menores y en tonos anaranjados y rojos una mayor estimación de ET. Lo que es ampliamente esperable dada la gran dependencia de la temperatura que poseen los diferentes métodos, tanto de la temperatura media como las extremas. Se observa además que tanto Turc como Turc Simplificado, en la temporada de invierno carecen de información en la zona austral, por lo antes mencionado respecto al límite en la temperatura.

- **Evapotranspiración media mensual [mm/mes]**

Otro rango temporal calculado en el presente trabajo corresponde al mensual, información condensada en la Figura 7.3 que muestra los meses de abril a septiembre, agrupando los meses de temperaturas más bajas, y la Figura 7.4 presenta la ET acumulada en los meses de octubre a marzo, meses más cálidos. El comportamiento es similar respecto a la ubicación geográfica de las zonas con mayores y menores magnitudes de ET. Es necesario destacar que en este caso las estimaciones mensuales de los meses fríos se condicen con lo observado para las estaciones de otoño e invierno, y las seis metodologías presentan valores desde 40 hasta 180 mm/mes. De igual forma ocurre con los meses de octubre a marzo que tienen similar distribución espacial que las temporadas primavera y verano, con mínimas del orden de 50 mm/mes y máximas de 280 mm/mes.

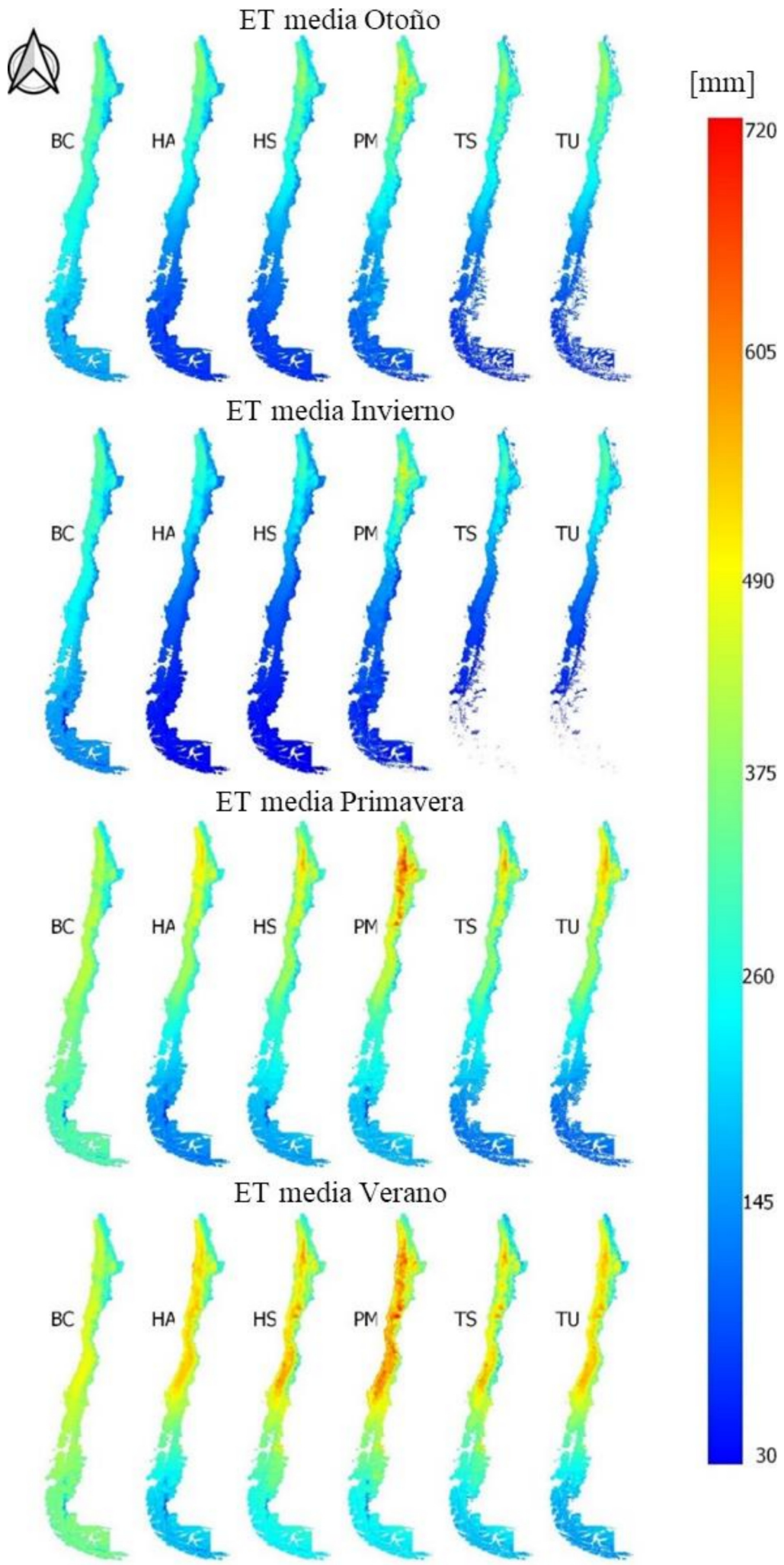


Figura 7.2: Mapa de evapotranspiración media estacional, BC, HA, HS, PM, TS y TU.

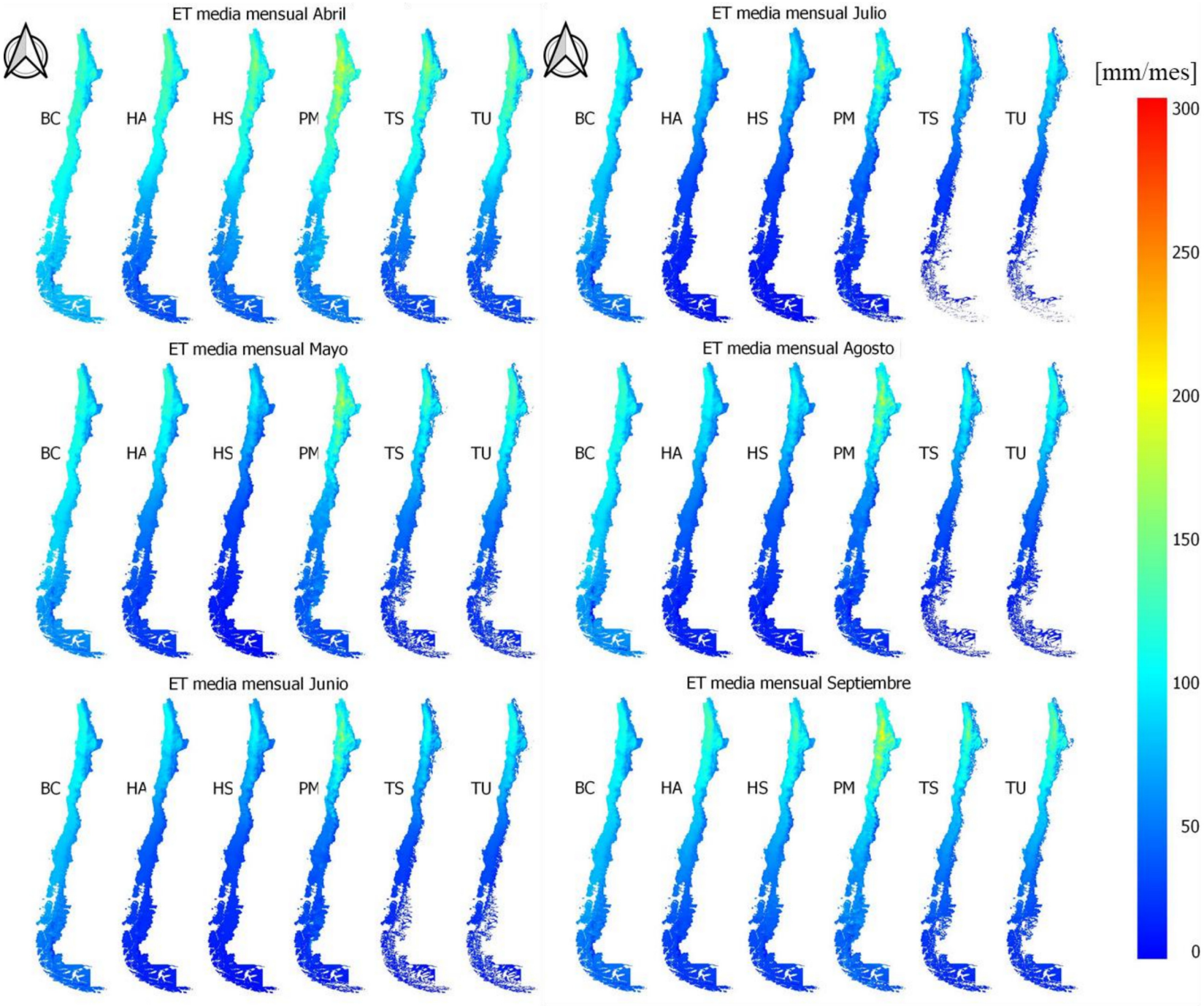


Figura 7.3: Mapa de evapotranspiración media [mm/mes]en meses abril, mayo, junio, julio agosto y septiembre BC, HA, HS, PM, TS y TU.

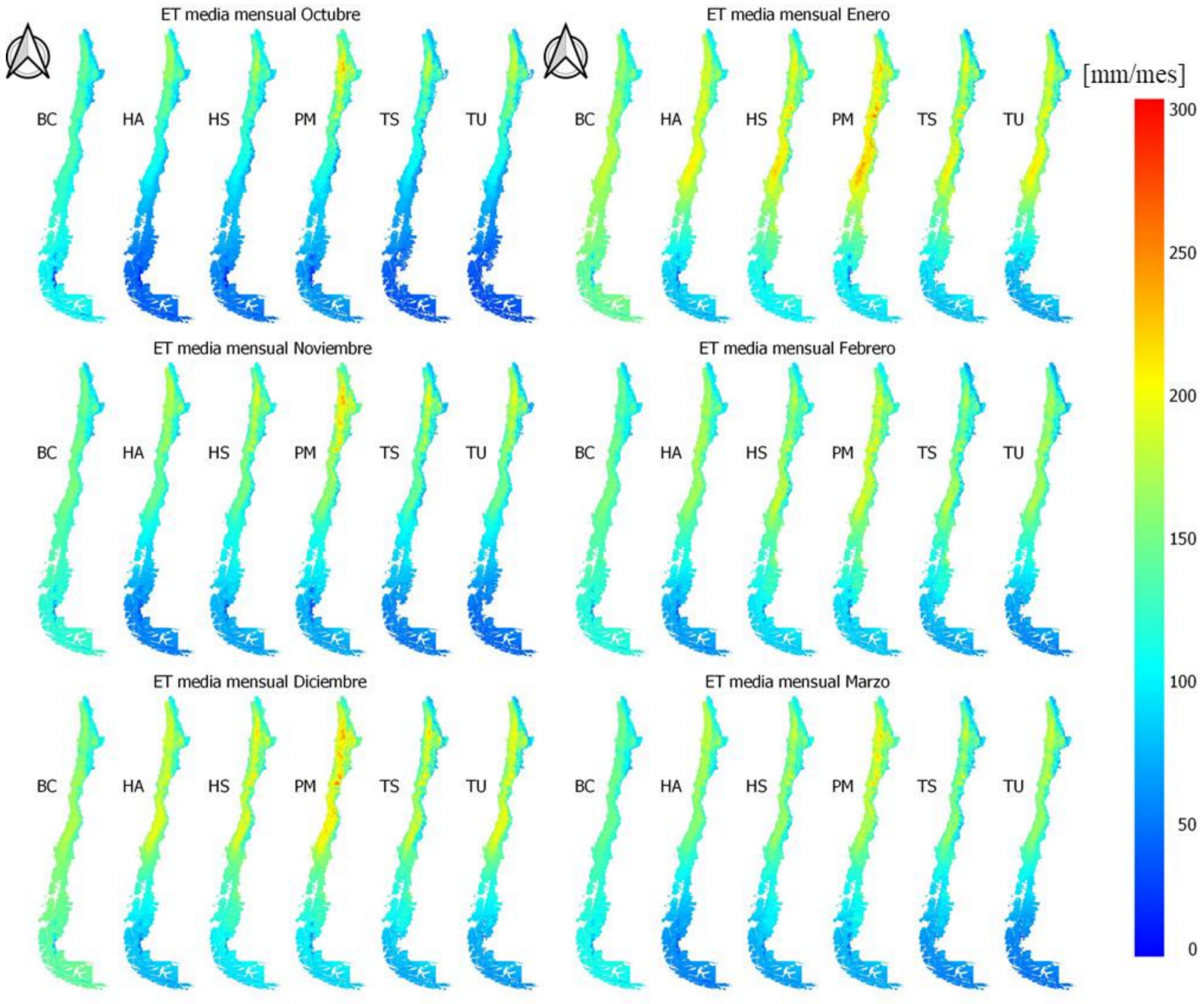


Figura 7.4: Mapa de evapotranspiración media [mm/mes] en meses octubre, noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo diciembre, BC, HA, HS, PM, TS y TU.

7.2. Estimaciones mediante utilización de información de estaciones meteorológicas, explorador solar e imágenes satelitales

- **Evapotranspiración media anual [mm/año].**

Los resultados que se observan en la Figura 7.5 corresponden a la estimación de la ET a nivel anual, en las Estaciones Meteorológicas indicadas en 5.2 ordenadas por latitud. En la imagen se observan tres líneas segmentadas, que dividen las zonas naturales a las que pertenece cada estación, es decir, de izquierda a derecha Zona Norte (3), Zona norte chico (1), Zona Centro (12) y Zona Sur (12), no existiendo estaciones meteorológicas con estadística suficiente en la Zona Austral (0). En general, los resultados obtenidos por los seis métodos tienen un comportamiento similar en todo el país, tendiendo a la disminución de la estimación de ET hacia el sur. En la zona norte se observa una mayor diferencia entre los resultados más bajos y los más altos. El método BC, se muestra relativamente constante a lo largo de todas las estaciones de la ZS, mostrando valores superiores a los demás métodos en esta zona. Las estimaciones realizadas mediante los métodos simplificados (HS y TS) toman valores similares en cada estación meteorológica independiente de la zona a la que esta pertenezca, siendo de mayor magnitud HS en todas las estaciones exceptuando las estaciones 220002 y 330019. Además, se observa en las estaciones ubicadas próximas a la costa, que estos dos métodos disminuyen sus estimaciones en comparación con las otras metodologías, esto puede deberse al factor de amplitud térmica (TR), ya que la masa oceánica influye en la oscilación térmica actuando como regulador, disminuyendo la TR (Borda, 2017).

Se destaca que el método de Turc, en ambas versiones, no ha podido ser estimado en las estaciones 320051 y 430002 por sus limitaciones de temperatura. Además, se hace énfasis en la falta de información en las estaciones meteorológicas, ya que para las estaciones 330077, 330112 y 360042 no se cuenta con estadística completa en ningún año del periodo estudiado, por lo que no pueden ser representadas.

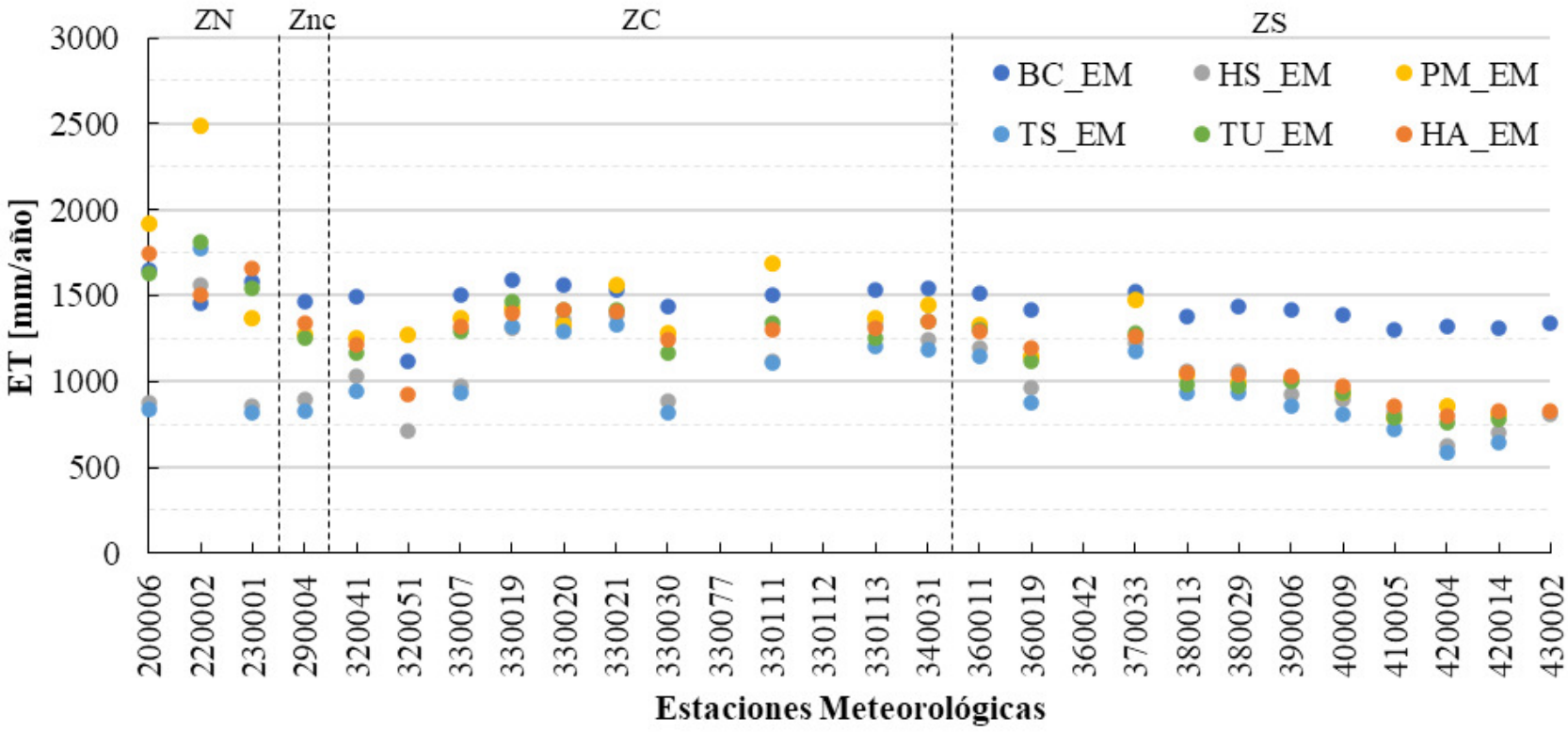


Figura 7.5: Evapotranspiración media anual estimada mediante estadística de Estaciones Meteorológicas, calculada a nivel anual con los métodos BC, HA, HS PM, TS y TU.

- **Evapotranspiración media estacional.**

La Figura 7.6 presenta la estimación de la evapotranspiración en las distintas estaciones del año, las tres líneas verticales segmentadas dividen las zonas naturales a las que pertenece cada estación, es decir, de izquierda a derecha Zona Norte (3), Zona norte chico (1), Zona Centro (12) y Zona Sur (12), no existiendo estaciones meteorológicas con estadística suficiente en la Zona Austral (0). En ellas se observa una clara tendencia de menor ET en invierno y mayor en verano, que consecuentemente corresponden a las estaciones del año con temperaturas y radiación (R_a) más bajas y altas respectivamente (ver Figura 3.1). Analizando de forma general el comportamiento de la ET obtenida mediante los 6 métodos, se tiene una conducta similar en otoño e invierno, sin embargo, a medida que pasa a la temporada de mayores temperaturas (primavera y verano) los resultados exhiben una mayor variación. El método BC es relativamente constante a lo largo de todas las zonas naturales variando su magnitud en cada periodo estacional, con mayores valores que el resto de los métodos en temporadas frías. Respecto a las mediciones realizadas con los métodos HS y TS, se observa que tienen un comportamiento parecido en todas las estaciones y con magnitudes similares, que además estiman valores menores de ET, haciendo la comparación con su símil no simplificado (HA y TU respectivamente), lo que indicaría que la simplificación propuesta al método disminuya el valor de la estimación de ET en las estaciones.

El método PM entrega resultados similares a las otras metodologías en las temporadas frías, mientras que en los periodos más cálidos se observa una clara tendencia a valores más elevados por este método en comparación al resto, principalmente desde la macrozona ZN a la ZC.

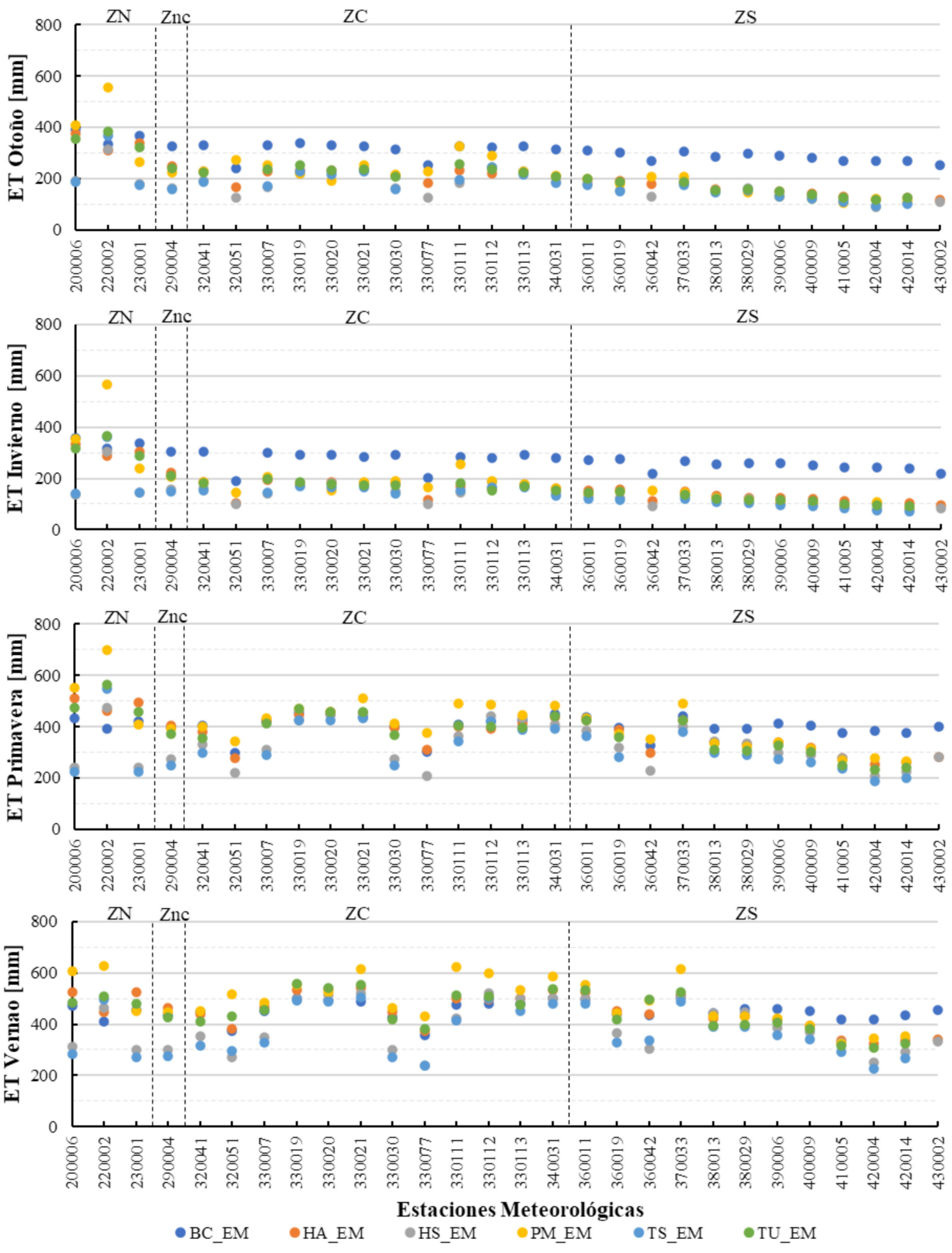


Figura 7.6: Evapotranspiración media estacional estimada mediante estadística de Estaciones Meteorológicas, en las estaciones otoño, invierno, primavera y verano.

- **Evapotranspiración media mensual (mm/mes)**

En la Figura 7.7 y la Figura 7.8 se presenta la estimación para todos los meses del año, generando un promedio mensual de los años estudiados. Los resultados obtenidos para este espacio temporal tienen directa relación con los obtenidos para las estaciones del año, es decir, los meses de abril a septiembre se condicen comportamiento de la temporada otoño-invierno y lo mismo ocurre con los meses de octubre a marzo y el periodo primavera-verano. De esta forma se tiene una mayor evapotranspiración en los meses de diciembre-enero y menores valores en junio-julio para todas las estaciones meteorológicas.

El método BC presenta mayores estimaciones en comparación con los otros métodos, en los meses de abril a septiembre desde la Znc hacia el sur, similar a lo observado en la Figura 7.6, y muestra valores parecidos a los otros métodos el resto de los meses. Los métodos HS y TS presentan las menores estimaciones de ET en la mayoría de las estaciones durante todo el año, siendo más notoria la diferencia en las estaciones de la zona norte (ZN) y zona norte chico (Znc), en las que puede haber hasta 100 mm/mes de diferencia con los resultados de los otros métodos en los meses más cálidos, y de 25 mm/mes en meses fríos. Los métodos HA, PM y TU en general se comportan de manera similar no existiendo mayor diferencia entre las estimaciones de estos métodos, a excepción de algunas estaciones meteorológicas (220002, 320051 y 330111), en que PM arroja resultados más elevados que HA y TU, exhibiendo en el periodo de abril-septiembre valores en promedio superiores a 25% (ver Figura 7.7), y en el periodo octubre-marzo valores en promedio superiores a 20% (ver Figura 7.8). PM corresponde a la metodología que mayor cantidad de variables involucra en su cálculo, tomando en cuenta no solamente la temperatura y la ubicación geográfica (latitud y altura), sino también la radiación solar, albedo, humedad relativa, nubosidad y viento, por lo que las diferencias con las otras metodologías podrían estar asociadas a esta última variable, que no forma parte del cálculo del resto de métodos.

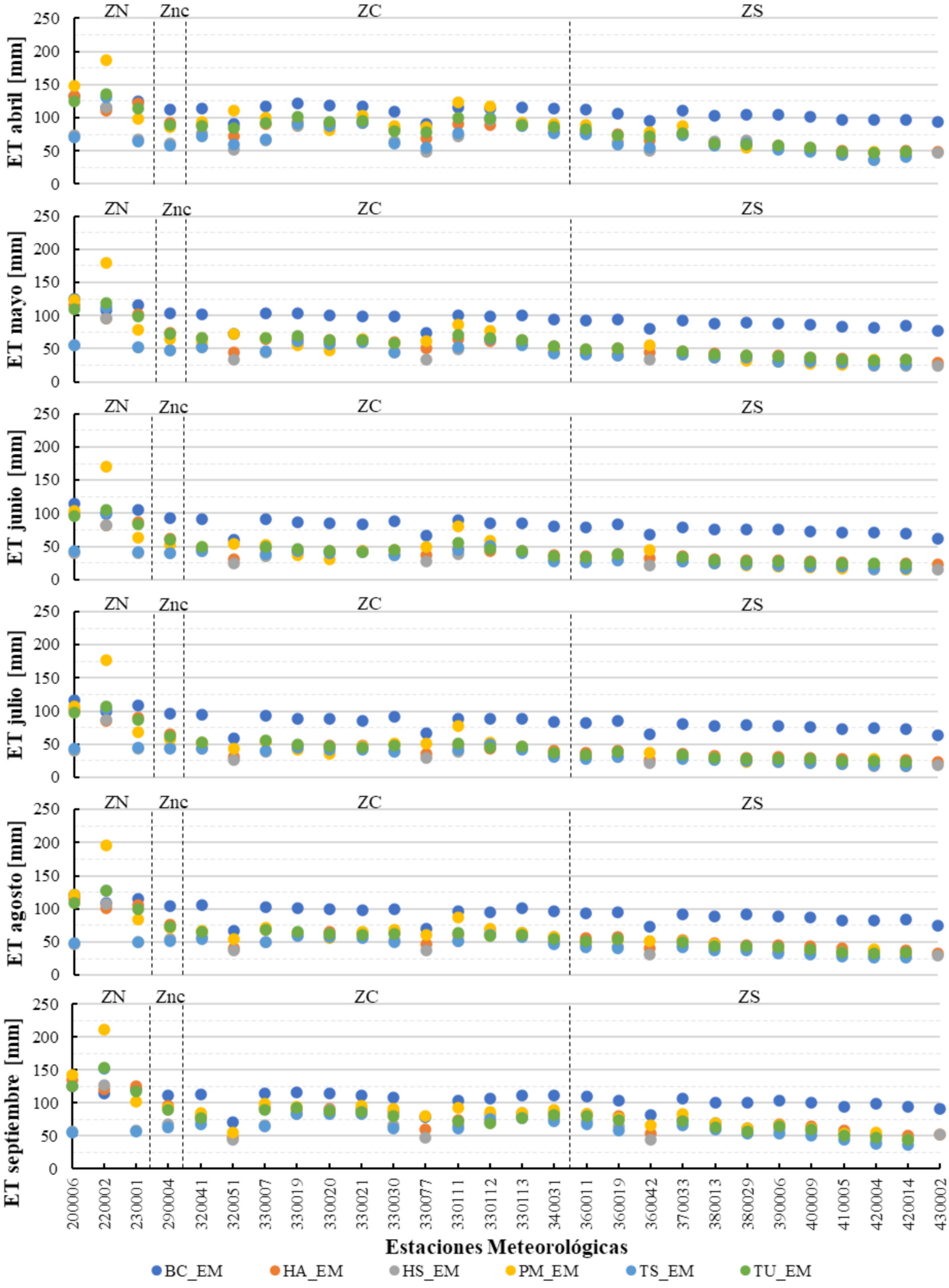


Figura 7.7: Evapotranspiración media mensual estimada mediante estadística de Estaciones Meteorológicas, en los meses abril, mayo, junio, julio, agosto y septiembre.

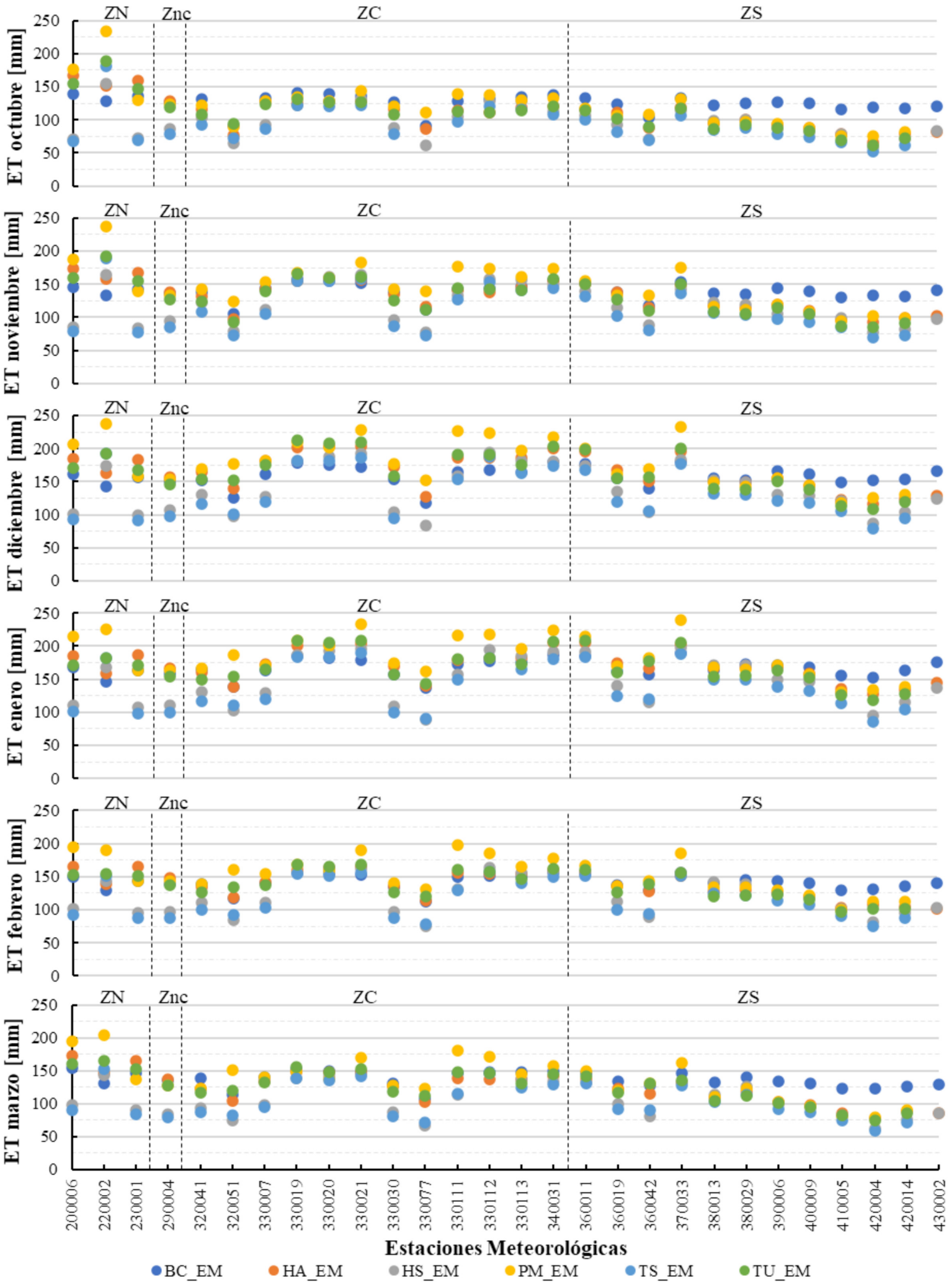


Figura 7.8: Evapotranspiración media mensual estimada mediante estadística de Estaciones Meteorológicas, en los meses octubre, noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo.

7.3. Comparación de evapotranspiración estimada mediante productos grillados CR2MET y por estadística de estaciones meteorológicas

Una forma de evaluar el comportamiento de los datos empleados es calculando el error porcentual (PE por sus siglas en inglés), para analizar si existe una sobrestimación o subestimación de los resultados estimados respecto al valor observado. Se toma como valor observado los resultados obtenidos mediante estadística de estaciones meteorológicas, y como valor estimado lo obtenido a través de los productos grillados. Así comparar el comportamiento de los productos CR2MET con cada método con respecto a la estadística de estaciones meteorológicas. Los mapas de Chile que se presentan a continuación están divididos por zonas naturales y ubican geográficamente las estaciones meteorológicas, que se están representadas por un círculo cuyo color varía de rojo a azul, dependiendo de si existe sobrestimación en el cálculo de la ET mediante productos grillados (PE>0) o subestimación (PE<0), ver capítulo 3.5.

- **Error Porcentual (PE) en evapotranspiración media anual [mm/año].**

De la Figura 7.9 se desprende que existe una menor magnitud en el error porcentual mediante el método BC, con un error dentro del rango de 6% y -9%, este margen de error podría explicarse por diferencias en la variable T_{media} presentada por el CR2MET versus las estaciones medidas, ya que es el único factor que se ve modificado en el cálculo. Luego se encuentra HA con un error que va de 12% a -5%, en este caso al igual que BC es la T_{media} la variable que se está comparando, ya que la nubosidad utilizada en el cálculo es la misma. El método TU es el siguiente en magnitud de error, cuyo rango se expande de 14% a -10%, las variables que recoge de las estaciones meteorológicas son la Humedad Relativa (HR) y la temperatura media, las que se ven comparadas con la HR obtenida mediante la ecuación (10) con T_{min} y T_{media}, ambas de los productos CR2MET. El método de Penman Monteith (PM) subestima hasta en -17% y sobrestima hasta en 22% los resultados de ET mediante productos grillados, en este caso PM corresponde al método que mayor cantidad de variables involucra, comparando temperaturas de CR2MET, viento y humedad relativa con las observadas en estaciones. El método simplificado de Hargreaves (HS) se muestra en todas las estaciones sobrestimando el cálculo de la evapotranspiración mediante los productos grillados en comparación con la estadística de estaciones de temperaturas extremas y media, presentando un PE en el rango de 45% a 0%, lo que puede indicar que el factor amplitud térmica (TR) podría estar siendo sobrestimado en CR2MET. Finalmente, Turc simplificado (TS) es el que tiene mayores magnitudes de error

porcentual, que en su gran mayoría las estaciones se ven sobrestimadas en el cálculo, con una máxima de 47% y subestimando la ET en estaciones hasta en -7%, este método involucra la HR, T_{media} y TR, sin embargo al igual que en HS, el factor de la amplitud térmica juega un rol importante, ya que acrecienta la magnitud del PE que además se ve influenciado por la variable HR estimada en comparación con la humedad relativa medida en estación.

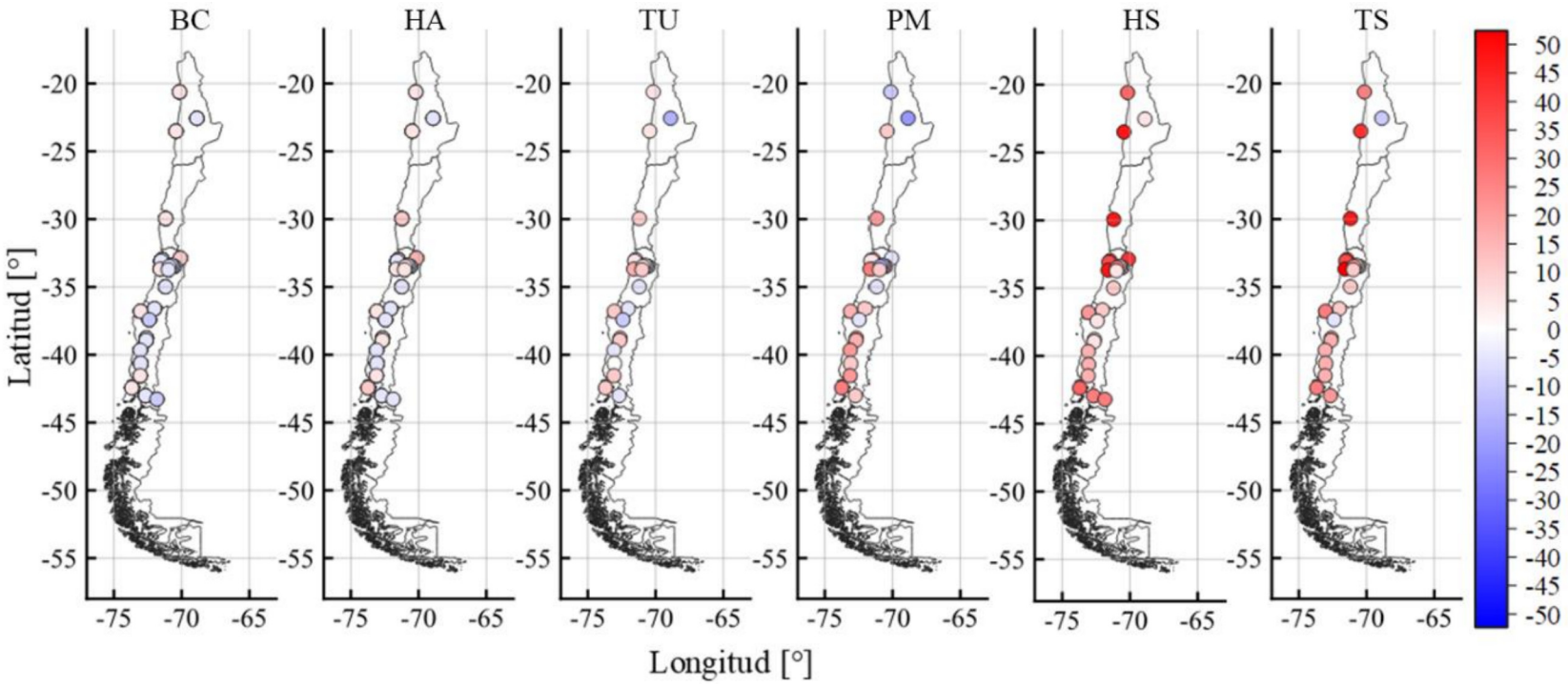


Figura 7.9. Error porcentual (PE), ET estimada mediante estaciones meteorológicas y a través de productos grillados, escala anual. De izquierda a derecha: BC, HA, TU, PM, HS, TS.

- **Error Porcentual (PE) en evapotranspiración media estacional y mensual.**

Realizando una comparación entre los 6 métodos de estimación, de acuerdo a lo presentado en la Figura 7.10 se observa un panorama similar al presentado en la Figura 7.9, ya que para las cuatro estaciones del año los métodos de Blaney y Criddle, Hargreaves y Turc muestran el menor error porcentual de estimación por productos grillados en comparación con estadística de estación meteorológica que varía de -20% a 25% en todas las temporadas. Las gráficas de PM muestran que las estaciones de la ZS presentan mayores sobrestimaciones (puntos rojos) que otras zonas naturales, se destaca que el PE es incluso superior para las temporadas de otoño e invierno (-27% a 56%). Situación diferente ocurre con los métodos simplificados (HS y TS), que toma cifras más altas en la ZN, Znc y ZC, en las que se puede observar un mayor valor de PE que en se traduce en una sobrestimación de la ET de los productos grillados, con errores superiores a 60% en temporadas cálidas (primavera-verano). Los errores porcentuales mensuales se presentan la Figura 7.11, Figura 7.12 y Figura 7.13, en las que se observa la misma conducta que la Figura 7.10, en las que se muestra un similar resultado entre los meses más cálidos (meses

de octubre a marzo) con primavera y verano y los meses más fríos (abril a septiembre) con otoño e invierno.

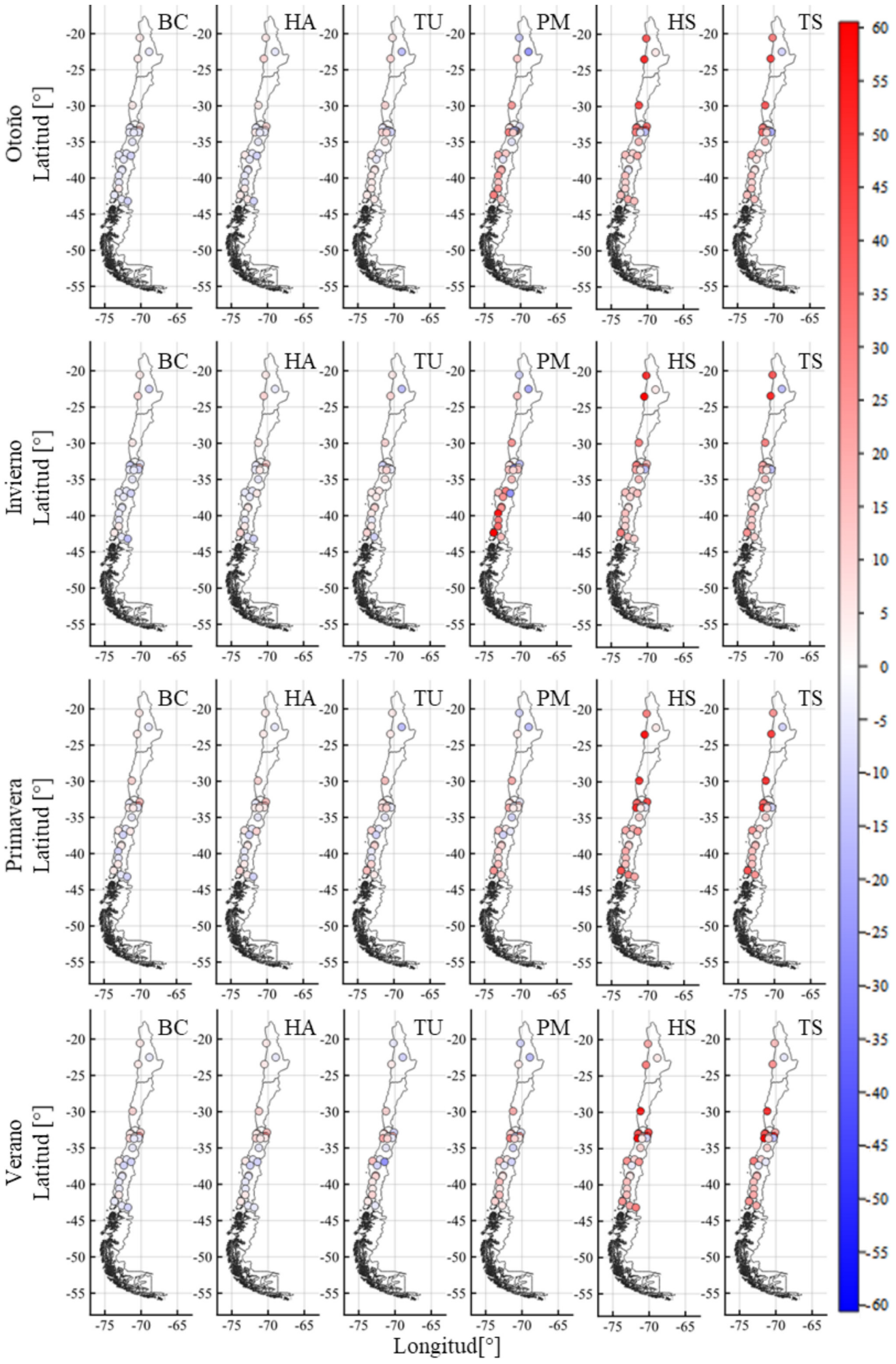


Figura 7.10: Error porcentual (PE), ET estimada mediante estaciones meteorológicas y a través de productos grillados, en temporada otoño, invierno, primavera y verano. De izquierda a derecha: BC, HA, TU, PM, HS, TS.

- **Meses**

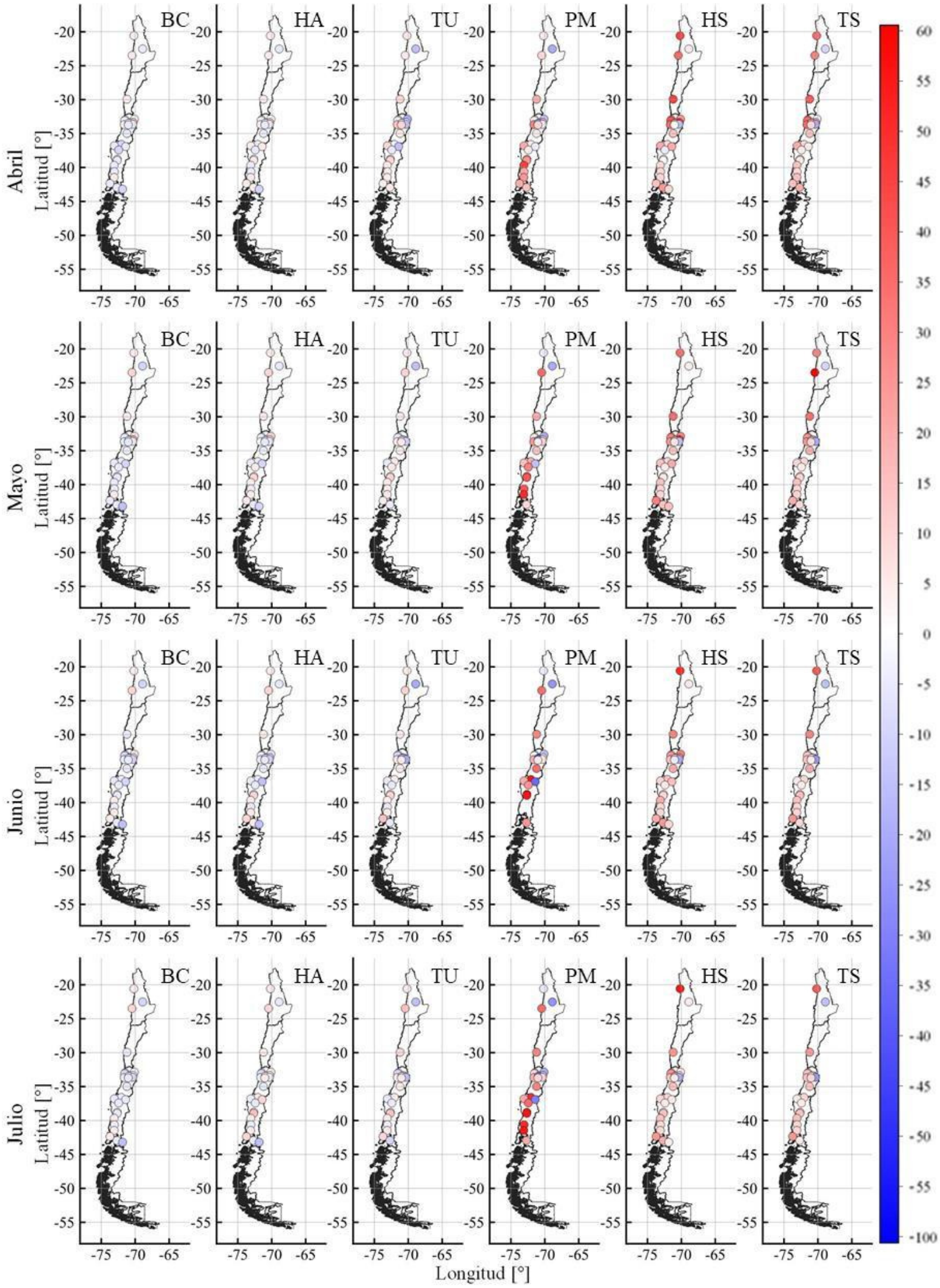


Figura 7.11: Error porcentual (PE), ET estimada mediante estaciones meteorológicas y a través de productos grillados, de abril a julio. De izquierda a derecha: BC, HA, TU, HS, TS, PM.

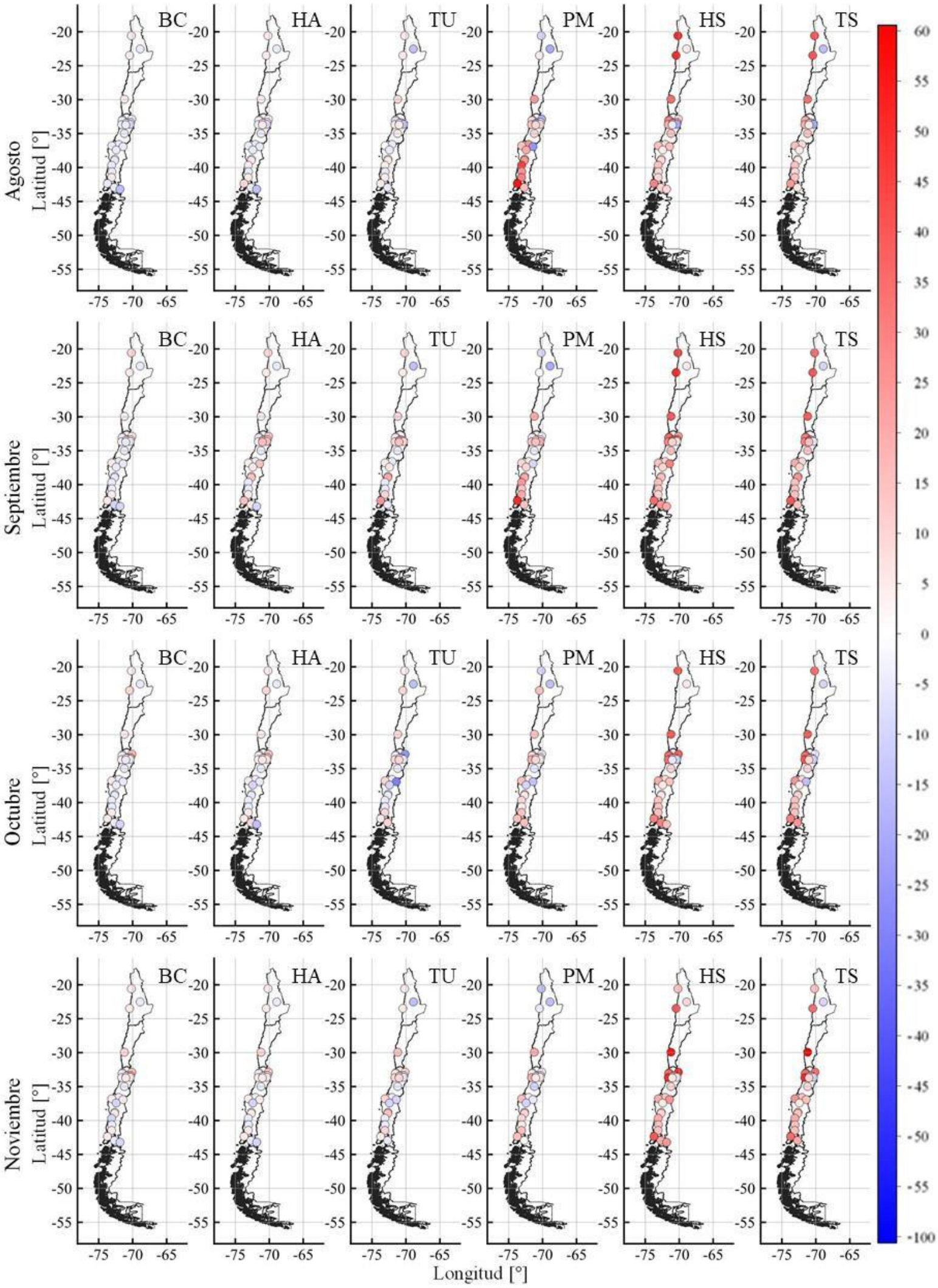


Figura 7.12: Error porcentual (PE), ET estimada mediante estaciones meteorológicas y a través de productos grillados, de agosto a noviembre. De izquierda a derecha: BC, HA, TU, HS, TS, PM.

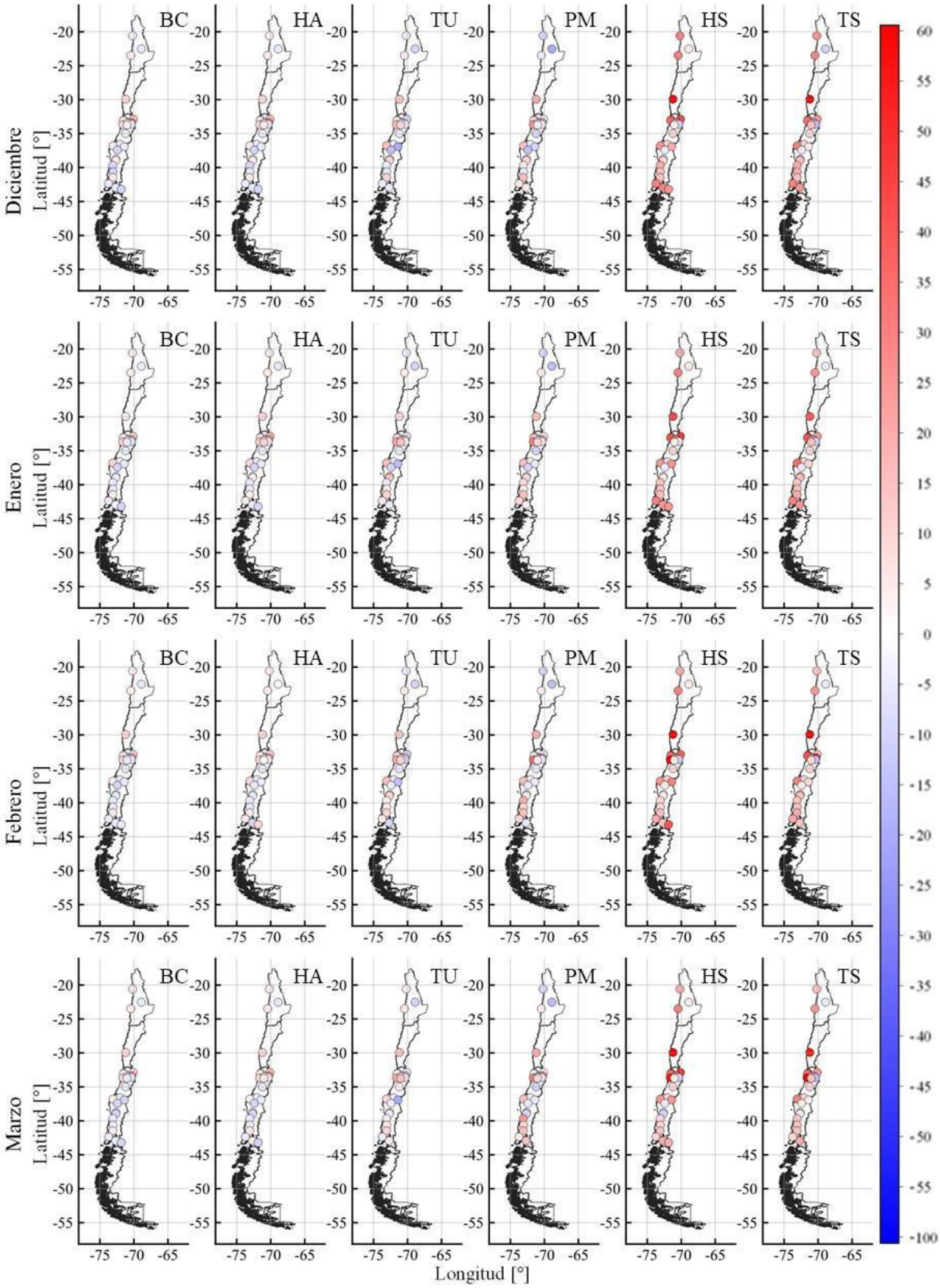


Figura 7.13: Error porcentual (PE), ET estimada mediante estaciones meteorológicas y a través de productos grillados, de diciembre a marzo. De izquierda a derecha: BC, HA, TU, HS, TS, PM.

7.4. Comparación de evapotranspiración estimada mediante productos grillados CR2MET y producto satelital MODIS.

Tal como se explica en el capítulo 6.1.4, se ha extraído el producto satelital MODIS MOD16A3GF de PET para todo el territorio nacional continental, en el periodo 2004 a 2016 y ha sido calculado el promedio anual para estos años. En la Figura 7.14 se muestra un mapa con el error porcentual de ET anual, donde se consideró como dato observado aquel obtenido del producto MODIS y como valor estimado la evapotranspiración obtenida según los distintos métodos considerados. De los resultados se observa que en general todos los métodos tienen un comportamiento similar en la zona norte, norte chico y zona centro, en las que se muestra una subestimación en el cálculo de ET en magnitudes entre -30% y -80%, tendiendo a la disminución hacia el sur. Respecto a la zona sur el método BC se diferencia del resto, ya que presenta sectores de subestimación y sobrestimación en partes iguales. En general, el resto de las metodologías muestran menores valores de ET que el producto MODIS, esta subestimación alcanza valores máximos del orden de -50%, sin embargo, también existe una pequeña zona más cercana a la ZA que presenta una sobrestimación en el cálculo de la ET.

En la zona austral del país, los métodos presentan valores más dispares, siendo BC el que presenta mayores valores de error porcentual, de magnitudes que exceden el 100% de sobrestimación. Los métodos PM, HA y HS presentan un comportamiento similar entre ellos, mostrando que hacia el este se subestima y al oeste se ve una sobrestimación de la ET, en mayor medida lo hace PM tomando valores máximos del orden de 90 a 100%. Hargreaves corresponde al método que menor magnitud de error presenta, tanto de subestimación como de sobrestimación, y su versión simplificada (HS) aumenta sus errores, pero en menor medida que el método de PM, permaneciendo en este caso en medio de ambos en cuanto a resultado de errores. Para las metodologías de Turc y Turc simplificado (TU y TS) se observa en general una subestimación en la región de Aysén, sin embargo, resulta imposible evaluar su comportamiento respecto a las ET de MODIS por completo en la zona austral del país, ya que como ha sido explicado en 7.1 presenta una baja densidad de celdas con valores no nulos en dicha zona.

Cabe destacar que para gran parte de la zona norte el producto MODIS de ET no presenta valores, exceptuando la alta montaña de la primera y segunda región del país, por lo que no ha sido posible realizar una comparación más exhaustiva de este sector.

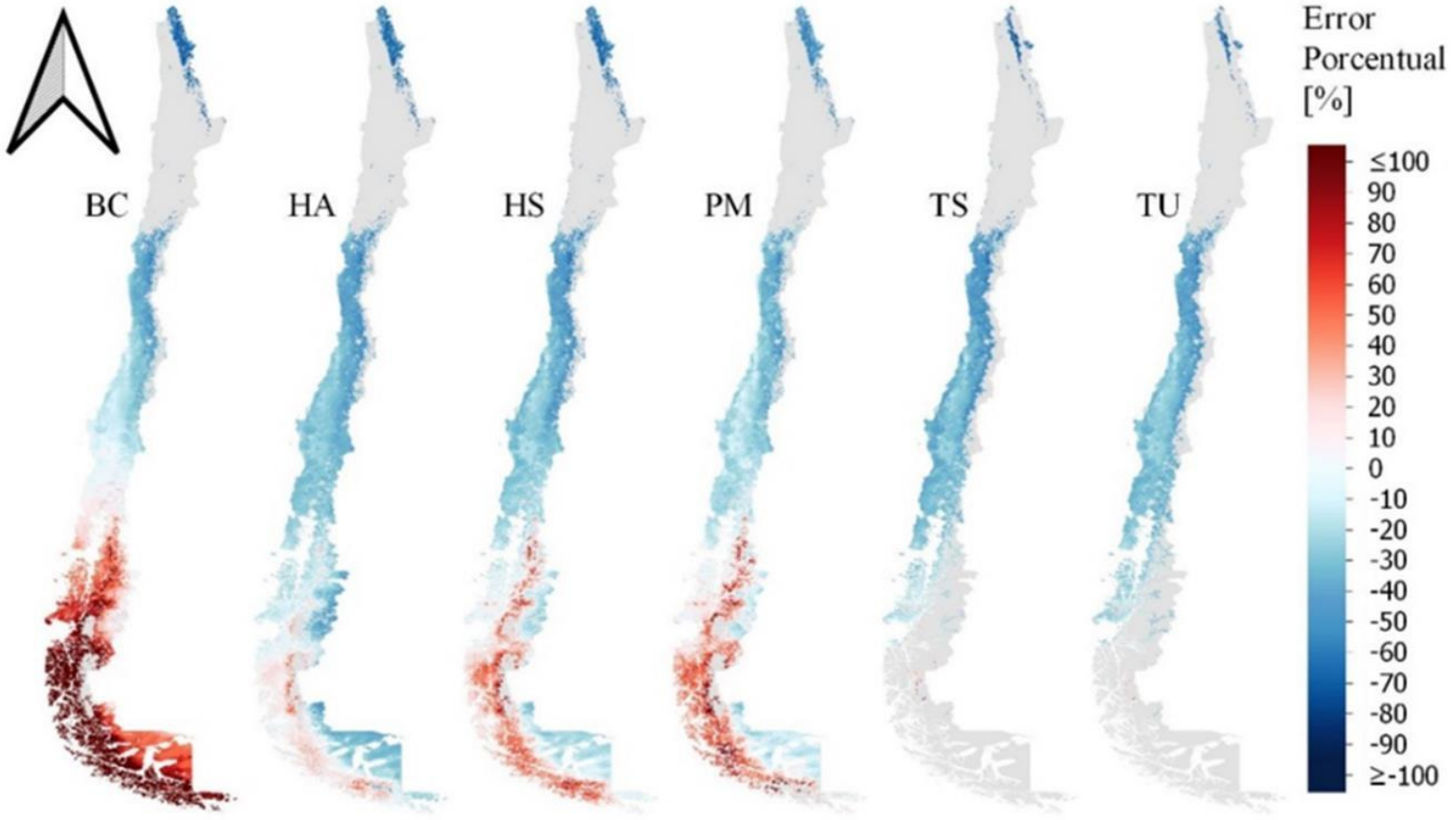


Figura 7.14: Error porcentual (PE), ET producto MODIS MOD16A3GF y a través de productos grillados CR2MET, media anual.

A continuación, se exponen histogramas representativos de cada zona natural del país, evaluando el error porcentual que presentan las estimaciones de evapotranspiración de los seis métodos, utilizando los productos grillados CR2MET e imágenes satelitales en comparación con las imágenes MODIS de evapotranspiración.

- **Zona Norte**

La Figura 7.15 contiene un histograma de los pixeles que representan ZN, para cada uno de los métodos, en estas gráficas se puede observar, en general, que se subestima la evapotranspiración con todas las metodologías. Penman Monteith es el que en proporción presenta menores magnitudes de error con el 100% de los pixeles con error inferior a -60%. Sin embargo, las otras metodologías presentan al menos un 33% de las celdas con errores en el rango de -60 a -80%, los métodos que mayor proporción de pixeles (%) con elevado error porcentual corresponden a BC con 62,3% y TS con 61,4% de sus celdas con subestimación superior a -60%, los demás HS, HA y TU muestran un porcentaje inferior de pixeles del orden de 33%, 38% y 40% respectivamente. Se destaca que en esta zona se tiene una menor cantidad de pixeles con celdas evaluadas, ya que las imágenes MODIS de evapotranspiración anual carecen de información en gran parte del norte del país.

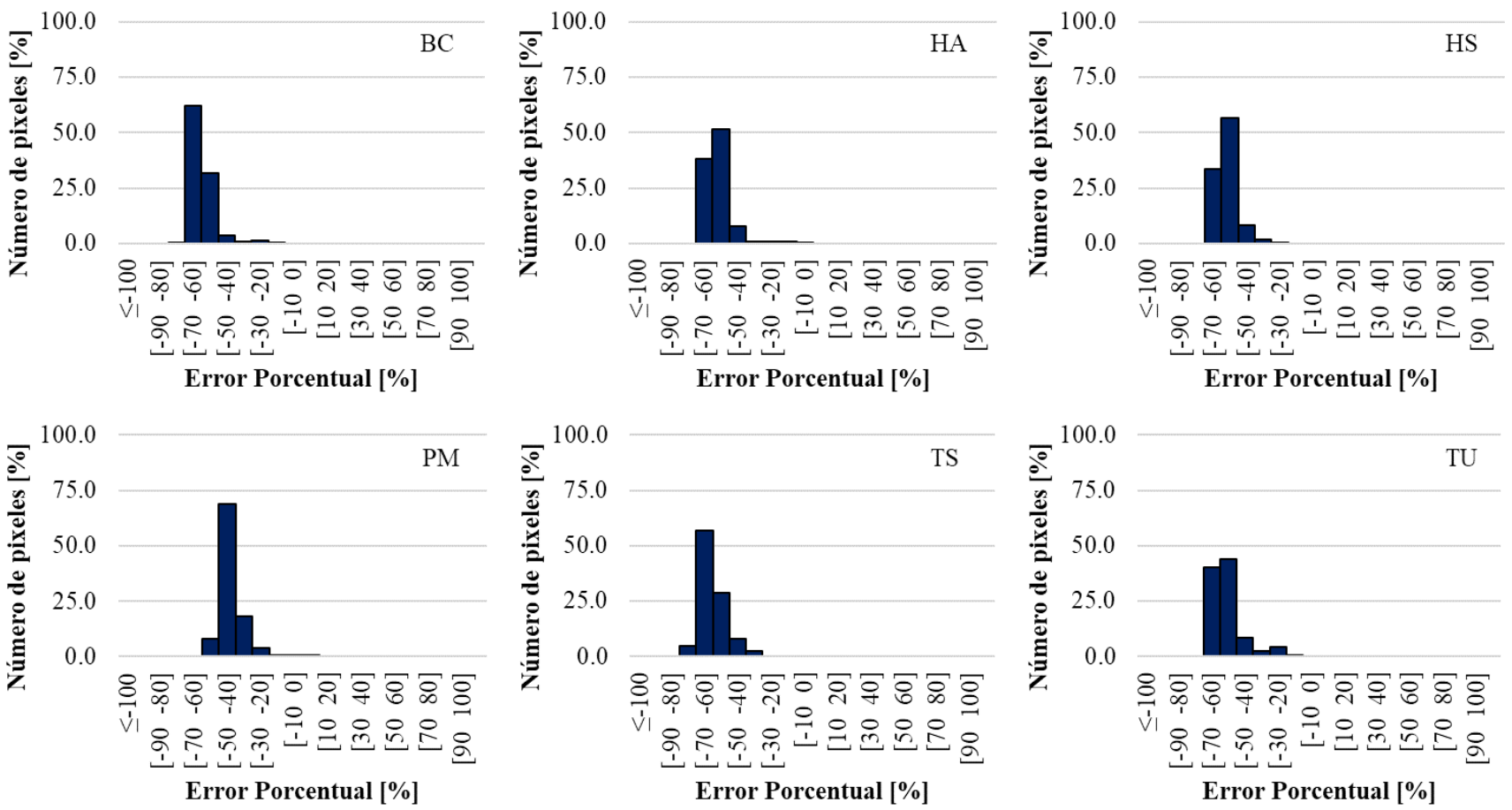


Figura 7.15: Histograma de error porcentual (PE) en zona norte del país, evaluando producto CR2MET en comparación con producto MODIS de ET.

- **Zona Norte Chico**

Realizando un análisis a los histogramas presentados en la Figura 7.16 correspondientes a zona natural comprendida por las regiones de Atacama y Coquimbo, en general todas las metodologías muestran subestimación en su cálculo, sin embargo, en esta oportunidad se ven errores en menor magnitud comparándolo con la ZN, ya que ningún método sobrepasa el -70% de error en subestimación. El método PM es el que presenta menor cantidad de error porcentual en la mayoría de sus pixeles con tan solo el 1,1% con error porcentual superior a -50%. HA, HS, TU y TS tienen un comportamiento similar entre si, sobre el 80% de sus celdas muestran error porcentual entre -30% y -50% y alrededor de 10% de los pixeles PE sobre el -50%, sin embargo, TS agrupa el 60% de celdas con PE entre -40% y -50% siendo mayor que los otros métodos. El método BC se muestra algo similar a los anteriores, sin embargo, en este caso un 75% de sus pixeles se encuentra en el rango de -30% a -50% de PE, y muestra mayor cantidad de celdas con un menor porcentaje de subestimación (>15% de celdas). En este caso el método de Penman Monteith tiene un mejor resultado respecto a las demás metodologías, realizando una comparación con las imágenes MODIS de ET.

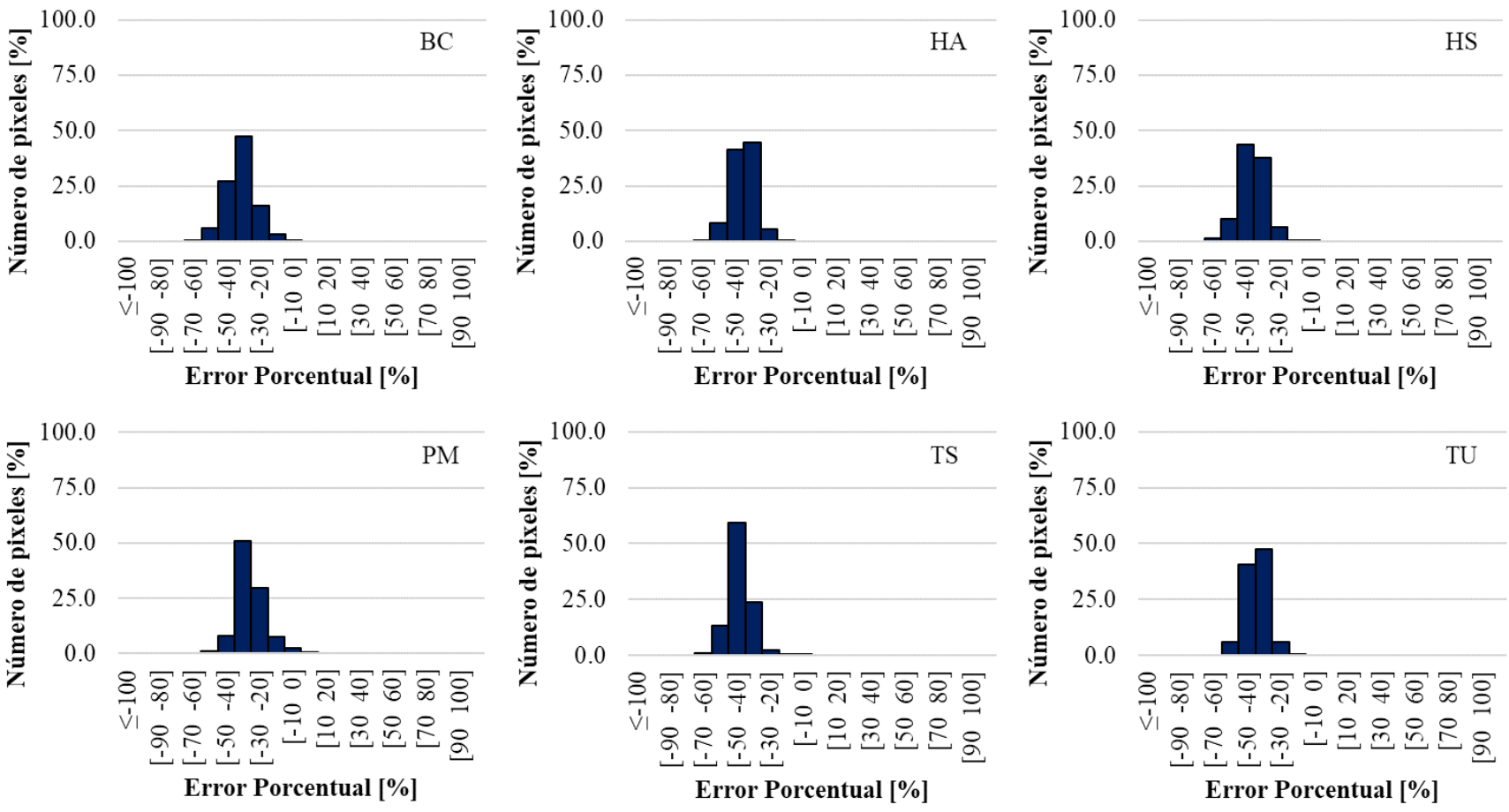


Figura 7.16: Histograma de error porcentual (PE) en zona norte chico del país, evaluando producto CR2MET en comparación con producto MODIS de ET.

- **Zona Centro**

Si bien de la Figura 7.17 se observa un comportamiento similar en los histogramas de los 6 métodos, las metodologías de PM y BC presentan una menor magnitud en el error porcentual, teniendo sobre un 90% de sus celdas con errores de subestimación inferiores a -30%, 5% y 4% de estos con errores entre 0 y -10%, respectivamente. Es resto de métodos muestra mayores valores de error porcentual, sin embargo, no superan el rango de -50% a -60%. El comportamiento en general de estos métodos en la zona centro, es mejor que las otras zonas analizadas ya que presentan errores porcentuales de menor magnitud en comparación con la macrozona norte y norte chico, en los que el cálculo de la evapotranspiración resulta subestimado en mayores proporciones. Se hace notar además que la evapotranspiración de MODIS es superior en magnitud que la evapotranspiración estimada en todas las celdas.

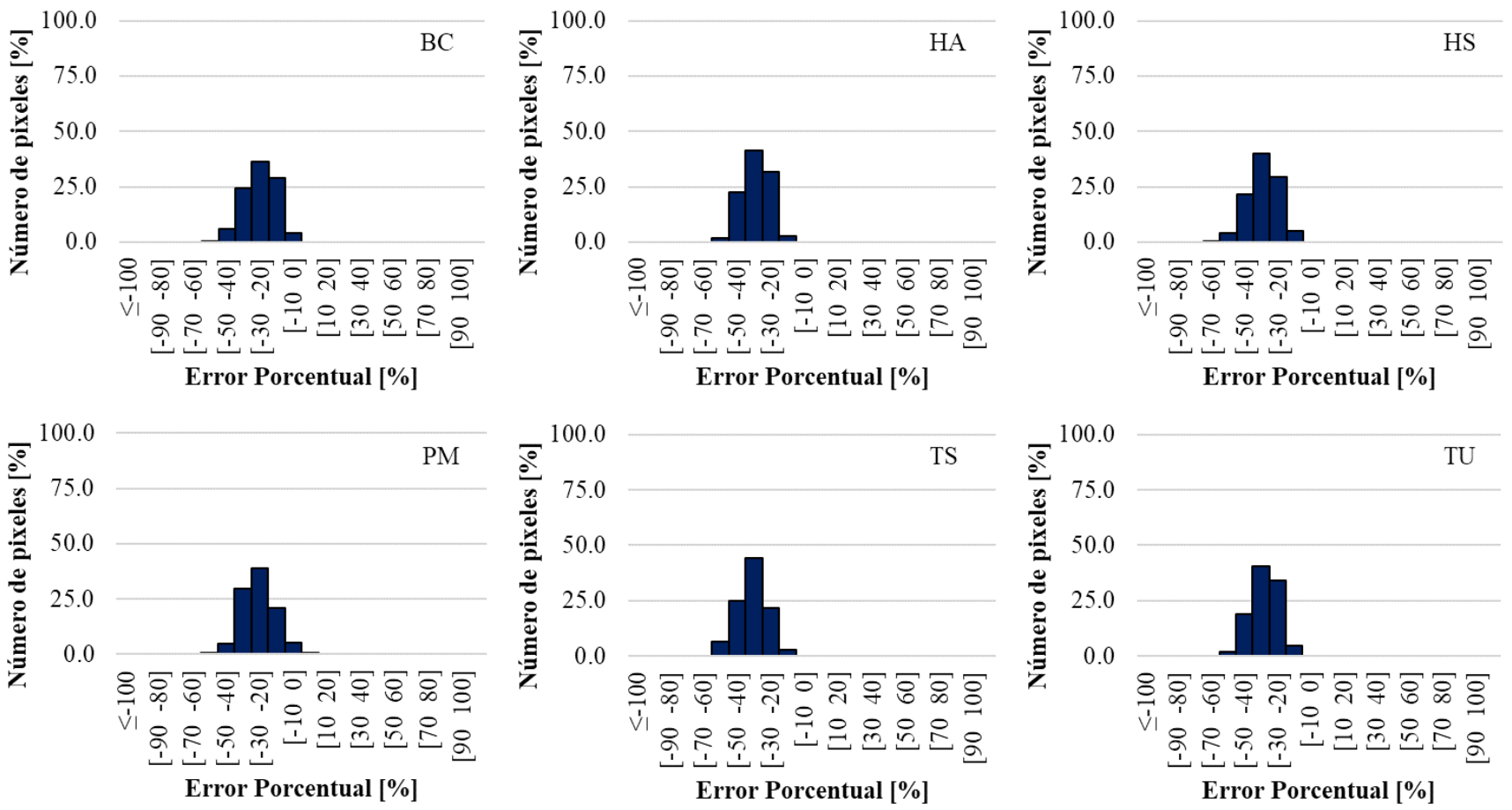


Figura 7.17: Histograma de error porcentual (PE) en zona centro del país, evaluando producto CR2MET en comparación con producto MODIS de ET.

- **Zona Sur**

La Figura 7.18 muestra los histogramas de error porcentual obtenidos para zona sur, de acuerdo a las distintas metodologías implementadas para el cálculo de la evapotranspiración. De estas se observa que BC presenta menores errores porcentuales que el resto de las metodologías con un 80% de las celdas con errores en el rango de -20% a 20%, un 7% con PE de subestimación mayor y el resto de las celdas con errores de sobrestimación superiores a 20%. En este sentido PM muestra que el 65% de sus pixeles se encuentra en el rango de error -20% a 20% y un 30% de -20 a -30% de subestimación. Los métodos de Hargreaves (HA y HS) presentan errores de subestimación y sobrestimación similares, con cerca del 70% de sus celdas en el rango de subestimación de -20% a -30%. Turc y Turc simplificado tienen el peor comportamiento, ya que sobre 95% de las celdas subestiman la ET y se encuentran en el rango de -20 a -50% de error porcentual. En este caso, TS es el de más bajo desempeño, y se destaca que Blaney y Criddle muestra en general las menores magnitudes de error porcentual que el resto de los métodos.

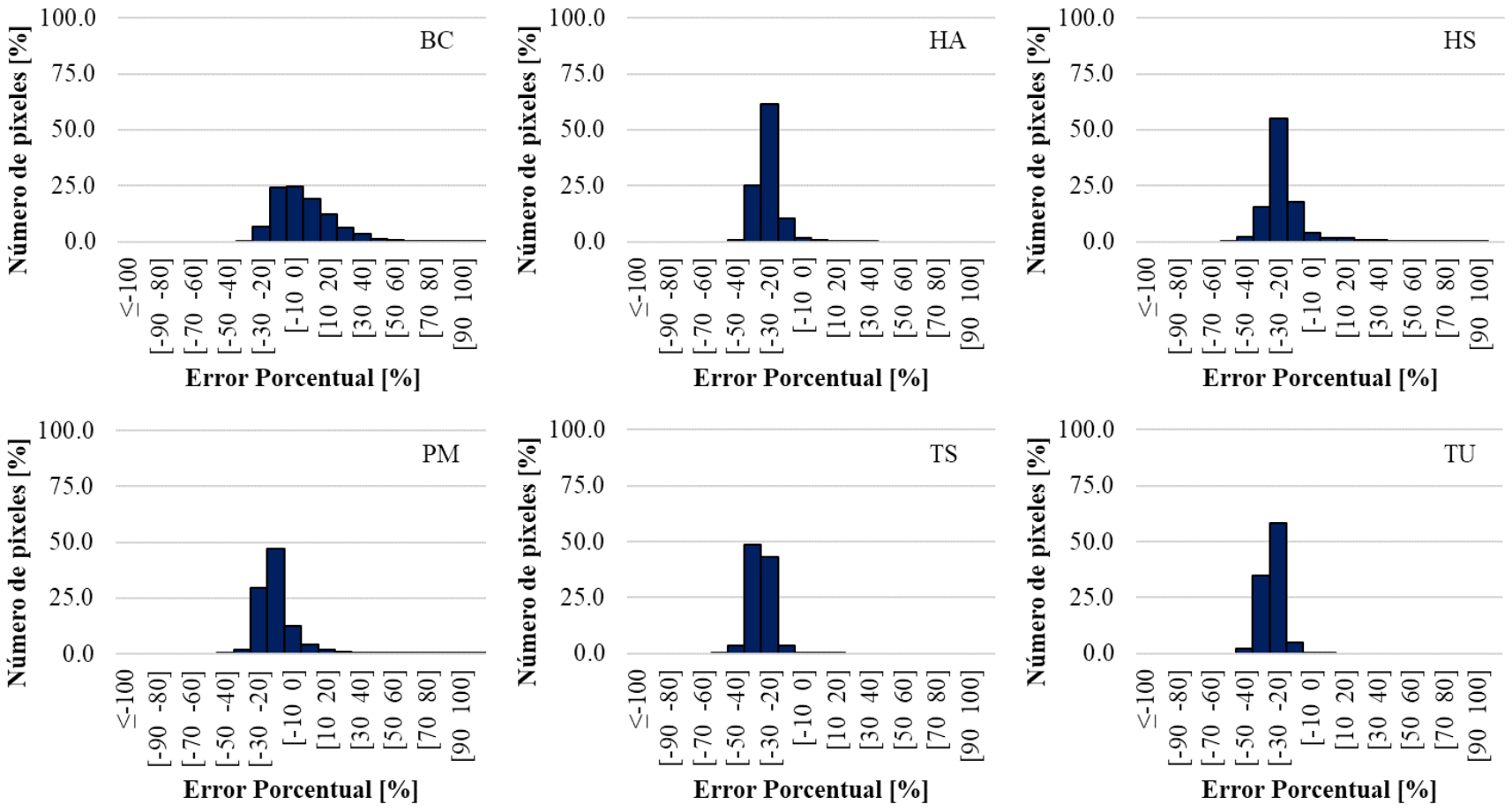


Figura 7.18: Histograma de error porcentual (PE) en zona sur del país, evaluando producto CR2MET en comparación con producto MODIS de ET.

- **Zona Austral**

Finalmente se expone la Figura 7.19, que grafica los histogramas correspondientes al cálculo del error porcentual para la zona austral del país. Los métodos Hargreaves (HA y HS) muestran un comportamiento similar entre si, con amplia cantidad de pixeles (83% y 73% respectivamente) dentro del rango de error porcentual entre -30% y 30%. Luego se tiene PM donde 64% de los pixeles de la zona presentan errores en el rango de -30% a 30% y el resto de las celdas muestran una sobrestimación que va del rango de 30% a 100%. Las metodologías TU y TS, presentan en gran cantidad de sus pixeles una subestimación en el cálculo de la ET, y solamente 5% y 10% respectivamente muestran sobrestimación (PE>0). La metodología que presenta un peor comportamiento en comparación con los otros métodos corresponde a BC que presenta errores de magnitud superiores a 100% de sobrestimación, con un 39% de sus pixeles superando este valor, 60% de ellos en el rango de 0 a 100%. Cabe recordar que para esta zona se cuenta con gran cantidad de celdas sin dato en los resultados obtenidos mediante la metodología Turc y Turc Simplificado, por lo que resulta poco cierto hacer un análisis de estos en la zona austral, situación que es posible observar en la Figura 7.14.

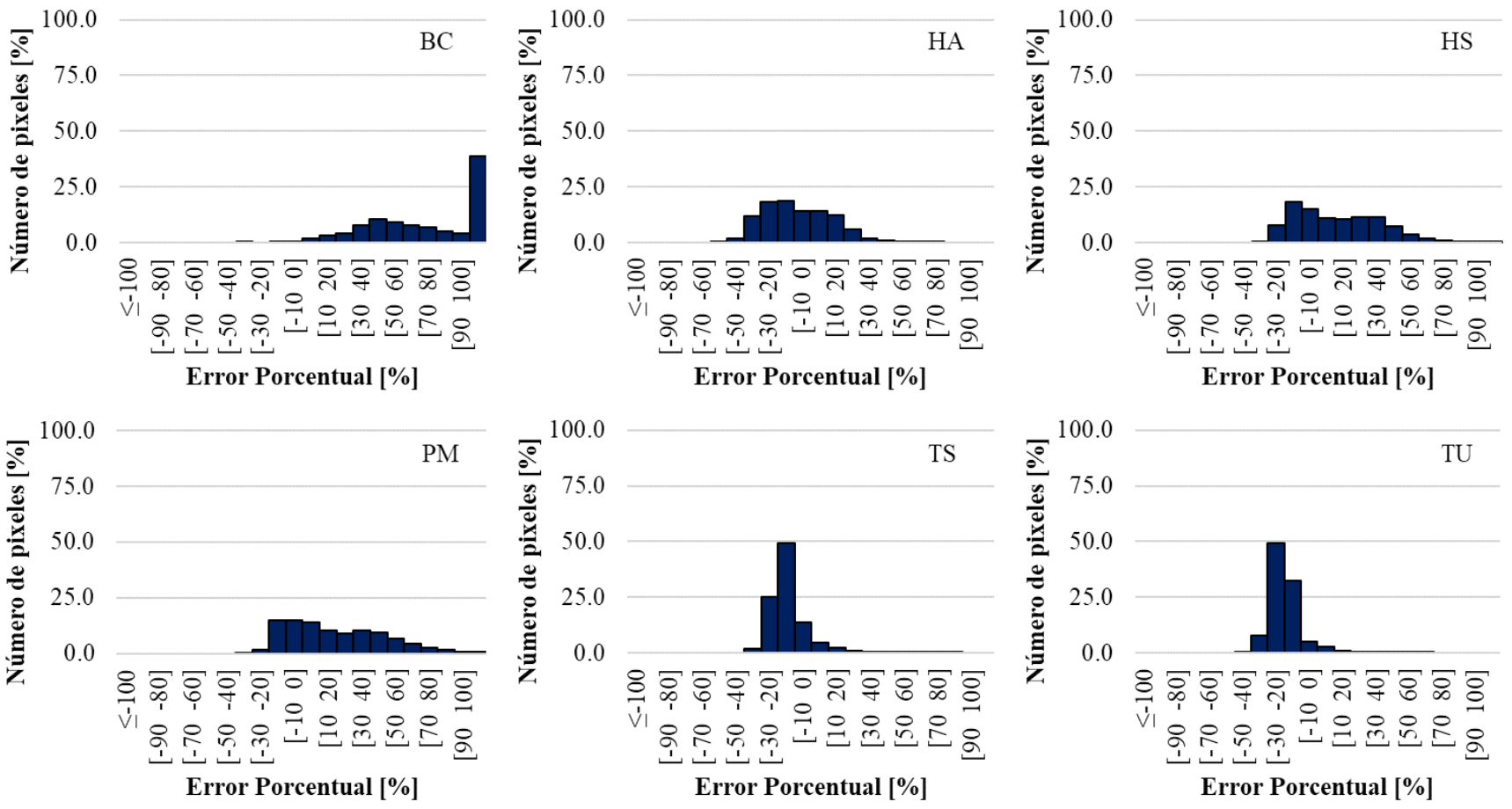


Figura 7.19: Histograma de error porcentual (PE) en zona austral del país, evaluando producto CR2MET en comparación con producto MODIS de ET.

7.5. Comparación de evapotranspiración estimada mediante productos grillados CR2MET y medida en estaciones meteorológicas

Se cuenta con información medida de evaporación (Evaporación desde Tanque PAM) en 5 estaciones meteorológicas del país, las que fueron mencionadas en el capítulo 5.2.2. A continuación, se exponen gráficas comparativas de estas mediciones con la evapotranspiración estimada a través de los productos CR2MET y los 6 diferentes métodos de cálculo. Realizando una observación general a la Figura 7.20 se puede notar que las estaciones ubicadas en zonas más extremas del país (230001 al norte y 410005 al sur) tienen un peor ajuste que el resto de las estaciones (290004, 330020 y 360019), en estas últimas tres los coeficientes de determinación de cada método toman valores superiores a 0,85, de acuerdo a lo indicado en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1. Coeficiente de determinación (R^2), Error cuadrático medio normalizado (NRMSE) y Error porcentual (PE), de los métodos BC, HA, HS, PM, TS y TU.

Estación	Índice	BC	HA	HS	PM	TS	TU
230001	**R^2 [-]**	0,83	0,90	0,83	0,86	0,82	0,90
	NRMSE [-]	0,29	0,17	0,41	0,29	0,47	0,23
	PE [%]	-12,5	-8,3	-34,5	-21,9	-40,3	-14,5
290004	**R^2 [-]**	0,87	0,90	0,89	0,91	0,88	0,90
	NRMSE [-]	0,38	0,24	0,18	0,30	0,17	0,21
	PE [%]	29,5	19,3	9,4	26,4	0,6	15,0
330020	**R^2 [-]**	0,93	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
	NRMSE [-]	0,41	0,19	0,21	0,23	0,20	0,20
	PE [%]	24,0	10,9	14,7	18,0	10,5	13,5
360019	**R^2 [-]**	0,86	0,92	0,91	0,92	0,92	0,92
	NRMSE [-]	0,38	0,17	0,17	0,18	0,20	0,17
	PE [%]	22,5	4,7	-1,8	9,9	-8,4	2,5
410005	**R^2 [-]**	0,67	0,73	0,71	0,74	0,72	0,73
	NRMSE [-]	0,58	0,28	0,31	0,29	0,29	0,28
	PE [%]	49,7	-0,6	3,3	6,5	-5,9	-4,1

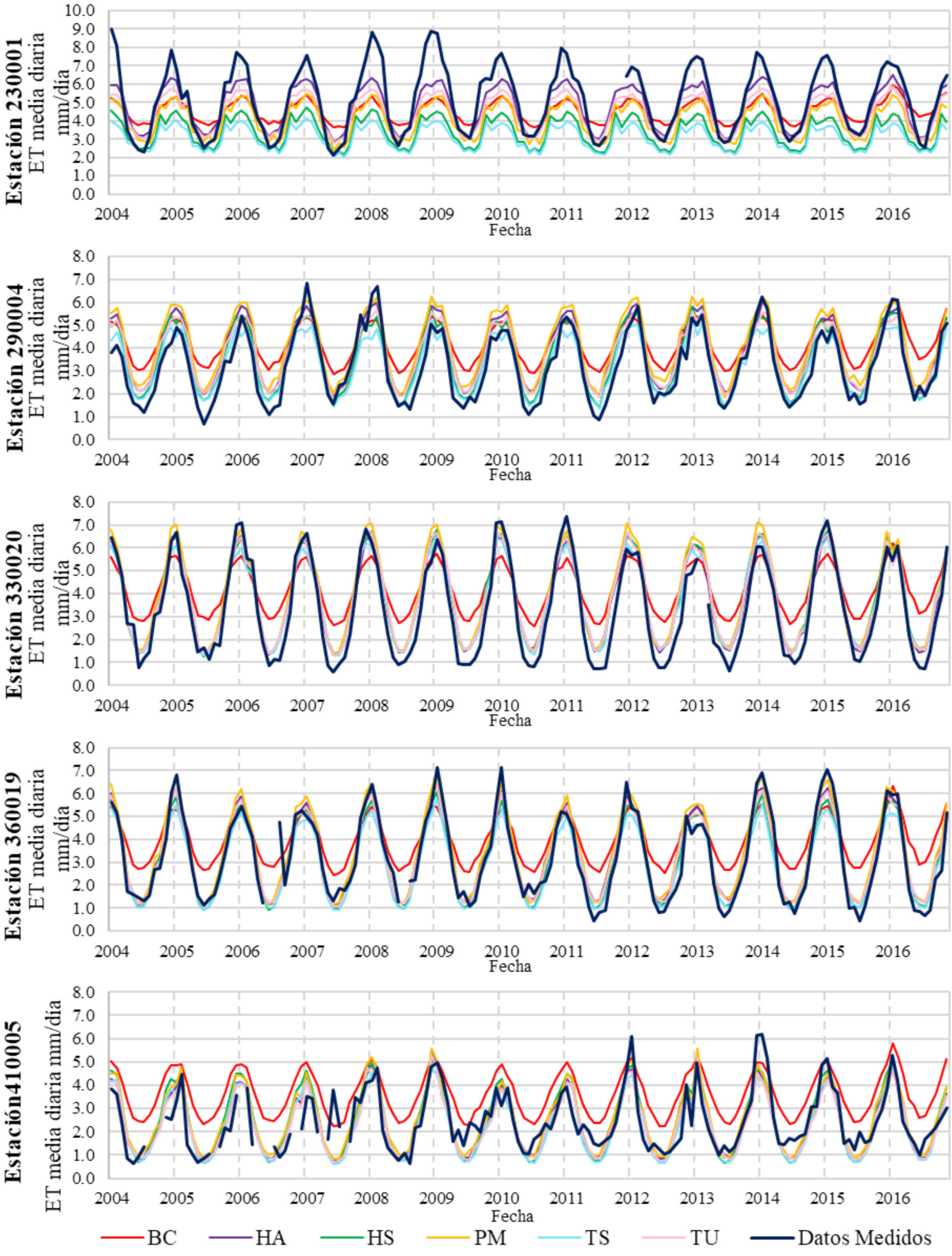


Figura 7.20. Evapotranspiración medida y estimada mediante productos grillados CR2MET en las estaciones 230001, 290004, 330020, 360009 y 410005.

La estación 230001 se encuentra ubicada en la Región de Antofagasta, por lo que pertenece a la ZN del país, cómo se puede observar en la Figura 7.20 la ET media diaria medida varía a lo largo del año de 9 a 2 mm/día aproximadamente, siendo máxima en el periodo diciembre-enero y mínima en los meses junio-julio, en este sentido todas las estimaciones siguen esta tendencia de máximos en verano y mínimos en invierno, sin embargo ninguno de los métodos logra alcanzar los valores máximos de ET medidos, y en general todos los métodos la subestiman según la Tabla 7.1 donde el indicador PE muestra porcentajes menores a cero para los 6 métodos, de esta misma tabla se puede extraer que el método de mejor ajuste según el coeficiente de determinación corresponde a HA con R^2 igual a 0,90, PE igual a -8,3% y NRMSE de 0,17 valores más bajos que las otras metodologías, además notar que los valores extremos se acercan a los medidos, donde el máximo se encuentra en torno a 6,5 mm y el mínimo 2,8 mm diarios, información que puede ser observada en la Figura 7.21. Luego se tiene el método TU que cuenta con coeficiente de determinación de 0,90 y PE de -14,5% que representa un ajuste satisfactorio (Lang et al., 2017), y NRMSE de 0,23, en la gráfica de la Figura 7.21 se observa que los datos máximos se alejan de la recta de pendiente 1 (rojo), es decir la ET obtenida mediante TU subestima en gran medida los datos de ET máximos. Los métodos PM y BC presentan similar desempeño, con R^2 igual a 0,86 y 0,83 y su error NRMSE de 0,29 y 0,28 respectivamente, habiendo mayor diferencia en el error porcentual donde PM es -22% y BC -12,5% que representa una subestimación de los métodos, esto también puede ser observado en las gráficas de la Figura 7.21, donde una gran cantidad de los puntos se encuentran bajo la curva roja. El peor ajuste lo presentan los métodos simplificados HS y TS, que a pesar que su coeficiente de determinación sea satisfactorio, 0,83 y 0,82 respectivamente, presentan un error cuadrático (NRMSE) por sobre 0,41, el error porcentual indica subestimación en -34% y -40% para los métodos HS y TS respectivamente, esta información puede ser observada en las gráficas de la Figura 7.21, en que ambas metodologías muestran la mayor parte de los puntos ubicados bajo la recta de pendiente 1 y se puede notar también el acotado rango de resultados estimados del método TS que va de mínimas de 1,8 mm/día y máximas de 4,2 mm/día, situación observable también en la Figura 7.20 donde se observan las curvas de TS y HS por debajo de las demás metodologías.

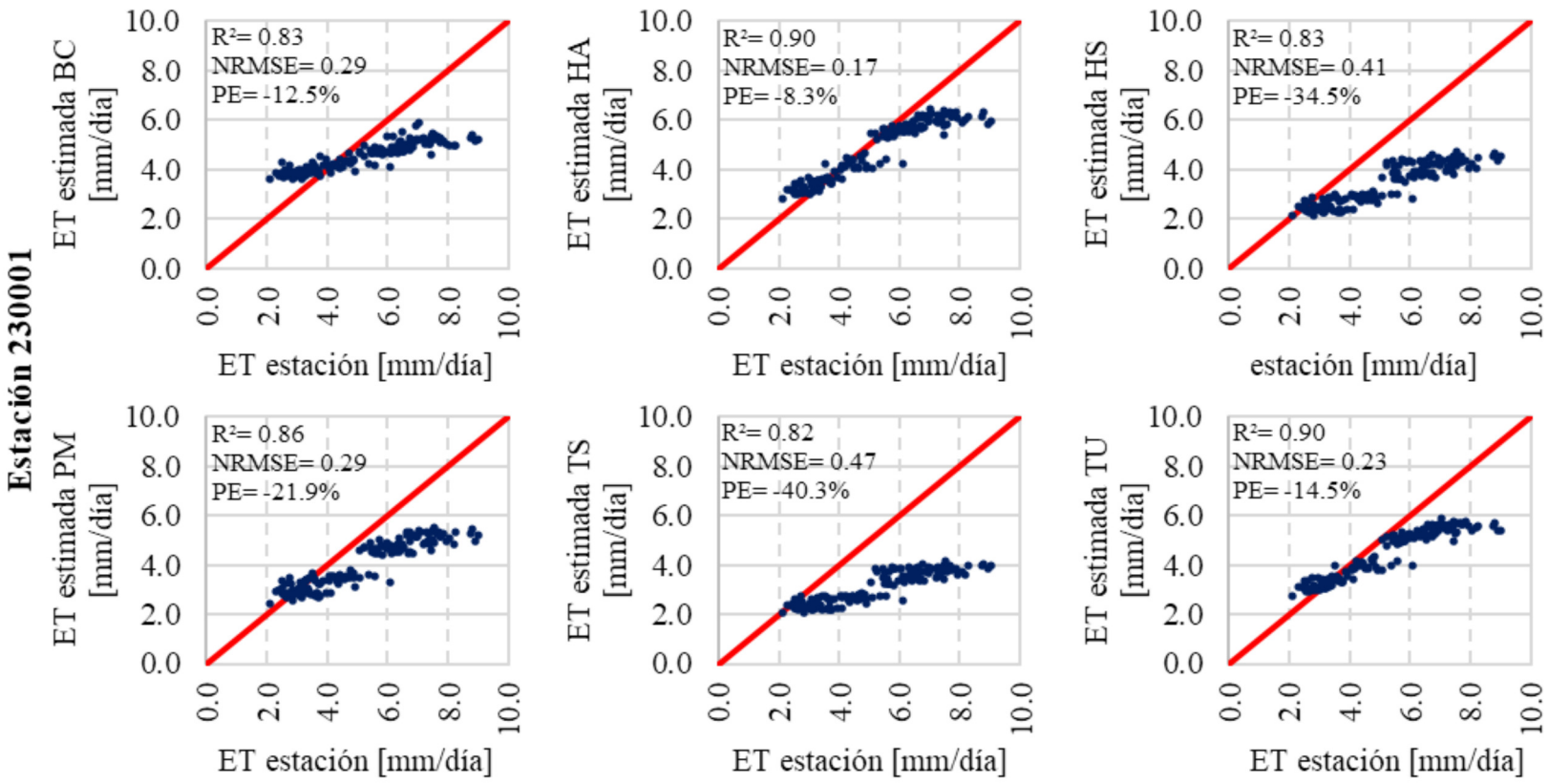


Figura 7.21: Evapotranspiración media diaria medida en comparación con ET estimada mediante los métodos BC, HA, HS, PM, TS y TU, en estación 230001.

La estación 290004 ubicada en la Región de Coquimbo, perteneciente a la zona norte chico (Znc) muestra valores extremos de menor magnitud en comparación con la estación 230001, con máximos en época estival de 6,0 mm/día y mínimas en invierno de 1,2 mm/día en promedio, realizando un análisis general de la gráfica en la Figura 7.20 es posible decir que las estimaciones obtenidas logran acercarse a las máximas, pero sobrestiman las ET mínimas. En relación con el ajuste de los métodos, todos muestran un coeficiente de determinación satisfactorio con R^2 superior a 0,87, además el PE indica una sobrestimación de los métodos presentando valores mayores a cero en todos estos. El método que presenta los mejores indicadores corresponde a TS con de acuerdo a la Tabla 7.1, mostrando un error porcentual de 0,6% y NRMSE 0,17, valores inferiores a los obtenidos por los otros métodos, indicadores similares tiene el método HS con PE 9,4% y NRMSE de 0,19 esto es posible observarlo en las gráficas de la Figura 7.22 donde se observa que la nube de puntos se encuentra alrededor de la recta de pendiente igual a 1 y levemente sobre esta misma, lo que indica la tendencia de los métodos a sobrestimar la ET. Se hace mención también que los dos métodos simplificados TS y HS, tienen un R^2 igual a 0,88 y 0,89 respectivamente. Las estimaciones de ET presentadas por TU y HA resultan parecidas en sus indicadores de ajuste y error con R^2 igual a 0,90 para ambos métodos y NRMSE de 0,21 y 0,24 respectivamente, respecto al error estadístico (PE) ambas metodologías en general sobrestiman el cálculo de la ET respecto a lo medido en la estación,

situación observable en la Figura 7.22 donde los puntos se ven en su mayoría sobre la línea roja, además siendo corroborado de acuerdo a la Tabla 7.1 donde PE es 15% y 19,3%. PM corresponde al método que presenta mejor ajuste R^2 de 0,91, sin embargo, el NRMSE alcanza valores de 0,3 y un sesgo porcentual de 26,4% indicando una sobrestimación en el cálculo de la evapotranspiración. El método BC es el que presenta el mayor error cuadrático (NRMSE igual a 0,38) y la más alta sobrestimación de los datos con índice PE igual a 29,5% que representa sobrestimación de los datos identificando la nube de puntos bajo la recta de pendiente 1, además se puede notar que los valores más altos de ET calculada resultan en subestimación, ya que estos se encuentran bajo la recta antes mencionada.

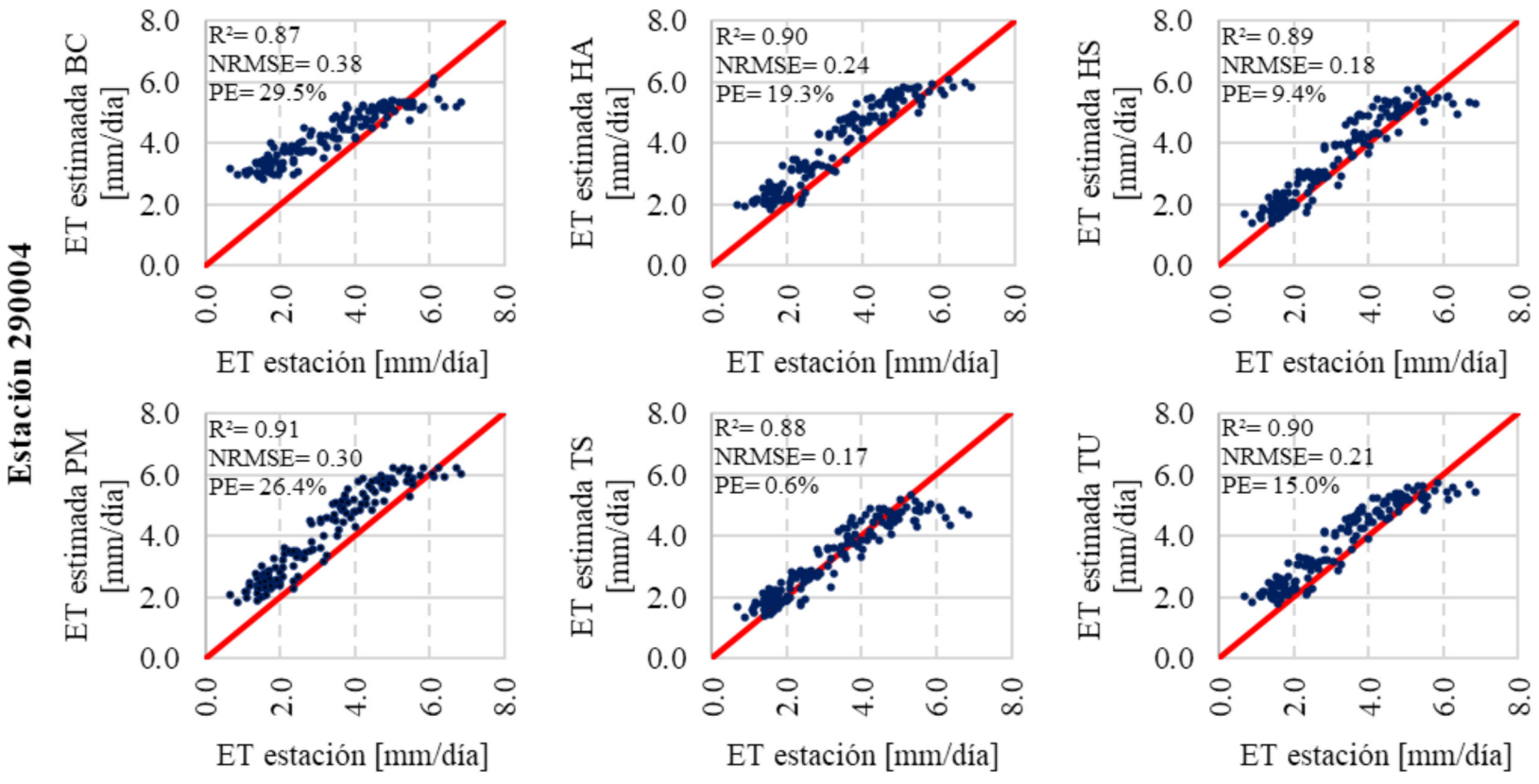


Figura 7.22: Evapotranspiración media diaria medida en comparación con ET estimada mediante los métodos BC, HA, HS, PM, TS y TU, en estación 290004.

La estación 330020 de la Región Metropolitana de Santiago correspondiente a la zona centro del país, que de acuerdo a la Figura 7.20 presenta valores máximos de ET en verano cercanos a 7,1 mm/día y mínimas alrededor de 0,7 mm/día en épocas invernales. De la misma ilustración antes mencionada se observa que las estimaciones tienen un comportamiento similar a lo medido, con excepción del método BC que presenta mínima diaria de más del doble. Respecto al ajuste de las metodologías de cálculo de ET, se puede decir que todas presentan un ajuste satisfactorio y con R^2 mayor que 0,93. En particular el método de mejor ajuste y menor error corresponde a HA con R^2 de 0,95 y NRMSE igual a 0,19, el error porcentual es 10,9% lo que

señala una sobrestimación de los datos que se corrobora con la gráfica de HA de la Figura 7.23, en que la nube de puntos se encuentra alrededor de la línea roja y en gran parte sobre esta. Otro método que presenta bajo error cuadrático medio es TS con 0,20 y PE de 10,5%, y muestra un R^2 de 0,95 igual que HA de acuerdo a lo indicado en la Tabla 7.1, según lo presentado en la gráfica de comparación de la Figura 7.23 se observa mismo comportamiento que el método HA. De igual forma TU y HS muestran una nube de puntos sobre la recta de pendiente 1, el coeficiente de determinación de ambos métodos es de 0,95 y el error porcentual indica sobrestimación del cálculo de ET con 13,5% y 14,7% respectivamente. El método PM tiene mismo ajuste que los demás métodos con un coeficiente de determinación de 0,95 y el error cuadrático es levemente superior al presentado por HS, sin embargo, este método presenta una desmejora en relación con el error relativo, con PE de 18% indicando sobrestimación en el cálculo. El método que peor se presenta en esta estación es BC tal como se observa en la Figura 7.20, la curva roja que representa la ET media diaria estimada mediante Blaney y Criddle no logra los valores mínimos de evapotranspiración medidos. Al revisar la gráfica de la Figura 7.23, se observa que la mayoría de los puntos están sobre la recta de pendiente 1, que corresponden a sobrestimaciones (valores mínimos sobrestimados) y una inferior cantidad de puntos se encuentran bajo esta recta, lo que implica que los valores máximos se han subestimado por el método, corroborado por el valor de los índices PE (24%) y NRSME (0,41).

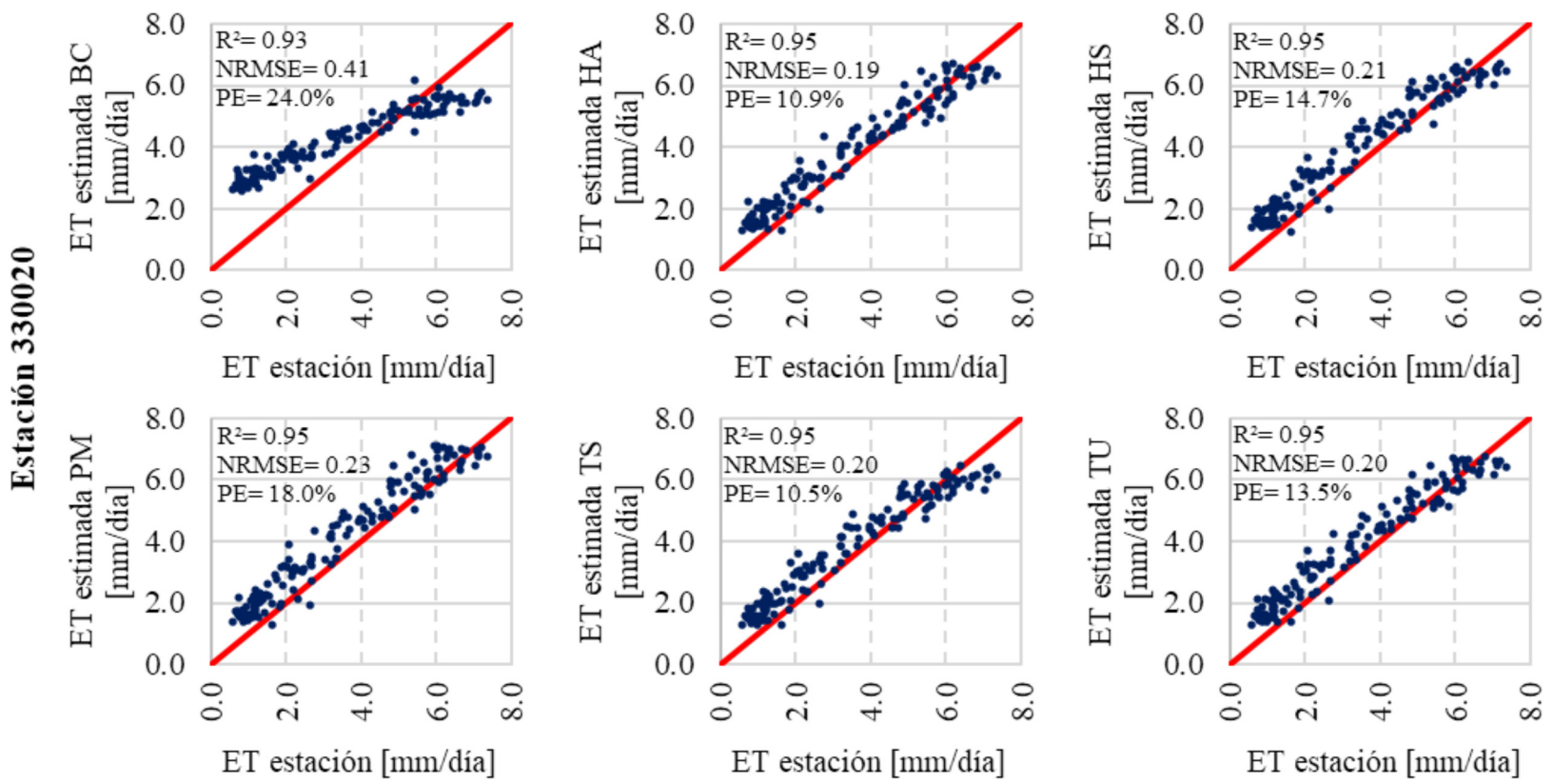


Figura 7.23:Evapotranspiración media diaria medida en comparación con ET estimada mediante los métodos BC, HA, HS, PM, TS y TU, en estación 330020.

Por otro lado, de acuerdo a la Figura 7.20 se observa que para la estación 360019 perteneciente a la Región de Ñuble (zona sur del país), la ET máxima medida se encuentra en torno a los 6,7 mm/día y la mínima 0,9 mm/día, también se observa que los distintos métodos tienen un comportamiento similar con excepción del método BC, donde los valores mínimos se encuentran cercanos a 2,5 mm/día y son más elevados que los medidos y estimados por las otras metodologías (valores en rango de 0,5 a 1,1 mm/día). Se destaca además que, existe falta de información en temporada invernal de los años 2006 y 2008, situación que podría incidir en el desempeño de los métodos estudiados. El método que mejor se desempeña en esta estación corresponde a TU, ya que de acuerdo con la Tabla 7.1 presenta un buen ajuste con R^2 igual a 0,92, bajo valor NRMSE de 0,17, bajo error porcentual igual a 2,5%. Además, de la gráfica de TU de la Figura 7.24 se observa que la nube de puntos se encuentra cercana a la recta, con puntos tanto sobre ella como por debajo, lo que se condice con los índices anteriormente expuestos. Una situación similar se observa en el método HA que presenta buenos indicadores, con R^2 y NRMSE similares a los obtenidos para TU. Respecto al PE, este indica una leve sobrestimación de la ET calculada. Lo anterior se puede ver reflejado en la gráfica HA de la Figura 7.24, donde observa que la nube de puntos en su mayoría se encuentra cercana a la recta de pendiente unitaria. Otro método que presenta un alto coeficiente de determinación es PM con R^2 de 0,92, sin embargo, el error cuadrático y error porcentual presentan una desmejora con NRMSE de 0,18 y PE 9,9%. Los métodos simplificados HS y TS muestran similar desempeño, con un coeficiente de determinación de 0,91 y 0,92. A diferencia del resto de metodologías, HS y TS presentan error porcentual negativo (-1,8% y -8,4% respectivamente) que indica una subestimación de la ET calculada. Respecto al indicador NRMSE de HS y TS, se obtienen valores cercanos al resto de las metodologías empleadas (excepto BC), tal como se observa la Figura 7.24. El método que peor ajuste presenta es BC, tal como se observa en la Figura 7.20 y Figura 7.24, donde se tiene que la curva a lo largo del tiempo no alcanza los valores extremos y la nube de puntos se aleja de la recta de pendiente 1 en datos extremos, implicando que los máximos se ven subestimados y mínimos sobrestimados. En el caso de los indicadores NRMSE, PE y R^2, se observa un peor desempeño respecto de los obtenidos para las otras metodologías, a pesar de lo anterior, se destaca que el valor obtenido para R^2 puede ser considerado satisfactorio (Lang et al., 2017).

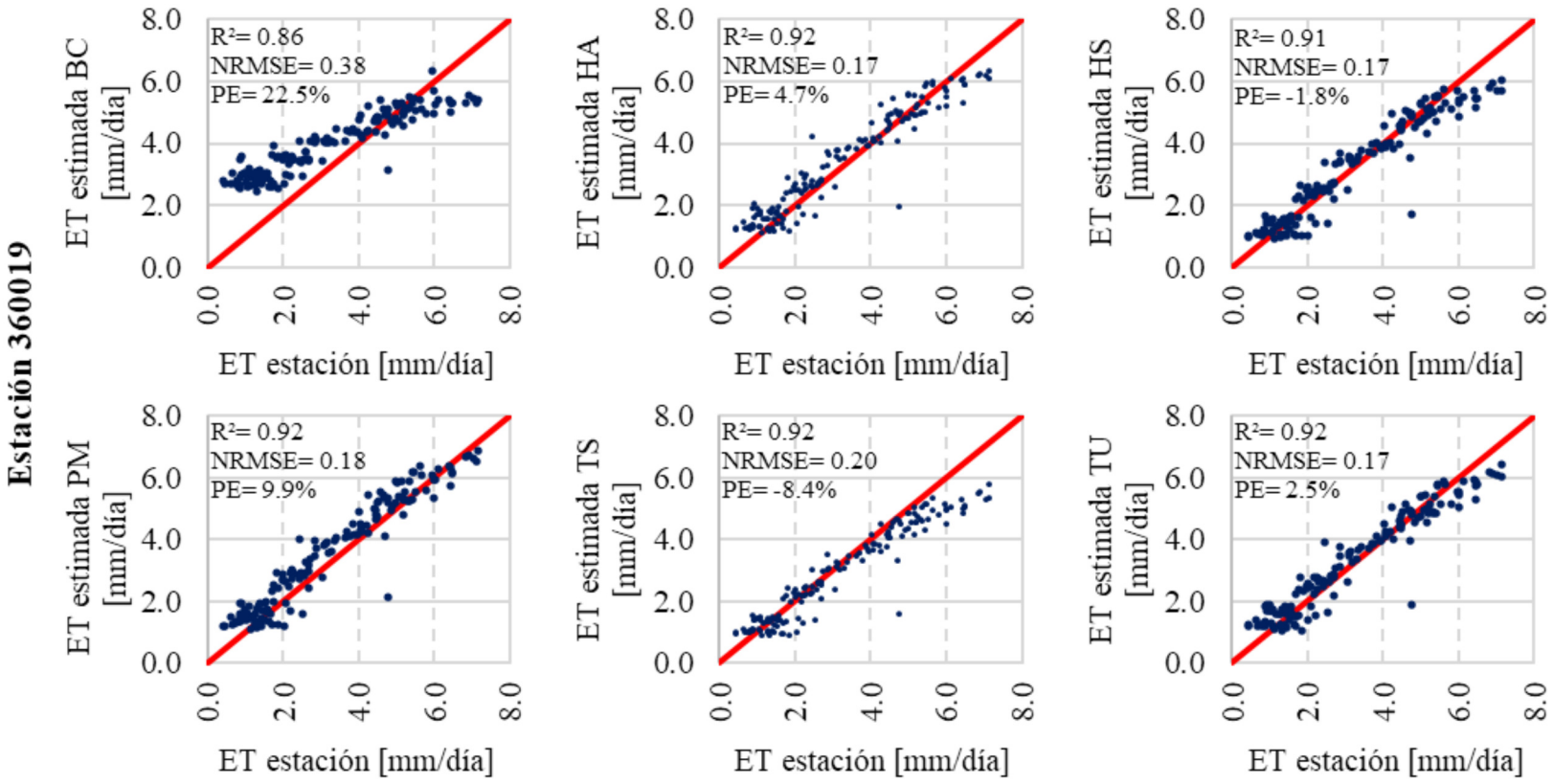


Figura 7.24: Evapotranspiración media diaria medida en comparación con ET estimada mediante los métodos BC, HA, HS, PM, TS y TU, en estación 360019.

Finalmente, se analiza la estación meteorológica 410005 que se ubica en la Región de Los Lagos al extremo sur de la ZS, misma zona que la estación 360019. Una observación general de la gráfica en la Figura 7.20 indica que las máximas se encuentran alrededor de 4,5 mm/día y las mínimas cercanas a 1,1 mm/día, pero se cuenta con registro de peaks alrededor de 6 mm/día para los años 2012 y 2014 valor superior a las máximas en promedio, también se comenta que esta estación tiene varios periodos sin información de datos entre los años 2004 y 2007 lo que podría provocar errores en el ajuste de los métodos. De acuerdo a lo presentado en la Tabla 7.1, HA corresponde a la metodología que muestra el mejor ajuste, con error porcentual de -0,6% y error cuadrático de 0,28, además muestra un coeficiente de determinación igual a 0,73. El método TU presenta mismo R^2 y NRMSE que HA, y un PE de mayor magnitud (-4,1%). Un desempeño similar muestra el método PM con R^2 de 0,74, además se observa una leve desmejora en los indicadores de error, con NRMSE igual a 0,29 y PE de 6,5%. Los métodos HA, TU y PM muestran gráficas parecidas, como se puede observar en la Figura 7.25, en las que la nube de puntos se ve cercana a la recta de pendiente unitaria, con algunos puntos más alejados de esta. Los métodos HS y TS muestran un desempeño levemente inferior, con R^2 de 0,71 y 0,72, y un error cuadrático de 0,31 y 0,29 respectivamente. Respecto al índice PE el método HS presenta 3,3% de sobrestimación y TS con -5,9% exhibe subestimación de la ET calculada, situación observable en las gráficas de la Figura 7.25, ya que la nube de puntos de HS se encuentra en su

mayoría sobre la recta, no así TS que muestra gran cantidad de puntos de ET mínimas y máximas por debajo de la recta de pendiente 1. El método BC muestra R^2 0,67 inferior al resto de los métodos e indicadores de error superiores, con NRMSE de 0,58 y PE de 49,7%, la magnitud del error porcentual puede ser observada también en la Figura 7.25, ya que la mayoría de los puntos se encuentran sobre la recta y alejándose de esta. Haciendo un análisis de la gráfica de evapotranspiración de la Figura 7.20, se puede decir que, existe incertidumbre en los datos medidos. Se observan anomalías en el registro de estos datos, que no se condicen con el comportamiento cíclico de la variable ET, que por su naturaleza los máximos se presentan en temporada estival donde se tienen altas temperaturas y las mínimas en épocas invernales donde la temperatura disminuye al igual que la radiación (ver Figura 3.1). Esta situación va en desmedro de un correcto análisis de los métodos estudiados, ya que por ejemplo la ET medida en temporada de invierno del año 2007 es superior a la registrada en verano en el mismo año, escenario que favorece al ajuste del método pero de manera equívoca, como sucedería con BC por ejemplo, disminuyendo el error entre estos datos y aumentando la diferencia con otros métodos que estiman valores inferiores para temporadas frías, esto podría explicar en cierta manera un aumento en el error cuadrático medio (NRMSE), una disminución de R^2 de todos los métodos y una alta dispersión de datos en la nube de puntos, como se puede observar en las gráficas de la Figura 7.25.

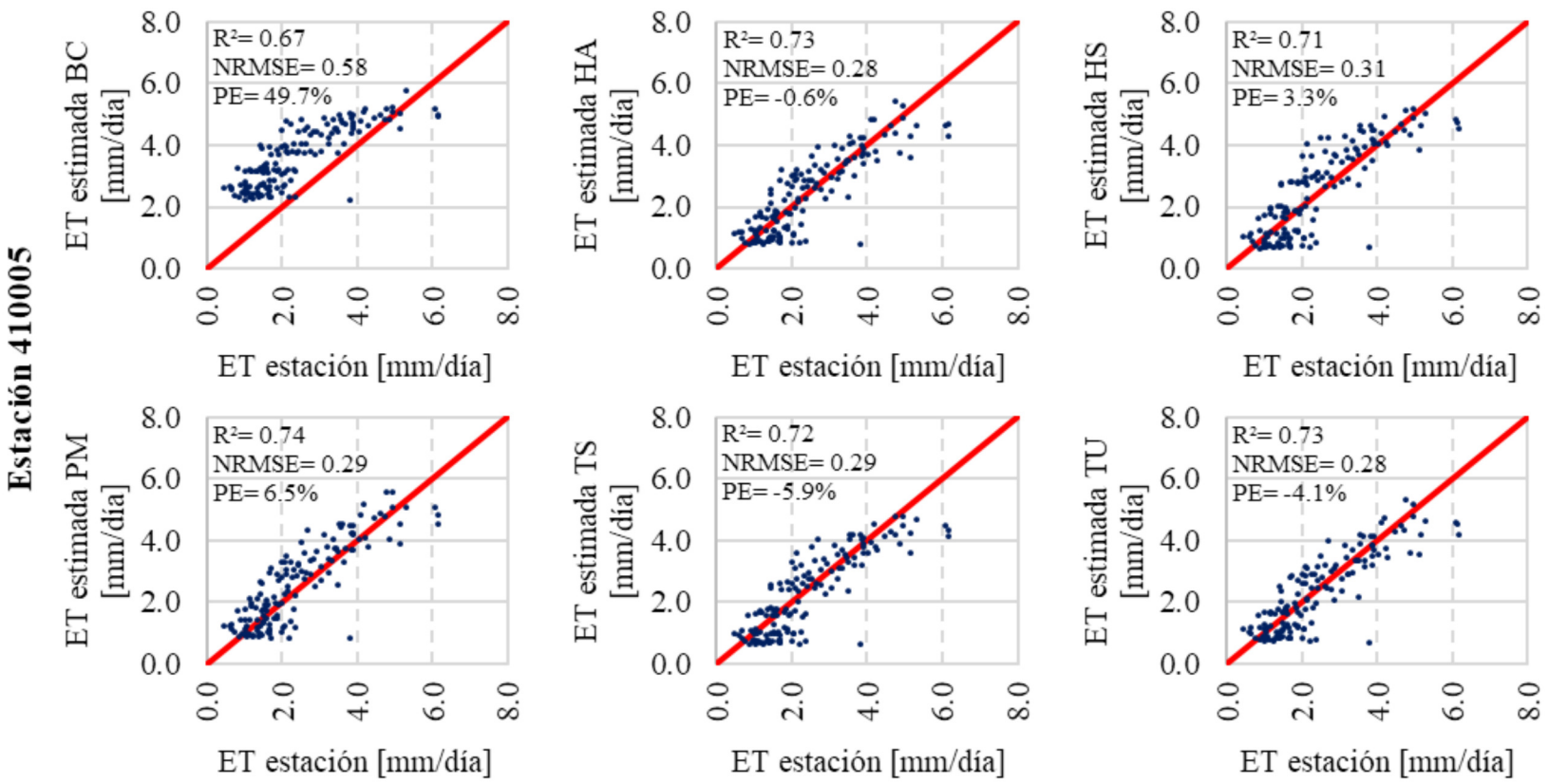


Figura 7.25: Evapotranspiración media diaria medida en comparación con ET estimada mediante los métodos BC, HA, HS, PM, TS y TU, en estación 410005.

8. DISCUSIÓN

Para resolver en detalle las discrepancias entre los resultados obtenidos utilizando productos CR2MET y estadística de estaciones, presentadas en el acápite 7.3, es necesario evaluar las diferencias que existen entre los datos de temperatura de productos grillados CR2MET versus los datos de las estaciones meteorológicas. La Tabla 8.1 muestra el error porcentual o PE, como indicador del sesgo de los datos grillados respecto a la estadística de estaciones. Se presenta como subestimación los valores porcentuales negativos y sobrestimación los valores positivos, siendo el óptimo el valor 0.

Tabla 8.1. Sesgo de los datos de productos grillados CR2MET en comparación con estadística de Estaciones Meteorológicas, de temperatura media, amplitud térmica y temperaturas extremas.

Estación Código Nacional	$\mathbf{PE} = \frac{\sum(Y_{CR2MET} - Y_{Estación})}{\sum Y_{Estación}} * \mathbf{100}$ [%]			
	PE CR2MET de Temperatura media	**PE CR2MET de Amplitud Térmica (TR)**	**PE CR2MET de Temperatura mínima**	**PE CR2MET de Temperatura máxima**
200006	5,35	60,01	-1,73	10,98
220002	-2,48	7,82	-21,36	1,57
230001	9,26	94,52	-4,46	19,64
290004	10,96	77,14	-9,09	23,44
320041	4,85	49,42	-15,23	15,41
320051	33,29	49,58	7,56	39,48
330007	-2,84	72,65	-28,05	12,28
330019	-9,42	16,51	-24,17	-2,52
330020	-5,03	11,54	-16,57	-0,21
330021	-0,13	0,62	-0,77	0,11
330030	7,46	68,96	-16,18	20,83
330077	68,86	80,73	56,22	72,90
330111	4,90	50,77	-17,36	16,19
330112	-3,59	-14,50	7,80	-7,27
330113	1,24	6,07	-2,83	2,75
340031	-5,09	25,33	-21,44	2,79
360011	-5,01	20,90	-20,46	2,04
360019	4,71	26,82	-6,69	10,32

Estación Código Nacional	$\mathbf{PE} = \frac{\sum(Y_{CR2MET} - Y_{Estación})}{\sum Y_{Estación}} * \mathbf{100}$ [%]			
	PE CR2MET de Temperatura media	**PE CR2MET de Amplitud Térmica (TR)**	**PE CR2MET de Temperatura mínima**	**PE CR2MET de Temperatura máxima**
360042	-4,89	56,13	-41,57	11,76
370033	-5,72	14,36	-18,01	-0,20
380013	2,42	6,27	-0,96	3,64
380029	6,66	9,99	3,72	7,73
390006	-3,93	26,28	-18,74	3,54
400009	-4,44	22,28	-18,66	2,45
410005	3,83	13,52	-2,46	6,56
420004	-5,52	35,66	-18,32	2,38
420014	5,25	47,00	-13,40	15,10
430002	-16,56	55,71	-58,24	2,80

En este acápite se pretende evaluar el comportamiento de los distintos métodos a partir de las diferencias que existe en sus forzantes de entrada, relacionadas con la temperatura. El método de mayor simplicidad respecto a esta variable es BC, que utiliza la temperatura media como variable principal. De la Tabla 8.1 se desprende que, existe tanto subestimación como sobrestimación de la T_{media} de CR2MET en comparación con los datos medidos de las estaciones meteorológicas, lo que implica un grado de subestimación y sobrestimación de la ET calculada mediante BC, aseveración comprobable si se observa la Figura 7.9 en el mapa BC, información que además se complementa con la Figura 8.1, que muestra una gráfica de dispersión, en que los datos de temperatura media medida en estación corresponden a la ordenada y los datos de temperatura media del CR2MET a la abscisa. En general se observa un comportamiento homogéneo, lo que se traduce en una sobrestimación o subestimación relativamente baja del orden de $\pm$10%, exceptuando las estaciones 320051 y 330077, en las que se observa que la mayoría de los puntos se alejan de la recta de pendiente unitaria. De acuerdo a lo presentado en el capítulo 7.3, HA presenta bajo error porcentual en la comparación entre estimación de ET mediante CR2MET y estadística de estaciones, información que se condice con lo anterior expuesto, ya que el error entre las temperaturas medias es relativamente bajo. Sin embargo, el error en la estimación se ve abultado, debido a que en la fórmula de HA participa

otra variable, como la duración real de insolación (n) y las constantes a_s y b_s explicadas en la ecuación (15), datos que otorgan mayor incertidumbre a las estimaciones. La metodología de Turc (TU) corresponde a la tercera en el orden de magnitud de error, su fórmula además de la temperatura media, requiere información de radiación, donde intervienen las constantes a_s, b_s y la variable n, se incorpora la variable humedad relativa, que para el caso de la estimación de ET mediante productos grillados se calcula utilizando datos de temperatura mínima y media, y la estimación de ET a través de estadística de estaciones utiliza la HR medida en la estación, esto puede acentuar la magnitud del error en la comparación de las estimaciones de CR2MET vs estadística de estaciones meteorológicas. A continuación, se tiene PM, que es el método que involucra la mayor cantidad de variables en comparación con las otras metodologías, ya que incluye forzantes de temperatura máxima, mínima y media, junto con la humedad relativa y viento, que se ven comparadas con las medidas en las estaciones meteorológicas. Estas variables le otorgan a la estimación de la ET mayor incertidumbre, que en este caso genera un PE más alto que los métodos anteriores, a pesar de existir una subestimación de la temperatura de los productos CR2MET en algunas estaciones, se produce en general una sobrestimación de la evapotranspiración calculada. Esta situación podría verse favorecida por diferencias en las variables viento y humedad relativa, la primera es obtenida a través del Explorador Solar y la segunda es estimada con las ecuaciones (9) y (10), en comparación con estadística de viento y humedad relativa medida en las estaciones meteorológicas. Finalmente se tienen los métodos simplificados (HS y TS), que si bien quitan de sus cálculos la incertidumbre que pueda introducir la nubosidad o en su defecto las horas reales de insolación (n), incluyen en su cálculo la amplitud térmica (TR), que como se observa en la Tabla 8.1 es sobrestimada en gran medida para casi todas las estaciones meteorológicas, independiente de la zona en que se encuentre, obteniendo para la estimación de la ET mediante CR2MET un mayor error porcentual que el resto de metodologías. El PE de la TR se observa esquemáticamente en la Figura 8.2, que corresponde a la gráfica de dispersión de los datos de amplitud térmica calculada con las temperaturas extremas medidas en estación y la amplitud térmica calculada con los datos de temperatura máximas y mínimas del CR2MET.

En consecuencia, un mejor ajuste entre la estadística de temperaturas extremas de los productos grillados CR2MET y las registradas en estaciones meteorológicas entregará mejores estimaciones de evapotranspiración en los métodos estudiados.

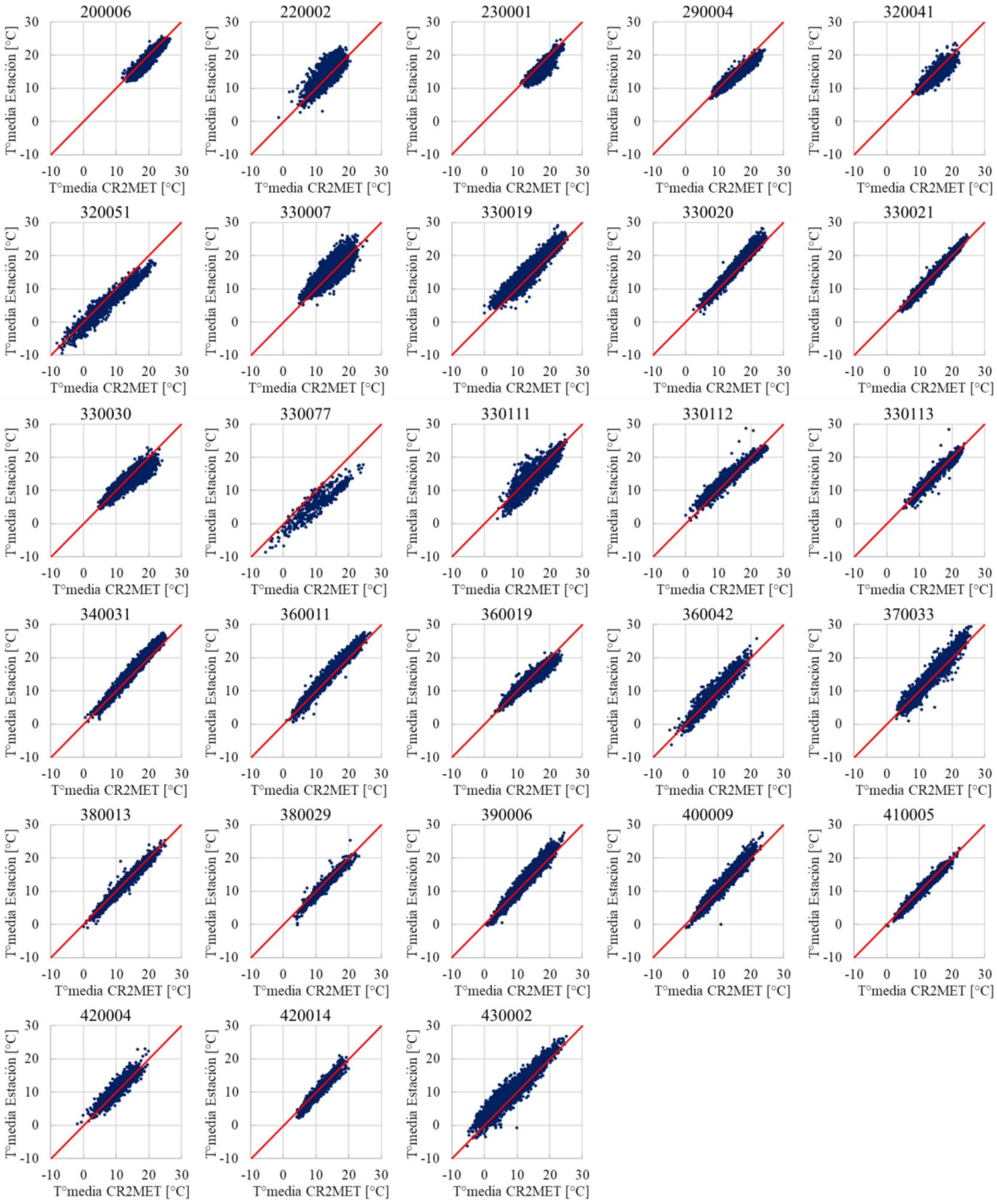


Figura 8.1: Gráfica comparativa de temperatura media diaria de estación meteorológica versus temperatura media diaria CR2MET, para cada estación.

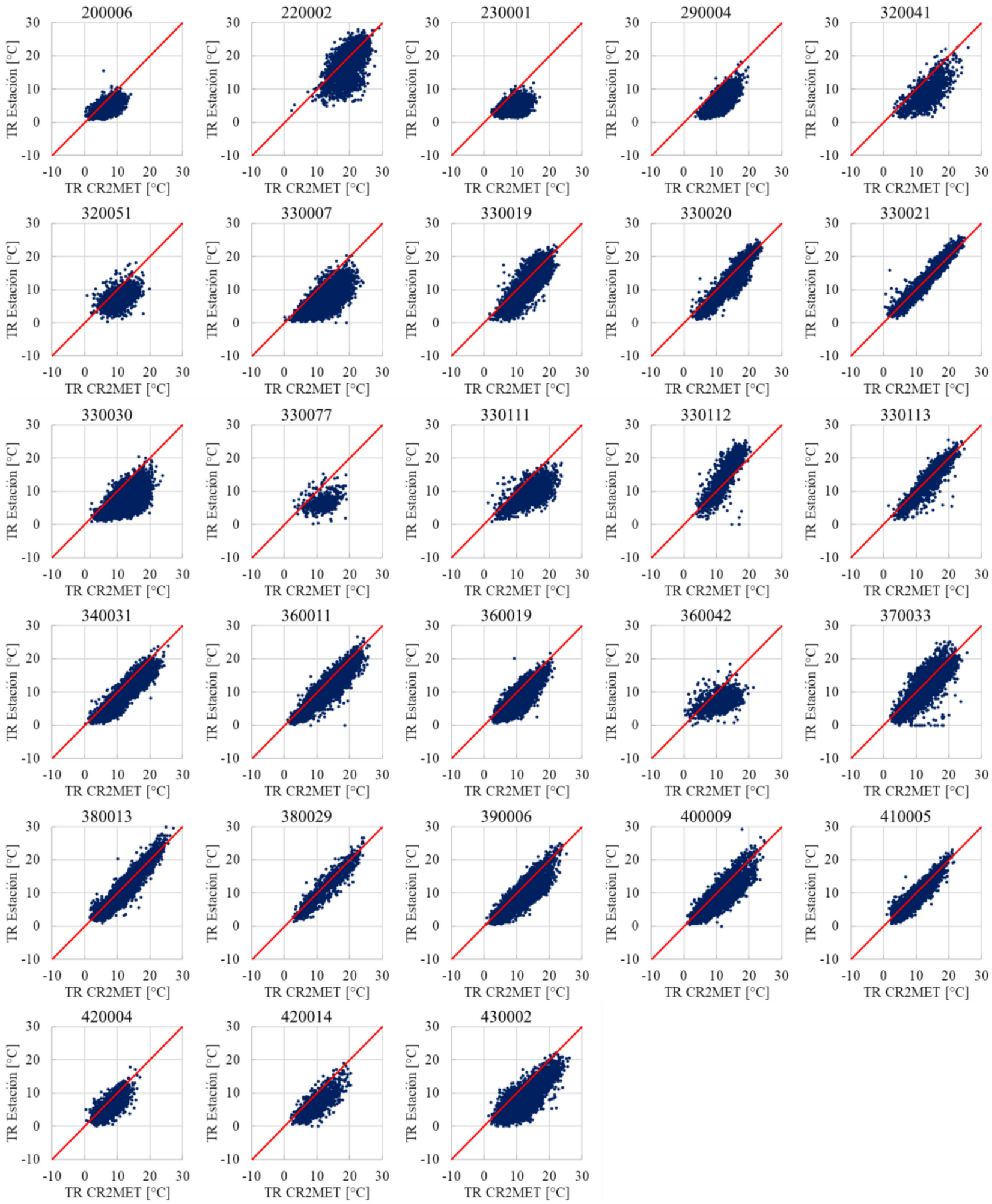


Figura 8.2: Gráfica comparativa de amplitud térmica de estación meteorológica versus amplitud térmica CR2MET, para cada estación.

Para una mayor comprensión del comportamiento antes descrito, se ha revisado en mayor detalle los resultados obtenidos para la estación 330077, que corresponde a una estación con elevados valores de PE, ver Tabla 8.1. Estos errores porcentuales, en estimación de la ET, se deben a una sobrestimación de los productos CR2MET respecto de la estadística de estaciones, generando diferencias en la estimación de ET. En la Figura 8.3 se muestra la ET diaria estimada mediante productos grillados y estadística de la estación. Se observa que BC y HS presentan una diferencia importante en la estimación de ET en la estación 330077, siendo aquella estimada mediante productos CR2MET más elevada que la estimada con datos de estación meteorológicas. Esto se debe exclusivamente a la diferencia en la temperatura máxima y mínima diaria entre ambas fuentes de información, ya que a partir de estas se determina la temperatura media y la amplitud térmica, que corresponden a las variables meteorológicas utilizadas por estos métodos.

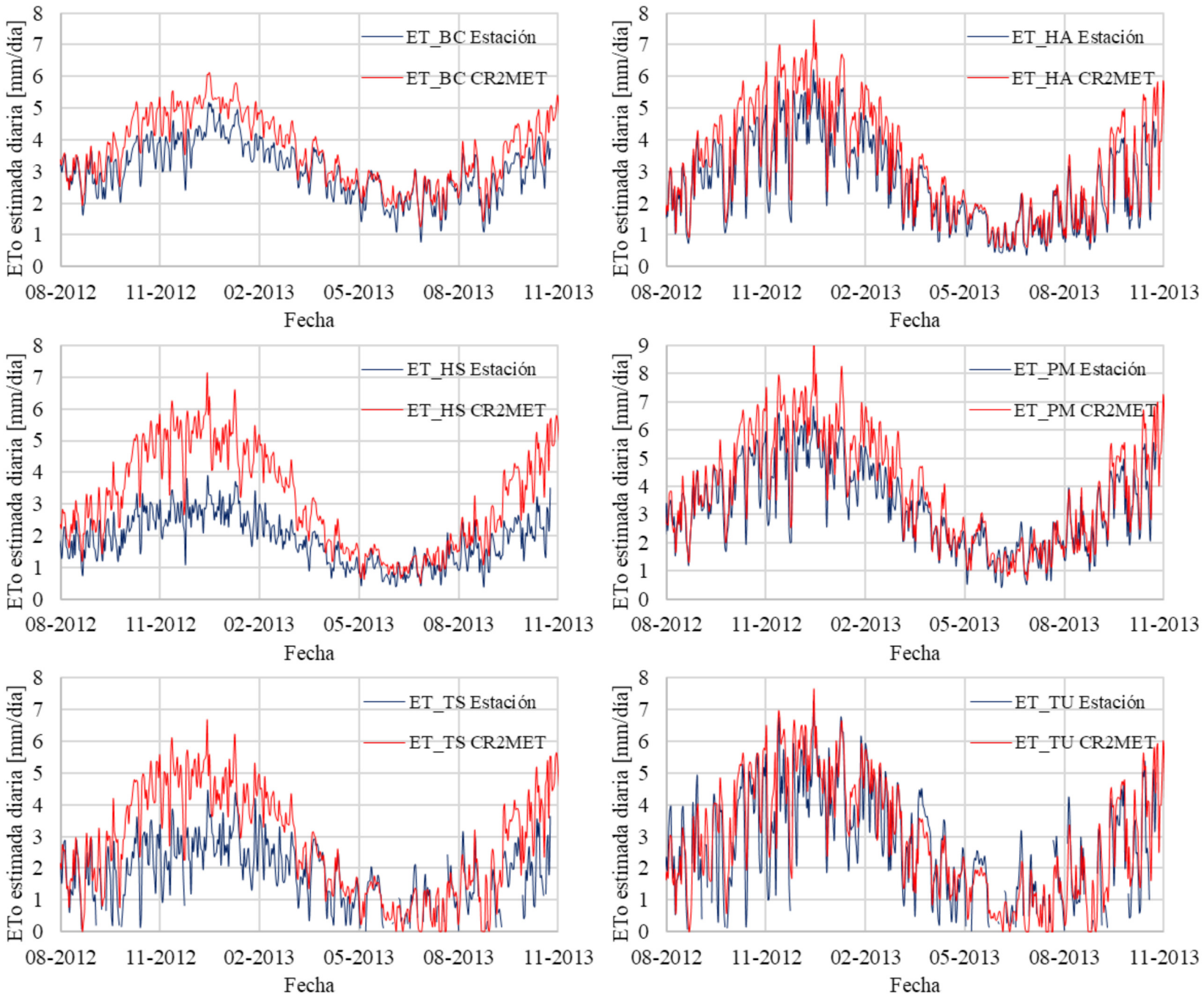


Figura 8.3: Evapotranspiración diaria en la Estación 330077, estimada mediante productos grillados CR2MET y estadística de la Estación Meteorológica.

De acuerdo con lo señalado en 5.4.2, la estimación de la evapotranspiración del producto MODIS16A3GF corresponde a un algoritmo basado en la lógica del método Penman Monteith, en el que se conjugan otros productos MODIS, de cobertura de suelo, índice de vegetación, albedo entre otros. Esta metodología no calcula la evapotranspiración cuando el producto de cobertura muestra celdas de suelos estériles o vagamente vegetados, lo cual explica la notoria ausencia de valores válidos de ET en la ZN. Además, no presenta datos de evapotranspiración en cuerpos de agua, como por ejemplo ríos y lagos, tal como se observa en la Figura 7.14. Al analizar los resultados obtenidos en el acápite 7.4 se desprende que para las zonas norte y norte chico la metodología PM es la que mejor desempeño tiene con el menor error porcentual, y en general muestra un error porcentual inferior a -60% en todas sus celdas, presentando una subestimación en el cálculo mediante productos grillados. La zona centro del país es mejor representada por los métodos BC y PM con errores porcentuales de menor magnitud que el resto de las metodologías, ambas presentan sobre un 95% de celdas en el rango de 0 a -50% de error porcentual subestimando el cálculo de la evapotranspiración. Para la zona sur el método BC es el que menor error porcentual presenta en comparación con las otras metodologías en la misma zona, el 56% de celdas muestra sobrestimación y 44% subestimación. Finalmente, la ZA muestra que el método HA corresponde a la metodología con mejor desempeño, su histograma presenta la mayoría de las celdas con bajo error porcentual, sobre el 83% de estas se encuentran en el rango de 30% a -30% de error.

Resultaría esperable que la metodología de Penman Monteith presentara un mejor desempeño que los demás métodos al ser comparados con las imágenes MODIS, ya que estas últimas resultan de un algoritmo basado en la misma metodología. Sin embargo, de los resultados presentados en 7.4 se observa que las estimaciones de ET obtenidas mediante el método PM muestran el mejor desempeño en las zonas norte, norte chico y centro, y para las zonas sur y austral son otras metodologías como BC y HA las que presentan un mejor desempeño, en comparación con el mostrado por PM. Esto podría ocurrir por las diferencias existentes en la base estadística utilizada en este estudio, que proviene de fuentes distintas a las ocupadas por el producto MODIS, como lo son los productos grillados CR2MET, y la estadística de viento y nubosidad del Explorador Solar. O bien por las diferencias que existen entre la formulación de MODIS (MOD16 User’s Guide, Running et al., 2019) y el método utilizado en este estudio, ver ecuación (1).

De acuerdo las gráficas mostradas en la Figura 7.20 en el capítulo 7.5, se observa que la evapotranspiración medida en las cinco estaciones presenta un comportamiento cíclico de forma anual, en que las máximas ocurren en enero y las mínimas alrededor del mes de julio, y que los métodos de estimación utilizados representan este comportamiento. Realizando un análisis al desempeño de las metodologías de cálculo de la ET, se puede decir que para estación 230001 el método de Hargreaves presenta el mejor ajuste de acuerdo a los tres indicadores (R^2, NRMSE y PE). En la estación 290004 no existe una metodología que sea predominante en sus indicadores, sin embargo, Turc Simplificado es la que presenta menores valores de NRMSE y PE, a pesar de que su índice R^2 sea inferior que otros métodos sigue siendo un ajuste satisfactorio (0,88). La estación 330020 presenta un buen ajuste en todas sus metodologías ($R^2 \geq 0,93$), y Hargreaves es la que mayor R^2 tiene, a su vez menor valor de NRMSE y un PE que considerado bueno (Lang et al., 2017). En la estación 360019 los métodos HA, PM y TU muestran un coeficiente de determinación igual a 0,9, siendo Turc el que tiene menores valores tanto en NRMSE como PE, presentando el mejor ajuste. Finalmente, la estación 410005 el método que mejor desempeño y ajuste presenta es Hargreaves con PE de -0,6%, R^2 0,73 y NRMSE 0,28. Cabe destacar que el método Blaney y Criddle muestra el peor desempeño, en comparación con las otras metodologías, en todas las estaciones con excepción de la estación 230001, perteneciente a la ZN.

Resulta relevante notar que en las estaciones 360019 y 410005 pertenecientes a la ZS, se observan datos medidos que se encuentran fuera de la tendencia anual, es decir, se tiene valores de ET altos en épocas invernales y magnitudes de ET baja en época estival, como se puede observar en la gráfica de la estación 360019 en la Figura 7.20 que luego de 2 meses sin medición en junio y julio del año 2006, el mes de agosto del mismo año muestra ET de 4,8 mm/día lo que corresponde a valores que se presentan en los meses de diciembre, enero o febrero del mismo año, situación similar ocurre en con la estación 410005, en el mes de junio del año 2007 en que la ET alcanza un valor de 3,8 mm/día incluso superior a lo mostrado para la época estival del mismo año, además se tiene que para la misma estación en el año 2012 el mes de diciembre toma un valor de ET igual a 2,2 mm/día que es inferior al resto de datos de la misma temporada. Estos valores incoherentes en las mediciones pueden arrastrar un mayor error en la comparación con las metodologías de estimación de evapotranspiración.

A continuación, se presenta una tabla que resume los mejores desempeños mostrados por las distintas metodologías mediante el uso de productos grillados CR2MET en comparación con datos ET de MODIS y con estadística de ET de las Estaciones.

Tabla 8.2. Resumen de mejores desempeños presentados por los métodos de acuerdo a cada zona natural, según comparación de ET CR2MET con ET MODIS y ET de Estaciones.

Zona Natural	ET CR2MET v/s ET MODIS	ET CR2MET v/s ET Estación
ZN	PM	HA
Znc	PM	TS
ZC	BC	HA
ZS**	BC	TU
		HA
ZA***	HA	-

**La zona sur (ZS) presenta un mejor desempeño con el método TU en estación 360019 y HA en 410005.
***Zona austral (ZA) no contiene estaciones con información de evapotranspiración medida.

De acuerdo a la tabla Tabla 8.2, y los resultados obtenidos en los capítulos 7.4 y 7.5, no existe un mismo método que presente un mejor ajuste para la ET de MODIS y ET de Estaciones, como ejemplo se expone que en la zona norte el mejor desempeño lo presenta Penman Monteith comparando ET de CR2MET con el producto MODIS, y la estación 230001 perteneciente a la misma zona muestra un mejor desempeño con el método Hargreaves, condición de discrepancia que se repite en las otras zonas naturales con excepción de la ZA, ya que no existe estación con estadística robusta de evaporación de bandeja en los años estudiados (2004-2016). Esto puede deberse a que existe una falta de representatividad de los datos de estaciones, ya que los resultados obtenidos de la comparación entre ET mediante productos CR2MET y ET de MODIS, abarcan todas las celdas en las que se cuenta con información y la comparación con las estaciones es únicamente puntual del lugar donde se ubica la estación meteorológica, que además como se observó anteriormente, la estadística recopilada en la estación puede traer consigo errores en las mediciones que afectan directamente el ajuste de los métodos. Dicho esto, no es posible indicar de forma concluyente que aquellos métodos con mejor ajuste para las estaciones meteorológicas, presentados en la Tabla 8.2, sean los adecuados para la zona natural en la que se encuentra la estación, ya que para esto sería necesario contar con una mayor densidad de estaciones en cada zona natural que presenten registro de evapotranspiración.

9. CONCLUSIONES

En el presente estudio se han elaborado mapas de evapotranspiración para todo Chile continental para diferentes escalas temporales, utilizando 6 diferentes métodos de estimación, explicados en el capítulo 3, y distintas bases estadísticas, como lo son los productos grillados de temperatura del CR2MET, la información de viento y nubosidad del Explorador Solar y los productos MODIS de albedo y PET, además de estos se cuenta con estadística de la red de estaciones meteorológica disponible en la Dirección Meteorológica de Chile. También se han realizado análisis y comparaciones de estos resultados, que fueron expuestos tanto en el capítulo 7.3 como en el capítulo 7.4 y 7.5.

Mediante la información estadística de productos grillados presentada como base de este estudio, se ha estimado la evapotranspiración acumulada anual para todo el país, cálculos realizados a través de las metodologías Blaney y Criddle (BC), Hargreaves (HA), Hargreaves simplificado (HS), Penman Monteith (PM), Turc simplificado (TS) y Turc (TU), para cada uno de los años del periodo 2004 a 2016 y generando a partir de estas estimaciones mapas de evapotranspiración media anual, que fueron presentados en 7.1. En general las metodologías implementadas tienen un comportamiento similar, es decir, con valores máximos en la zona norte y disminuyendo hacia la zona sur y austral del país. Se hace relevante destacar que los métodos Turc y Turc simplificado están restringidos en su cálculo, ya que se limitan al uso de temperatura media superior a -15°C, lo que significa que los resultados en la zona austral y parte de la zona norte altiplánica se encuentran condicionados a esto, obteniendo celdas vacías en los mapas de estas metodologías. También han sido calculados mapas a escala temporal de estación climática y mensual, realizando una observación de los primeros se aprecia el mismo comportamiento antes mencionado, donde los valores máximos se encuentran al norte y los mínimos al sur del país. Se desprende de estas imágenes que las estaciones de otoño e invierno (temperaturas frías) presentan menor magnitud de evapotranspiración en comparación con las estaciones de primavera y verano, que se consideran más cálidas. De los mapas que muestran evapotranspiración mensual acumulada se nota un comportamiento similar, en lo relacionado con la ubicación geográfica, en que se tienen los mayores valores de ET en el norte y disminuyendo su magnitud hacia el sur. Además, las estimaciones mensuales de los meses fríos se condicen con las estaciones de otoño e invierno, de igual forma ocurre con los meses de octubre a marzo (más cálidos) que muestran similar distribución espacial de ET que las temporadas primavera y verano.

Otro trabajo realizado en este estudio fue la recopilación de estadística de estaciones meteorológicas, mediante la cual fue posible calcular la evapotranspiración a través de los 6 métodos expuestos en capítulo 3, y elaborar gráficas de estimaciones anuales, estacionales y mensuales, presentadas en el acápite 7.2. Estas estaciones meteorológicas se encuentran distribuidas a lo largo del país, en la zona norte (3), zona norte chico (1), zona centro (12) y en la zona sur (12), no existiendo estaciones meteorológicas con estadística suficiente en la zona austral. Para las estimaciones anuales, se pudo calcular la evapotranspiración acumulada para todas las estaciones con excepción de las estaciones 330077, 330112 y 360042 ya que no se cuenta con estadística completa en ningún año del periodo estudiado, por lo que no pudieron ser representadas. En este análisis se destacó que el método PM presenta valores superiores de ET en las zona norte, norte chico y centro, en comparación con los otros 5 métodos. Y el método Blaney y Criddle se muestra constante en todas las estaciones de la zona sur, en general con valores superiores a los demás métodos. Se han elaborado gráficas de evapotranspiración acumulada para las temporadas de otoño, invierno, primavera y verano, en ellas se observa una clara tendencia, mostrando magnitudes de ET menores en invierno y mayores valores en verano, que consecuentemente son las estaciones del año con temperaturas más bajas y más altas respectivamente. Los 6 métodos tienen un comportamiento similar en otoño e invierno, sin embargo, a medida que pasa a la temporada de mayores temperaturas se observa una mayor variabilidad de los datos, mostrando valores más altos en las diferentes estaciones meteorológicas. Los resultados obtenidos para la escala mensual tienen directa relación con los conseguidos para las estaciones del año, es decir, los meses de abril a septiembre se condicen con el comportamiento de la temporada de otoño-invierno y lo mismo ocurre con los meses de octubre a marzo y el periodo primavera- verano.

Con los resultados precedentes se procedió a realizar una comparación de las estimaciones de evapotranspiración obtenidas mediante productos grillados con las obtenidas mediante estadística de estaciones meteorológicas. Esto se efectuó calculando el error porcentual, de esta manera analizar si es que existe una sobrestimación o subestimación de los resultados estimados respecto al valor observado, en este caso se ha tomado como valor estimado lo obtenido a través de productos grillados y el valor observado los resultados de la estadística de estaciones. El análisis de la evapotranspiración anual acumulada entrega que el método Blaney y Criddle presenta la menor magnitud en error porcentual en un rango de 6% a -9%, a continuación

se tiene que Hargreaves tiene un rango de error que va de 12% a -5%, luego Turc que aumenta el rango de error de 14% a -10%, siguiendo con el método Penman Monteith que acrecienta el rango de error porcentual tomando valores de 22% a -17% y corresponde al método que en mayor medida subestima el cálculo de la ET, continuando se tiene que el método de Hargreaves simplificado tiene errores porcentuales dentro del rango de 45% a 0% indicando sobrestimación de los resultados obtenidos a través de productos grillados por sobre todas las estaciones meteorológicas, finalmente se tiene que Turc simplificado mostrando un rango de error porcentual de 47% a -7%, y en su mayoría se presentan sobrestimaciones del cálculo de ET con productos CR2MET. Además, se destaca que Penman Monteith es el método que mayor cantidad de variables involucra en su cálculo, comparando temperaturas de CR2MET, viento y humedad relativa con las observadas en las estaciones meteorológicas, y a pesar de que una mayor cantidad de variables puede generar mayor error, los métodos simplificados presentan errores de mayor magnitud que PM. Realizando el análisis de la evapotranspiración estacional acumulada, se observa un panorama similar al mostrado en el caso anual, ya que, para las cuatro estaciones del año, los métodos de Blaney y Criddle, Hargreaves y Turc muestran el menor error porcentual de estimación. El método Penman Monteith, muestra en general una subestimación y sobrestimación para las zonas naturales norte, norte chico y centro y sobrestimación en la zona sur. Los métodos simplificados de Hargreaves y Turc continúan teniendo un peor desempeño comparando con su símil de estadística proveniente de estación meteorológica, se puede observar mayores valores de error porcentual en la zona norte y centro, que en este caso se traduce en mayor sobrestimación de la evapotranspiración. Esto se puede explicar por la diferencia que existe entre la estadística de temperaturas extremas de los productos grillados y las medidas en estaciones meteorológicas, que se traduce en una sobrestimación de la temperatura media y la amplitud térmica de CR2MET en comparación con datos medidos en estación.

También fue posible realizar una comparación de las estimaciones de evapotranspiración mediante productos grillados y las presentadas por el producto MODIS, en este caso se realizó para estos efectos el cálculo de error porcentual, en que se consideró como dato observado aquel obtenido del producto MODIS y como valor estimado la evapotranspiración obtenida con los distintos métodos y la estadística proveniente de productos grillados. De los resultados se observa que se tiene un comportamiento similar en las zonas norte, norte chico y centro, en general se muestra subestimación en el cálculo de ET con error porcentual de magnitudes entre -20 y -80%,

tendiendo a la disminución hacia el sur. En la zona sur el método BC presenta sectores de subestimación y sobrestimación en partes similares, y el resto de las metodologías muestran menores valores de evapotranspiración que el producto MODIS de ET, lo que significa una subestimación que toma valores máximos del orden de -50%. En la zona austral, Blaney y Criddle es el método que presenta mayor valor de error porcentual, con magnitudes que exceden el 100% de sobrestimación, las metodologías Penman-Monteith, Hargreaves y Hargreaves simplificado presentan un comportamiento similar entre ellas, mostrando que hacia el este (en frontera con Argentina) se subestima el cálculo y hacia el oeste en límite con el océano Pacífico se ve sobrestimación de la ET. Las metodologías Turc y Turc simplificado presentan en general subestimación en la región de Aysén, sin embargo, resulta imposible realizar una evaluación de su comportamiento respecto a la ET de MODIS por completo en la zona austral, por la baja o nula cantidad de celdas con información. Se destaca además que en gran parte de la zona norte el producto MODIS de ET no presenta valores, exceptuando la alta montaña de la primera y segunda región del país, por lo que no ha sido posible realizar una comparación más exhaustiva de esa zona.

Además, en este estudio se ha analizado estadística de estaciones meteorológicas que cuentan con información medida de evaporación de Tanque PAM, de las que se desprenden 5 estaciones que cuentan con estadística suficiente en el periodo de los años 2004 al 2016. Esta información se ha agrupado para realizar comparaciones y analizar el desempeño de los 6 métodos de este estudio y la base de datos proveniente de productos grillados. Se pudo observar que la evapotranspiración medida en las estaciones presenta un comportamiento cíclico de forma anual, es decir, que las máximas ocurren en enero y las mínimas alrededor del mes de julio, y que los métodos de estimación utilizados presentan este mismo comportamiento. Se ha realizado un análisis al desempeño de las metodologías de estimación de evapotranspiración y se pudo notar que las estaciones ubicadas en zonas más extremas del país (230001 al norte y 410005 al sur) tuvieron un peor ajuste que el resto de las estaciones (290004, 330020 y 360019), en estas tres el coeficiente de determinación de cada método toma valores superiores a 0,85. Observando lo obtenido para la estación 230001, se puede decir que el método de Hargreaves presentó el mejor ajuste, considerando los tres indicadores usados (R^2, NRMSE y PE). Para la estación 290004, no existe una metodología que sea predominante en sus indicadores de desempeño, hay métodos que muestran buenos indicadores de R^2 y NRMSE, que a su vez presentan un mayor error porcentual

PE>15% (-), sin embargo, se adopta como mejor ajuste Turc simplificado ya que muestra mejores resultados en NRMSE y PE, y R^2 satisfactorio. La estación 330050 presentó un buen ajuste en todas sus metodologías ($R^2 \geq 0{,}93$), siendo Hargreaves la que se toma como mejor desempeño, ya que es la que presenta mayor coeficiente de determinación y menor NRMSE. En la estación 360019 se tiene en general buen desempeño para los métodos Hargreaves, Penman-Monteith y Turc, este último es el que presentó menores valores de error porcentual y error cuadrático, por lo que se consideró como el de mejor ajuste. Finalmente, la estación 410005 mostró un mejor ajuste y desempeño para el método Hargreaves. Se destaca que el método Blaney y Criddle mostró el peor desempeño en comparación con las otras metodologías, en todas las estaciones meteorológicas con excepción de la estación 230001. Resulta relevante notar que en las estaciones 360019 y 410005 se observan datos medidos fuera de la tendencia anual, es decir, valores de evapotranspiración altos en épocas invernales y magnitudes de evapotranspiración bajas en época estival. Estos valores resultan incoherentes en las mediciones, y pueden arrastrar a un mayor error en la comparación entre metodologías de estimación.

Finalmente, si bien los resultados obtenidos en el capítulo 7.5 indican que, ciertas metodologías de estimación de evapotranspiración presentan un buen ajuste a la estadística de evaporación de Tanque PAM de 5 estaciones meteorológicas, no es posible concluir que estas estaciones y su metodología de mejor ajuste sean representativas de la zona natural a la que pertenece, ya que se observa una falta de representatividad territorial de los datos de estaciones, que es únicamente puntual del lugar donde esta se ubica. A esto se agrega que la estadística recopilada en la estación puede contener errores en las mediciones o bien ausencia de medición, que afecta directamente al ajuste de los métodos. Es por esto que se propone como futuro trabajo evaluar los distintos métodos de estimación de ET con una mayor densidad de estaciones con estadística de evaporación de bandeja a lo largo de Chile, con el objetivo de obtener con un mayor grado de certeza las metodologías de mejor ajuste, esto podría lograrse acotando el periodo de análisis, e incluir estaciones con menor cantidad de años de registro. Además, para efectos de aprovechar al máximo los productos CR2MET utilizados en este estudio, se propone un futuro trabajo que consista en estimar la ET con los distintos métodos empleados en este documento, considerando el resto de las variables meteorológicas distribuidas espacialmente, por ejemplo, velocidad del viento y horas de insolación real.

REFERENCIAS

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D, y Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Roma.

Allen, R. G., y Pruitt, W. O. (1986). Rational use of the FAO Blaney-Criddle formula. Journal of. Irrigation Drainage Engineering, 112(2), p. 139-155.

Allen, R.G., Pruitt, W.O., Businger, J.A., Fritschen, L.J., Jensen, M.E., y Quinn, F.H. (1996). Capítulo 4: Evaporation and Transpiration, ASCE Handbook of Hydrology, p. 125-252. New York.

Alvarez-Garreton, C., Mendoza, P., Boisier, J., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M. Lara, A., Puelma, C., Cortes, G., Garreaud, R., McPhee, J. y Ayala, A. (2018). The CAMELS-CL dataset: Catchment Attributes and Meteorology for Large Sample Studies-Chile dataset. Hydrology and Earth System Sciences, 22, p. 5817-5846.

American Society of Civil Engineers (ASCE). (1990). Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. Manuals and Reports on Engineering Practice, ASCE. No. 70, New York.

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN). (s.f.). Información Territorial-Regiones: Chile Nuestro País. https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/regiones.

Borda, M. R. (2017). Amplitud térmica - La amplitud térmica es un parámetro que se puede utilizar en la caracterización climática de una zona. AGROBARROW, 60, p. 20-21.

Brouwer, C., y Heibloem, M. (1986). Irrigation Water Management: Irrigation Water Needs, Training Manual No.3. Food and Agriculture Organization of the United Nations FAO Land and Water Division. Roma.

Centro AGRIMED. (2015). Evapotranspiración de Referencia para la determinación de las demandas de riego en Chile. Imprenta GRÁFICA MARMOR. Santiago, Chile.

Comisión Nacional de Riego (CNR) y Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). (1997). Cálculo y Cartografía de la Evapotranspiración Potencial en Chile. Comisión Nacional de Riego. Santiago, Chile.

Corporación de Fomento a la Producción (CORFO). (2013). Geografía Económica de Chile, Tomo I. (1ª ed.). Cámara Chilena de la Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile, Dirección de Bibliotecas, Archivos y Museos. Santiago, Chile.

Dirección General de Aguas (DGA). (1986). Mapa Hidrogeológico de Chile Escala 1:2.500.000 Texto Explicativo. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas. Santiago, Chile.

Dirección General de Aguas (DGA). (2016). Atlas del Agua Chile 2016. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación. Santiago, Chile.

Djaman, K., Balde, A. B., Sow, A., Muller, B., Irmak, S., N'Diaye, M. K., Manneh, B., Moukoumbi, Y. D., Futakuchi, K, y Saito, K. (2015). Evaluation of sixteen reference evapotranspiration methods under Sahelian conditions in the Senegal River Valley. Journal of Hydrology: Regional Studies, 3, p. 139-159.

Doorenbos, J., y Pruitt, W. O. (1977). Crop water requirements. Food and Agriculture Organization of the United Nations FAO Irrigation and Drainage Paper, (rev.1), Roma, 144 p.

Hargreaves, G. H. (1975). Moisture availability and crop production. Trans. ASAE, 18(5), p. 980-984.

Hargreaves, G. H., y Allen, G. (2003). History and Evaluation of Hargreaves Evapotranspiration Equation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 129, p. 53-63. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(2003)129:1(53)

Hargreaves, G. H., y Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. Applied Engineering in Agriculture, 1(2), p. 96-99.

Hargreaves, G. L., Hargreaves, G. H., y Riley, J. P. (1985). Irrigation water requirements for Senegal River Basin. Journal of Irrigation Drainage Engineering, 111(3), p. 265-275.

Instituto Murciano de Investigación y desarrollo Agrario y Alimentario (IMIDA). (2019). Estimación de la Radiación Neta para su uso en el método de cálculo de la evapotranspiración en el Sistema de Información Agrario de Murcia. SIAM Región de Murcia, http://siam.imida.es/docs/RadiacionNeta.pdf

Lang, D., Zheng, J., Shi, J., Liao, F., Ma, X., Wang, W., Chen, X., y Zhang, M. (2017). A Comparative Study of Potential Evapotranspiration Estimation by Eight Methods with FAO Penman–Monteith Method in Southwestern China. Water, 9 (10), 734. doi:10.3390/w9100734.

Ministerio de Energía de Chile. (2016). Manual del Usuario Explorador Solar para Autoconsumo. Versión 2016. Santiago, Chile. Realizado por: Departamento Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Universidad de Chile.

Molden, D., Frenken, K., Barker, R., Fraiture, C., Mati, B., Svendsen, M., Sadoff, C., y Finlayson, M. (2007). Trends in water and agricultural development. Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture, p. 57-89.

Molina, A., Falvey, M., y Rondanelli, R. (2017). A solar radiation database for Chile. Scientific Reports, 7: 14823. doi:10.1038/s41598-017-13761-x

National Centers for Environmental Information (NCEI). (2023). *Did you know? Potential Evapotranspiration*. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/dyk/potential-evapotranspiration

Prescott, J. (1940). Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. Trans. R. Soc. Sci. Aust., 64: 114-125.

Running, S., Mu, Q., Zhao, M., y Moreno, A. (2019). User's Guide MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (MOD16A2/A3 and Year-end Gap-filled

MOD16A2GF/A3GF) NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm (For Collection 6). Versión 2.2.

Schaaf, C.B., Gao, F., Strahler, A. H., Lucht, W., L, X., Tsang, T., Strugnell, N. C., Zhang, X., Jin Y., Muller, J.-P., Lewis, P., Barnsley, M., Hobson, P., Disney, M., Roberts, G., Dunderdale, M., Doll, C., d'Entremont, R. P., Hug, B., Liang, S., Privette, J. L., y Roy, D. (2002). First operational BRDF, albedo nadir reflectance products from MODIS. Remote Sensing of Environment, 83, p. 135-148.

Song, R., Muller, J.-P., Kharbouche, S., y Woodgate, W. (2019). Intercomparison of Surface Albedo Retrievals from MISR, MODIS, CGLS Using Tower and Upscaled Tower Measurements. Remote Sensing, 11, 644. doi:10.3390/rs11060644.

Stwöhas, L., (2016). Fundamentos de Hidrología Aplicada. (1ª ed.). Sello Editorial USM.

Turc L., (1961). Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: a simple climatic formula evolved up to date. Annals of Agronomy, 12, p. 13-49.

Weiß, M., y Menzel, L. (2008). A global comparison of four potential evapotranspiration equations and heir relevance to stream flow modelling in semi-arid environments. Advances in Geosciences, 18, p. 15-23. doi:10.5194/adgeo-18-15-2008.

ANEXO A

- Los productos de T_{max}, T_{min} y T_{media} de CR2MET deben ser ingresados con la estructura proveniente de la fuente original.
- La matriz de horas de insolación real (`'DATAIDW_N2'`) se elabora de acuerdo con lo señalado en el capítulo 6.1.1, y la subrutina "Duración real de insolación Explorador Solar" en ANEXO B.
- La matriz de viento a 2 m (`'DATAINT_U'`), se elabora de acuerdo con lo señalado en el capítulo 6.1.1, y la subrutina "Viento Explorador Solar" en ANEXO B.
- La matriz de elevación (`'DATAGRID_Z'`), se elabora siguiendo las indicaciones del capítulo 6.1.3.
- El producto de albedo (`'albedo'`), obtenido de MODIS, se elabora según lo indicado en capítulo 6.1.4, y tendrá las dimensiones que en este se indican.

- **Código MATLAB R2019b – Método Blaney y Criddle**

```
%Blaney & Criddle mm/dia
%ET = p*(0.46*Tmedia + 8), p como porcentaje diario de horas de luz en el año.

tmedCR2=netcdf.open('CR2MET_v1.3_t2m_day_1979_2016_005deg.nc','NC_NOWRITE');
inicio='01-01-2004';%ingresar dia de inicio que se requiere
final='30-11-2016';%ingresar dia final que se requiere
fecha1=datenum(inicio,'dd-mm-yyyy')-datenum(1979,1,1)+1;
fecha2=datenum(final,'dd-mm-yyyy')-datenum(1979,1,1)+1;
lon=netcdf.getVar(tmedCR2,0,0,220);%Longitud en Grados dim0 LONGITUD
lat=netcdf.getVar(tmedCR2,1,0,800);%Latitud en Grados dim1 LATITUD
LON=(pi/180)*lon;%Longitud en Radianes
LAT=(pi/180)*flipdim(lat,1);%Latitud en Radianes
%los datos de latitud están invertidos en el NETCDF,
%por lo que se invierten para que el mapa se muestre de norte a sur
Tmedia2=netcdf.getVar(tmedCR2,3);%matriz de temperaturas completa del CR2
Tmedia2=flipud(permute((Tmedia2(:,:,fecha1:fecha2)),[2 1 3]));
%por defecto (LON,LAT,DIA) se permutan a (LAT,LON,DIA)
clear tmedCR2

%1.- Obtener el valor de p para cada dia y latitud correspondiente
n=datenum(inicio,'dd-mm-yyyy');%transforma fecha numerica
DiaN=datenum(final,'dd-mm-yyyy');
Dia=n:DiaN;%vector de dias
Dia=Dia(:);%transposicion de vector
```

```
Dia2=datenum(year(Dia),1,0);%fecha numerica del dia 0 mes 1 año del "Dia"
DiaYear=Dia-Dia2;%contador diario (1-365) o (1-366)
DiaYear(DiaYear==366)=365;%corrige el contador diario si año bisiesto 366=365
yy=year(Dia);%contiene año del "Dia"
DEC=23.45*(pi/180)*cos(2*pi*((172-DiaYear)/365));%angulo declinación (rad)
AUX=ones(size(LAT,1),size(DEC,1));%matriz auxiliar para la iteracion siguiente

for a=1:size(LAT,1)
    AUX(a,:)=(-tan(LAT(a,1)).*tan(DEC))';
end

SSANGLE=acos(AUX);%angulo de puesta de sol "sunset" (rad)
HH=SSANGLE*24/pi;%horas de luz al dia
Aux2D=ones(size(LAT,1),length(Dia));%matriz auxiliar
HYAUX=zeros(size(LAT,1),length(Dia));%matriz auxiliar
for b=1:size(LAT,1)%creación de matriz con años en cada latitud
    Aux2D(b,:)=yy';
end

for c=yy(1):yy(end)%creación de matriz que contiene para cada día la suma
    AUZ=Aux2D==c;  %de las horas de luz del año completo que corresponde
    a=HH.*AUZ;
    suma=sum(a,2);
    HYEAR=HYAUX+(suma.*AUZ);
    HYAUX=HYEAR;
end

p=100*HH./HYEAR;%fración porcentual de horas dayligth en la suma anual
%esta matriz queda expresada en porcentaje, sus dimensiones son (latitud, día)
clear DEC AUX LAT LON SSANGLE HH AUZ HYAUX HYEAR Aux2D suma

%2.-Obtener matriz de Temperaturas medias
offset=0;%desfase que viene por defecto desde archivo del CR2
factor=0.0016667;%factor de escala por defecto del archivo del CR2
fillval=-32768;%valor de dato de relleno NaN
Tmedia2=double(Tmedia2);%se cambia el tipo de dato de INT16 a DOUBLE
Tmedia2(Tmedia2==fillval)=NaN;%el valor de relleno FillValue se cambia por NaN
Tmedia2=Tmedia2*factor+offset;%se multiplica factor de escala y suma desfase
Tmedia=permute(Tmedia2,[1 3 2]);
%se redimensiona la matriz (LAT,DIA,LON) para poder operar
%ya que la matriz p tiene dimensiones (LAT,DIA)
clear Tmedia2

%3.-Realizar la operación de matrices (Temp y p) para obtener la ET
ETP=p.*((0.46*Tmedia)+8);
ET_BlaneyCriddle=permute(ETP,[1 3 2]);
ET_BlaneyCriddle(ET_BlaneyCriddle<0)=0;
save('ET_BlaneyCriddle.mat','ET_BlaneyCriddle','-v7.3');

[ET_Mensua_BC,ET_mMensu_BC,ET_Anual_BC,ET_mAnual_BC,ET_Estaci_BC,ET_mEstac_BC]
=F_ETtemporal(ET_BlaneyCriddle);
```

- **Código MATLAB R2019b – Método Hargreaves**

```
%Hargreaves mm/dia:
%ET = 0.0135*Rs(Tmedia+17.8)
%Rs corresponde a la radiacion solar que se puede resolver a traves
%de dos metodologias: Rs=(as + bs*n/N)*Ra
%                     Rs=0.16*Ra*TR^0.5
%se indica que ET y Rs tienen las mismas unidades, se usa factor de conversion
%de evaporacion equivalente [mm día-1]=0,408*Radiacion [MJ m-2 día-1](20)

tmax_cr2=netcdf.open('CR2MET_v1.3_tmax_day_1979_2016_005deg.nc','NC_NOWRITE');
tmin_cr2=netcdf.open('CR2MET_v1.3_tmin_day_1979_2016_005deg.nc','NC_NOWRITE');
tmax_aux=flipud(permute(netcdf.getVar(tmax_cr2,3),[2 1 3]));
tmin_aux=flipud(permute(netcdf.getVar(tmin_cr2,3),[2 1 3]));
lat_aux=flipud(netcdf.getVar(tmax_cr2,0));
lat=lat_aux.*ones(800,220);
clear tmax_cr2 tmin_cr2

%Se redimensionan las matrices de temperatura
fecha_inicio= '01-01-2004';%ingresar dia de inicio que se requiere
fecha_final = '30-11-2016';%ingresar dia final que se requiere
n1='01-01-1979';%fecha incio de productos CR2MET
inicio=datenum(fecha_inicio,'dd-mm-yyyy')-datenum(n1,'dd-mm-yyyy')+1;
final=datenum(fecha_final,'dd-mm-yyyy')-datenum(n1,'dd-mm-yyyy')+1;
tmax_aux=tmax_aux(:,:,inicio:final);
tmin_aux=tmin_aux(:,:,inicio:final);
lat_sup=lat(1,1);
lat_inf=lat(800,1);
clear lat

%1.-Temperaturas minima, maxima y media
%   se obtiene la temperatura minima, maxima y media en un rango de latitudes
[tmax,tmin,tmed]=F_TZONA(lat_aux,lat_sup,lat_inf,tmax_aux,tmin_aux);
clear tmax_aux tmin_aux

%2.a.-Rs simplificado
%Rs=0.16*Ra*(TR_)^0.5;
%TR:rango de temperaturas extremas, amplitud termica
RA=F_RA(fecha_inicio,fecha_final,lat_aux,lat_sup,lat_inf);
RA=0.408*RA;%[mm día-1]=0,408 x Radiacion [MJ m-2 día-1] (20)
TR=tmax-tmin;
clear tmax tmin

%2.b.-Rs
%Rs=(as+bs*n/N)*Ra, con informacion de:
%Insolación real n (IDW_N desde DATA_CLOUD)
%Explorador solar tiene informacion de nubosidad de 01-01-2004 a 26-12-2016
NAN=tmax(:,:,1)./tmax(:,:,1); %Recorte de datos ubicados fuera de los limites
load('DATAIDW_N2');%extrae la matriz de horas de sol n
n=NAN.*n;%con NAN se eliminan los datos fuera de los limites de Chile
n1data='01-01-2004';%n1data es la fecha del primer valor de la matriz n
dia_n=datenum(n1data,'dd-mm-yyyy');
dia_i=datenum(fecha_inicio,'dd-mm-yyyy');
dia_f=datenum(fecha_final,'dd-mm-yyyy');
n=n(:,:,dia_i-dia_n+1:dia_f-dia_n+1);
as=0.25;
```

```
bs=0.5;
Rs=F_RS(fecha_inicio,fecha_final,lat_aux,lat_sup,lat_inf,as,bs,n);
Rs=0.408*Rs;%[mm día-1]=0,408*Radiacion[MJ m-2 día-1] (20)
clear n as bs dia_n dia_i dia_f fecha_final fecha_inicio final inicio lat_aux
lat_inf lat_sup n1 n1data NAN

%segun Weiß y Menzel (2008) para temperaturas <-17.8 ET = 0
%ET=0.0135*Rs(Tmedia+17.8)
ET_Hargreaves=0.0135*Rs.*(tmed+17.8).*(tmed>=-17.8);
save('ET_Hargreaves','ET_Hargreaves','-v7.3');
%ET = 0.0023*Ra*(Tmedia+17.8)*TR^0.5  /  Rs=0.16*Ra*TR^0.5
ET_Hargreavessimp=0.0023*RA.*(tmed+17.8).*(TR.^0.5).*(tmed>=-17.8);
save('ET_Hargreavessimp','ET_Hargreavessimp','-v7.3');

[ET_Mensua_HS,ET_mMensu_HS,ET_Anual_HS,ET_mAnual_HS,ET_Estaci_HS,ET_mEstac_HS]
=F_ETtemporal(ET_Hargreavessimp);
[ET_Mensua_HA,ET_mMensu_HA,ET_Anual_HA,ET_mAnual_HA,ET_Estaci_HA,ET_mEstac_HA]
=F_ETtemporal(ET_Hargreaves);
```

- **Código MATLAB R2019b – Método Turc**

```
%Turc mm/dia
%ET=0.013*(Tmedia/(Tmedia+15))*(RS+50)*(1+(65-HR)/120)
%RS en cal/cm2/dia
%de dos metodologias: Rs=0.16*Ra*TR^0.5
%                     Rs=(as + bs*n/N)*Ra

tmax_cr2=netcdf.open('CR2MET_v1.3_tmax_day_1979_2016_005deg.nc','NC_NOWRITE');
tmin_cr2=netcdf.open('CR2MET_v1.3_tmin_day_1979_2016_005deg.nc','NC_NOWRITE');
tmax_aux=flipud(permute(netcdf.getVar(tmax_cr2,3),[2 1 3]));
tmin_aux=flipud(permute(netcdf.getVar(tmin_cr2,3),[2 1 3]));
fecha_inicio='01-01-2004';%ingresar dia de inicio que se requiere
fecha_final='30-11-2016';%ingresar dia final que se requiere
n1='01-01-1979';%fecha incio de productos CR2MET
inicio=datenum(fecha_inicio,'dd-mm-yyyy')-datenum(n1,'dd-mm-yyyy')+1;
final=datenum(fecha_final,'dd-mm-yyyy')-datenum(n1,'dd-mm-yyyy')+1;
tmax_aux=tmax_aux(:,:,inicio:final);
tmin_aux=tmin_aux(:,:,inicio:final);
lat_aux=flipud(netcdf.getVar(tmax_cr2,0));
lat=lat_aux.*ones(800,220);
lat_sup=lat(1,1)  ;
lat_inf=lat(800,1);
clear tmax_cr2 tmin_cr2 lat inicio final

%1.-Temperaturas minima, maxima y media
%   se obtiene la temperatura minima, maxima y media en un rango de latitudes
[tmax,tmin,tmed]=F_TZONA(lat_aux,lat_sup,lat_inf,tmax_aux,tmin_aux);
clear tmax_aux tmin_aux

%2.-Humedad relativa HR=ea/es *100
%ea=e0(Trocio), en caso de no contar con estadistica usar Trocio = Tmin
ea=F_e0(tmin);
es=(F_e0(tmax)+F_e0(tmin))/2;
HR=(ea./es)*100;
HR(HR>65)=65;
clear ea es
```

```
%Recorte de datos ubicados fuera de los limites
NAN=tmax(:,:,1)./tmax(:,:,1);

%3.a.-Radiación global, Rs simplificado
%Rss= 0.16*Ra.*(TR_).^0.5;
%Ra:radiación extraterreste
%TR:rango de temperaturas extremas, amplitud termica
TR=tmax-tmin;
clear tmax tmin

RA=F_RA(fecha_inicio,fecha_final,lat_aux,lat_sup,lat_inf);
Rss=NAN.*F_RSSIMPL(RA,TR);%con NAN se eliminan datos fuera de limites de Chile
clear TR RA

%3.b.-Radiacion global, unidades (cal/cm2dia)
%Rs=(as + bs*n/N)*Ra, con informacion de
%Insolacion real n (IDW_N desde DATA_CLOUD)
%Explorador solar tiene informacion de nubosidad de 01-01-2004 a 26-12-2016
load('DATAIDW_N2');%extrae la matriz de horas de sol n
n=NAN.*n;% con NAN se eliminan datos fuera de limites de Chile
n1data='01-01-2004';%fecha del primer valor de la matriz n
dia_n=datenum(n1data,'dd-mm-yyyy');
dia_i=datenum(fecha_inicio,'dd-mm-yyyy');
dia_f=datenum(fecha_final,'dd-mm-yyyy');
n=n(:,:,dia_i-dia_n+1:dia_f-dia_n+1);
as=0.25;
bs=0.5;
[Rs]=F_RS(fecha_inicio,fecha_final,lat_aux,lat_sup,lat_inf,as,bs,n);
%Rs en unidades MJ/m2dia
clear n as bs NAN dia_f dia_i dia_n fecha_inicio fecha_final lat_aux lat_inf
lat_sup n1 n1data

%ET=0.013*(Tmedia/(Tmedia+15))*(RG+50)*(1+((65-HR)/120))
ET_Turcsimplificado=0.013*(tmed./(tmed+15)).*(((1/(4.1868*(10^-
2)))*Rss)+50).*(1+((65-HR)/120));
%(1/(4.1868*10^-2))Segun pag 210 anexo FAO56
ET_Turcsimplificado(ET_Turcsimplificado<0)=0;
save(ET_Turcsimplificado','ET_Turcsimplificado','-v7.3');
clear Rss

ET_Turc=0.013*(tmed./(tmed+15)).*(((1/(4.1868*(10^-2)))*Rs)+50).*(1+((65-
HR)/120));
ET_Turc(ET_Turc<0)=0;
save('ET_Turc','ET_Turc','-v7.3');
clear Rs

[ET_Mensua_TU,ET_mMensu_TU,ET_Anual_TU,ET_mAnual_TU,ET_Estaci_TU,ET_mEstac_TU]
=F_ETtemporal(ET_Turc);
[ET_Mensua_TS,ET_mMensu_TS,ET_Anual_TS,ET_mAnual_TS,ET_Estaci_TS,ET_mEstac_TS]
=F_ETtemporal(ET_Turcsimplificado);
```

- **Código MATLAB R2019b – Método FAO Penman Monteith**

```
%Método de PENMAN MONTEITH mm/dia
%ET = (0.408*delta*(Rn+G) + gamma(900/(Tmed+273))*u2*(es-ea))
%      ____________________________________________________
%                   (delta + gamma(1+0.34*u2))
%donde Tmed temperatura media en °C medida a 2 metros de altura
%      delta pendiente de la curva de presion de saturacion de vapor kPa/°C
%      gamma constante psicrometrica kPa/°C
%      es presion de vapor saturado kPa
%      ea presion real de vapor kPa
%      Rn radiacion neta MJ/m2dia
%      G flujo de calor del suelo MJ/m2dia
%      u2 velocidad del viento medida a 2 metros de altura m/s

tmax_cr2=netcdf.open('CR2MET_v1.3_tmax_day_1979_2016_005deg.nc','NC_NOWRITE');
tmin_cr2=netcdf.open('CR2MET_v1.3_tmin_day_1979_2016_005deg.nc','NC_NOWRITE');
%los datos estan invertidos en latitud en el NETCDF, se invierten para que el
mapa se muestre de norte a sur
tmax_aux=flipud(permute(netcdf.getVar(tmax_cr2,3),[2 1 3]));
tmin_aux=flipud(permute(netcdf.getVar(tmin_cr2,3),[2 1 3]));
%Se redimensionan las matrices de temperatura a la cantidad de años en que los
datos se encuentran disponibles
fecha_inicio= '01-01-2004';%ingresar manualmente dia de inicio que se requiere
fecha_final = '30-11-2016';%ingresar manualmente dia de final que se requiere
n1='01-01-1979';%fecha inicio de productos CR2MET
inicio=datenum(fecha_inicio,'dd-mm-yyyy')-datenum(n1,'dd-mm-yyyy')+1;
final =datenum(fecha_final,'dd-mm-yyyy')-datenum(n1,'dd-mm-yyyy')+1;
tmax_aux = tmax_aux(:,:,inicio:final);
tmin_aux = tmin_aux(:,:,inicio:final);
lat_aux = single(flipud(netcdf.getVar(tmax_cr2,0)));
lat = lat_aux.*ones(800,220);
%Latitudes que delimitan las zonas naturales del país
lat_sup=lat(1,1);
lat_inf=lat(800,1);
clear tmax_cr2 tmin_cr2 inicio final lat

%1.-Temperaturas minima, maxima y media
%   se obtiene la temperatura minima, maxima y media en un rango de latitudes
[tmax,tmin,tmed]=F_TZONA(lat_aux,lat_sup,lat_inf,tmax_aux,tmin_aux);
clear tmax_aux tmin_aux

%2.-es presion de vapor saturado (kPa)
%   es= (e0(Tmax)+e0(Tmin))/2
es=((F_e0(tmax)+F_e0(tmin))/2);

%3.-ea presion real de vapor (kPa)
%   ea=e0(Trocio), en caso de no contar con estadistica usar Trocio = Tmin
ea=(F_e0(tmin));

%4.-Rn radiacion neta
%   Rn = Rns - Rnl
%   Rns=(1-albedo)*Rs
%   Rnl=cte_SB*((Tmax^4+Tmin^4)/2)*(0.34-0.14*sqrt(ea))*((1.35*Rs/Rs0)-0.35)
%   con Tmax y Tmin en °K
load('DATAIDW_N2');%extrae la matriz de horas de sol n
```

```
n1data='01-01-2004'; %n1data es la fecha del primer valor de la matriz n
dia_n=datenum(n1data,'dd-mm-yyyy');
dia_i=datenum(fecha_inicio,'dd-mm-yyyy');
dia_f=datenum(fecha_final,'dd-mm-yyyy');
n=n(:,:,dia_i-dia_n+1:dia_f-dia_n+1); %redimensiona matriz n de nubosidad
as=0.25;
bs=0.5;
[Rs]=F_RS(fecha_inicio,fecha_final,lat_aux,lat_sup,lat_inf,as,bs,n);
load('albedo');%matriz de albedo(orden ENERO A DICIEMBRE)
[Rns]=F_RNS(albedo,Rs,fecha_inicio,fecha_final);
clear albedo

load('DATAGRID_Z');
cte_SB=4.903*(10^-9);%en [MJ / K4 m2 dia]
RA=F_RA(fecha_inicio,fecha_final,lat_aux,lat_sup,lat_inf);
Rs0=(0.75+2*(10^-5)*Z).*RA;
clear RA lat_aux lat_sup lat_inf Z
Rnl=cte_SB*(((273.15+tmax).^4+(273.15+tmin).^4)/2).*(0.34-
0.14*(ea).^0.5).*((1.35*Rs./Rs0)-0.35);
clear Rs Rs0

Rn =Rns-Rnl;
G=0; %Flujo de calor del suelo, se aproxima a 0 si se realiza balance diario
clear Rns Rnl tmin tmax

%5.-u2 velocidad del viento medida a 2 metros de altura
load('DATAINT_U');%matriz de viento U, datos de explorador solar entregan
viento a 2m de altura
u2=U(:,:,(datenum(fecha_inicio,'dd-mm-yyyy')-datenum('01-01-
2004')+1):(datenum(fecha_final,'dd-mm-yyyy')-datenum('01-01-2004')+1));

%6.-delta pendiente de la curva de presion de saturacion de vapor
%   delta= 4098*(0.6108*exp(17.27*Tmed/(Tmed+237.3)))/(Tmed+237.3)^2
delta=4098*(0.6108*exp(17.27*tmed./(tmed+237.3))./((tmed+237.3).^2);

%7.-gamma constante psicrometrica
%   gamma=0.665*10^-3*(101.3*((293-0.0065*Z)/293)^5.26),con Z elevacion en m
load('DATAGRID_Z');
gamma=0.665*(10^-3)*(101.3*((293-0.0065*Z)/293).^5.26);
ET_PenmanMonteith=(0.408*delta.*(Rn-G)+(gamma.*(900/(tmed+273)).*u2.*(es-
ea))./(delta+(gamma.*(1+0.34*u2)));
save('ET_PenmanMonteith.mat','ET_PenmanMonteith','-v7.3');

[ET_Mensua_PM,ET_mMensu_PM,ET_Anual_PM,ET_mAnual_PM,ET_Estaci_PM,ET_mEstac_PM]
=F_ETtemporal(ET_PenmanMonteith);
```

- **Código MATLAB R2019b – Funciones usadas en los métodos**

```
%Funcion de temperatura de Chile en rango de latitudes
function [TMAX,TMIN,TMED]=F_TZONA(lat,lim_sup,lim_inf,tmax,tmin)
[m,pos_sup]= max(lat==lim_sup);
[m,pos_inf]= max(lat==lim_inf);
tmax=single(tmax);%con esto se cambia el formato de INT16 a SINGLE
tmin=single(tmin);
tmax(tmax==-32768)=NaN; %asigna valor NaN a los datos catalogados como
faltantes -327686
tmin(tmin==-32768)=NaN;
TMAX = tmax(pos_sup:pos_inf,:,:)*0.0016667; %conversion de temperatura a °C
TMIN = tmin(pos_sup:pos_inf,:,:)*0.0016667;
TMED = (TMAX + TMIN)/2;
end
```

```
%Funcion de calculo presion de vapor
%e°=0.6108*exp((17.27*temp)/(temp+237.3)kPa
function [e0]=F_e0(temp)
e0=0.6108*exp((17.27*temp)./(temp+237.3));
end
```

```
%Funcion de calculo de Rs
function [RS]=F_RS(inicio,final,latitud,lim_sup,lim_inf,as,bs,n)
[m,pos_sup]= max(latitud==lim_sup);
[m,pos_inf]= max(latitud==lim_inf);
lat=latitud(pos_sup:pos_inf,:)*pi/180;
dia_i=datenum(inicio,'dd-mm-yyyy');
dia_f=datenum(final,'dd-mm-yyyy');
v_dia=(dia_i:dia_f)';%vector numero del dia inicio hasta numero del dia final
v_year=datenum(year(v_dia),1,0);%vector numero del año que representa cada dia
c_dia=v_year-v_dia;%vector numero del dia en el año (1 a 365 o 366)
RA=NaN(size(lat,1),1,(dia_f-dia_i)+1);%RA (latitud, longitud(1), dia)
N=NaN(size(lat,1),1,(dia_f-dia_i)+1);
for j=1:size(lat,1)
    for i=1:size(c_dia,1)
        Gsc = 0.082;%constante solar
        dr = 1+0.033*cos(2*pi*(c_dia(i))/365);%distancia relativa inversa de
la Tierra al Sol
        dec = 0.409*sin((2*pi*(c_dia(i))/365)-1.39);%declinación solar
        if c_dia(i)==366
            dr = 1+0.033*cos(2*pi*(c_dia(i)-1)/365);
            dec= 0.409*sin((2*pi*(c_dia(i)-1)/365)-1.39);
        end
        ws = acos(-tan(lat(j,:))*tan(dec));%angulo de radiacion a la puesta
del sol
        N(j,1,i)=(24/pi)*ws;
        RA(j,1,i)=(24*60*Gsc/pi)*dr*((ws*sin(lat(j,:))*sin(dec))
+(cos(lat(j,:))*cos(dec)*sin(ws)));
    end
end
RS=(as+bs*(n./N)).*RA;
end
```

```
%Funcion para obtener Rns a partir de albedo y Rs, se utilizaran en este
%caso tambien informacion relativa al rango de fechas del estudio
function [Rns]=F_RNS(albedo,Rs,fecha_inicio,fecha_final)
contador=0;
for Year=year(fecha_inicio,'dd-mm-yyyy'):year(fecha_final,'dd-mm-yyyy')
    for i=1:sum(eomday(Year,1:12))
        contador=contador+1;
        if i==336 && Year==2016
            break
        elseif i==366
            a(:,:,contador)=albedo(:,:,365);
        else
            a(:,:,contador)=albedo(:,:,i);
        end
    end
end
Rns=(1-a).*Rs;
end


%Funcion de calculo de Ra
function [RA]=F_RA(inicio,final,latitud,lim_sup,lim_inf)
[m,pos_sup]= max(latitud==lim_sup);
[m,pos_inf]= max(latitud==lim_inf);
lat=latitud(pos_sup:pos_inf,:)*pi/180;
dia_i=datenum(inicio,'dd-mm-yyyy');
dia_f=datenum(final,'dd-mm-yyyy');
v_dia=(dia_i:dia_f)';%vector numero del dia inicio hasta numero del dia final
v_year=datenum(year(v_dia),1,0);%vector numero del año que representa cada dia
c_dia=v_year-v_dia;%vector numero del dia en el año (de 1 a 365 o 366)
RA=NaN(size(lat,1),1,(dia_f-dia_i)+1);% RA (latitud, longitud(1), dia)
for j=1:size(lat,1)
    for i=1:size(c_dia,1)
        Gsc = 0.082;%constante solar
        dr = 1+0.033*cos(2*pi*(c_dia(i))/365);%distancia relativa inversa de
la Tierra al Sol
        dec = 0.409*sin((2*pi*(c_dia(i))/365)-1.39);%declinación solar
        if c_dia(i)==366
            dr = 1+0.033*cos(2*pi*(c_dia(i)-1)/365);
            dec= 0.409*sin((2*pi*(c_dia(i)-1)/365)-1.39);
        end
        ws = acos(-tan(lat(j,:))*tan(dec));%angulo de radiacion a la puesta
del sol
        RA(j,1,i)=(24*60*Gsc/pi)*dr*((ws*sin(lat(j,:))*sin(dec))
+(cos(lat(j,:))*cos(dec)*sin(ws)));
    end
end
end

%Funcion de calculo de RS simplificado para método de Turc Simplificado
function [RSS]=F_RSSIMPL(RA,TR)
RSS = 0.16*RA.*(TR).^0.5;
end
```

- **Código MATLAB R2019b – Función para el cálculo temporal de la ET**

```
%Funcion para calculo de ET:
%Total Mensual Media Mensual
$Total Anual Media Anual
%Total Estacional Media Estacional
%Para esto se usa año hidrologico ABRIL-MARZO
function
[ET_Mensual,ET_mMensual,ET_Anual,ET_mAnual,ET_Estacional,ET_mEstacional]=F_ETt
emporal(EVAP)
%recalcar que toda matriz que ingrese a esta funcion debe estar en el rango
%de fechas que se exponen a continuacion y tener dimensinones (LAT,LON,DIA)
inicio='01-01-2004';
final='30-11-2016';
dia=0;
mes=0;
%se calcula ET para cada mes del rango de tiempo que se dispone
ET_Mensual=zeros(size(EVAP,1),size(EVAP,2),156);

for Year=1:13
    m=mes;
    for Month=1:12
        d=dia;
        ET=0;
        mes=m+Month;
        for i=1:eomday(Year,Month)
            dia=d+i;
            ET=ET+EVAP(:,:,dia);
            if dia==4718
                break
%se pide que el ciclo termine para el dia=4718 que es el dia 30-11-2016
            end
        end
        ET_Mensual(:,:,mes)=ET;
    end
end

%ET TOTAL MENSUAL (donde se suman los mes i y se divide por el total de años)
%ejm:todos los mes abril y se dividen por el total de años estadisticos
%extrae la matriz de meses que estan dentro del año hidrologico (12años)
ET_recortada=ET_Mensual(:,:,4:147);
ET_mMensual=zeros(size(EVAP,1),size(EVAP,2),12);

for Month=1:12
    for Year=1:12
        ET(:,:,Year)=ET_recortada(:,:,12*(Year-1)+Month);
    end
    c=~isnan(ET);
    ETaux=ET;
    ETaux(isnan(ETaux))=0;
    ET_mMensual(:,:,Month)=sum(c.*ETaux,3)./sum(c,3);
end

clear ETaux
```

```
%ET TOTAL ANUAL (año hidrologico)
ET_Anual=zeros(size(EVAP,1),size(EVAP,2),12);

for i=1:12
    ET_Anual(:,:,i)=sum(ET_Mensual(:,:,12*(i-1)+4:12*i+3),3);
end

%ET MEDIA ANUAL
c=~isnan(ET_Anual);
ETaux=ET_Anual;
ETaux(isnan(ETaux))=0;
ET_mAnual=sum(c.*ETaux,3)./sum(c,3);
% ET ESTACIONAL con los rangos de fechas siguientes
% (1)OTOÑO       20-03 - 20-06
% (2)INVIERNO    21-06 - 20-09
% (3)PRIMAVERA   21-09 - 20-12
% (4)VERANO      21-12 - 19-03
dat=datenum(inicio,'dd-mm-yyyy'):datenum(final,'dd-mm-yyyy');
dat=reshape(dat,1,1,size(dat,2));
e=0;
A=EVAP;
ET_Estacional=zeros(size(EVAP,1),size(EVAP,2),48);

for Year=2004:2015
    oto=sum(dat<=(datenum(Year,3,20))):sum(dat<=(datenum(Year,6,20)));
    inv=sum(dat<=(datenum(Year,6,21))):sum(dat<=(datenum(Year,9,20)));
    pri=sum(dat<=(datenum(Year,9,21))):sum(dat<=(datenum(Year,12,20)));
    ver=sum(dat<=(datenum(Year,12,21))):sum(dat<=(datenum(Year+1,3,19)));
    ET_Estacional(:,:,e+1)=sum(A(:,:,oto),3);
    ET_Estacional(:,:,e+2)=sum(A(:,:,inv),3);
    ET_Estacional(:,:,e+3)=sum(A(:,:,pri),3);
    ET_Estacional(:,:,e+4)=sum(A(:,:,ver),3);
    e=e+4;
end

%ET MEDIA ESTACIONAL, promedio por estacion
clear ETaux
ET_mEstacional=zeros(size(EVAP,1),size(EVAP,2),4);

for Estacion=1:4
    for Year=1:12
        ET(:,:,Year)=ET_Estacional(:,:,4*(Year-1)+Estacion);
    end
    c=~isnan(ET);
    ETaux=ET;
    ETaux(isnan(ETaux))=0;
    ET_mEstacional(:,:,Estacion)=sum(c.*ETaux,3)./sum(c,3);
end
```

ANEXO B

- **Código MATLAB R2019b –Viento Explorador Solar**

```
lat_p=xlsread('DATA_WIND','A:A');%matriz con informacion de latitud subcuenca
lon_p=xlsread('DATA_WIND','B:B');%matriz con informacion de longitud subcuenca
u_p=xlsread('DATA_WIND','C2:FYN480');%matriz con datos de viento subcuenca
LAT=linspace(-17.025,-56.975,800)'.*ones(800,220);
LON=linspace(-76.975,-66.025,220).*ones(800,220);
U=NaN(800,220,size(u_p,2));
CONT_LON=0

for dia=1:size(U,3)
    for lat=1:size(LAT,1)
        for lon=1:size(LON,2)
            %distancia entre pto(Lat,Lon) y cada centroide
            DIST=((LAT(lat,lon)-lat_p).^2+(LON(lat,lon)-lon_p).^2).^0.5;
            %ubica la posicion del punto con la menor distancia
            pos_min=(abs(DIST)==min(abs(DIST)));
            u=sum(u_p(:,dia).*pos_min)/sum(pos_min);
            U(lat,lon,dia)=u;
        end
    end
end

save('DATAINT_U.mat','U','-v7.3');
```

- **Código MATLAB R2019b – Duración real de insolación Explorador Solar**

```
load('cloud_compl.mat');%matriz con dato de insolación real subcuencas en hora
load('Latp.mat');%matriz con informacion de latitud subcuenca
load('Lonp.mat');%matriz con informacion de longitud subcuenca
load('fecha.mat');%matriz con datos de fecha en cada hora (2004 a 2016)
load('hora.mat');%matriz con datos de cada hora (en los años 2004 a 2016)
load('NAN.mat');%matriz con dato NaN fuera de los límites de Chile
inicio='2004-01-01'; %'yyyy-mm-dd'
final= '2016-11-30';
FECHA=string(datestr(datenum(inicio,'yyyy-mm-dd'):datenum(final,'yyyy-mm-
dd'),'yyyy-mm-dd'));
LAT=linspace(-17.025,-56.975,800)'.*ones(800,220);
LON=linspace(-76.975,-66.025,220).*ones(1,220);
n=NaN(800,220,size(FECHA,1));
J=datenum(FECHA,'yyyy-mm-dd')-datenum(year(FECHA,'yyyy-mm-dd'),1,1)+1;
J(J==366)=365;
cont3=0;
%redefinir matrices para trabajarlas en dimensiones correctas
fecha=permute(fecha,[2 3 1]);
hora=permute(hora(:,1),[2 3 1]);
cloud=permute(cloud_compl,[2 3 1]);

for dia=1:size(n,3)
    for lat=1:size(LAT,1)
        %datos dependientes de la latitud
        %declinacion solar, J día del año 1-365
        dec=0.409*sin((2*pi*J(dia)/365)-1.39);
        %angulo de radiacion a la puesta del sol
```

```
        ws=acos(-tan(pi*LAT(lat,1)/180).*tan(dec));
        hsunrise=12-(rad2deg(ws)/15);%hora de amanecer teorica
        hsunset =12+(rad2deg(ws)/15);%hora de anochecer teorica
        radio=0.5;%Radio de influencia de subcuencas sobre el punto
%calcula la distancia del punto (lat,:) a todos los centroides de subcuencas
        DIST=((LAT(lat,1)-Latp).^2+(LON(1,:)-Lonp).^2).^0.5;
        DIST=DIST.*NAN(lat,:); %elimina datos fuera de los limites de Chile
        DIST(DIST==0)=0.0001;
        DIST_EV1=sum(DIST<=radio);%evalua radio de influencia
        DIST_EV2=NAN(lat,:).*DIST_EV1;
        DIST_EV3=sum(DIST_EV2==0);
        DIST_EV=DIST_EV3;
%si celda no se influencia por ningún centroide entonces se duplica el radio
        while DIST_EV~=0
            radio=radio*2;
            DIST_EV1=sum(DIST<=radio);
            DIST_EV2=NAN(lat,:).*DIST_EV1;
            DIST_EV3=sum(DIST_EV2==0);
            DIST_EV=DIST_EV3;
        end
        DIST_OK=DIST;
        DIST_OK(DIST>radio)=NaN;
%hora de luz en rango de sunrise-sunset en los centroides segun lat de celdas
        aux=(fecha==FECHA(dia)).*(hora>=hsunrise).*(hora<=hsunset).*hsolreal;
        N_OK=sum(aux,3);%suma de horas de luz reales de las celdas (lat,220)
%calculo de la interpolacion IDW con indice ^2
        nd2=N_OK./(DIST_OK.^2);%horas de luz reales de centroides (corregido
por influencias)según lat de las celdas, dividido por la distancia al cuadrado
de los centroides a las celdas (lat,220)
        d2= 1./(DIST_OK.^2);
        n(lat,:,dia)=(NAN(lat,:).*(sum(nd2,'omitnan')./sum(d2,'omitnan')));
        clear dec ws hsunrise hsunset aux nd2 d2 DIST DIST_OK N_OK
    end
end

save('DATAIDW_N2.mat','n','-v7.3');
```