



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**ESTIMACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE  
EVAPOTRANSPIRACIÓN USANDO IMÁGENES  
SATELITALES DE TEMPERATURA DE SUELO.  
VALIDACIÓN EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO ELQUI.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL

**JOSÉ TOMÁS YARAD ZAROR**

PROFESORA GUÍA:  
XIMENA VARGAS MESA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
MIGUEL LAGOS ZUÑIGA  
JAMES MCPHEE TORRES

SANTIAGO DE CHILE  
2018

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE: Ingeniero Civil  
POR: José Yarad Zaror  
FECHA: 15/01/2018  
PROF. GUÍA: Ximena Vargas Mesa**

**ESTIMACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE EVAPOTRANSPIRACIÓN  
USANDO IMÁGENES SATELITALES DE TEMPERATURA DE SUELO.  
VALIDACIÓN EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO ELQUI.**

El trabajo de título realizado consiste en estimar la distribución espacial de evapotranspiración del cultivo de referencia en la cuenca alta del río Elqui, IV Región de Coquimbo, usando imágenes de temperatura de suelo generadas por tres satélites desde 2002 a 2016. La necesidad de realizar la estimación a partir de imágenes satelitales surge debido a la escasa disponibilidad de estaciones meteorológicas, lo cual limita la determinación de variables de interés para la realización de estudios hidrológicos de precisión. Una de estas variables, de alta relevancia para el análisis de ciclos hidrológicos, corresponde a la evapotranspiración, para la que se han desarrollado productos satelitales tales como MOD16, a una resolución de 500 metros cada 16 días, pero cuentan con la limitante de la espacial y temporal, por lo que poder realizar una estimación a nivel diario y en alta resolución de manera remota es una muy buena solución a dicha problemática. El objetivo general consiste en mejorar la resolución espacial y temporal de la estimación de evapotranspiración del cultivo de referencia a través de imágenes satelitales. Para ello se propuso una metodología para estimar la distribución de temperatura media diaria de suelo, mejorar la resolución espacial del producto de temperatura media diaria del suelo entregado por los satélites y se establecieron relaciones entre la temperatura del suelo y la del aire registradas, así mediante el método Penman-Monteith, se estimó la evapotranspiración del cultivo de referencia en la cuenca y se validaron los resultados con las mediciones directas de las diferentes estaciones y con el producto acumulado MOD16 anteriormente nombrado.

Posterior a una extensa revisión bibliográfica, se analizó y seleccionó la metodología que permitió distribuir espacialmente la temperatura de suelo medida, se parametrizó la relación entre temperatura del aire registrada y temperatura del suelo, se generó una matriz espacio temporal de valores diarios de evapotranspiración del cultivo referencia, se acumuló la evapotranspiración a nivel anual para obtener promedio anual y mensual. Se obtuvieron como resultados la distribución de temperatura del aire a nivel diario con buena resolución espacial, una matriz de valores de evapotranspiración diaria y acumulada y, por último, mapas de temperatura y evapotranspiración del cultivo de referencia media mensual y anual promedio para los años 2002 a 2016. Los resultados obtenidos con respecto a las mediciones directas presentan un comportamiento similar, pero una mayor dispersión y sobrestiman los medidos in-situ, el error asociado promedio es de un 25%. Al validar con respecto al producto MOD16 se obtienen coeficiente de determinación mayor a 0.5 y en promedio mayor a 6.5.

*Dedicada a mi padre...*

# Agradecimientos

Quisiera agradecer a mi familia por su apoyo incondicional y por el sustento económico que significa estudiar esta carrera. A Macarena por su paciencia y apoyo durante este largo camino. A mis amigos de la universidad y a lo de la vida que me han dado apoyo en momentos donde mi situación no fue la mejor.

En lo académico me gustaría agradecer a Ximena Vargas, mi profesora guía, por su tiempo y dedicación. A los que me ayudaron sin tener la obligación de hacerlo, Dimitri, Nico Vásquez, Mota, Franco y al profesor Felipe Beltrán. A la Jackie por la buena onda, la preocupación y buena voluntad. Igualmente, a los miembros de mi comisión Miguel y James, que siempre mostraron buena disposición y cordialidad.

## Tabla de contenido

Capítulo 1 : Introducción .....	1
1.1    Motivación .....	1
1.2    Objetivos .....	2
1.2.1 General .....	2
1.2.2 Específicos .....	2
1.3    Organización del documento.....	2
Capítulo 2 : Revisión Bibliográfica .....	3
2.1    Procesos físicos asociados a la evapotranspiración.....	3
2.2    Cálculo de evapotranspiración .....	3
2.2.1 Radiación.....	6
2.2.1.1 Albedo .....	9
2.2.2 Humedad Relativa .....	9
2.2.3 Velocidad del Viento.....	12
2.3    Imágenes Satelitales MODIS .....	13
Producto de la temperatura de la superficie terrestre (LST).....	13
Relleno de pixeles sin información .....	13
2.4    Imágenes satelitales Landsat .....	15
Obtención de temperatura de suelo para imágenes satelitales Landsat.....	16
2.4    Parametrización de las temperaturas del aire con respecto al suelo.....	20
2.5    Mejoramiento de la resolución de las imágenes.....	20
Capítulo 3 : Caracterización de la zona y período de estudio .....	23
3.1    Parámetros Geomorfológicos .....	23
3.2    Clima .....	24
3.3    Uso de suelo .....	26
3.4    Estaciones Meteorológicas .....	27
3.5    Hidrología .....	29
Capítulo 4 : Análisis de información disponible y relleno de datos .....	31
4.1    Humedad Relativa .....	31
4.2    Velocidad del Viento.....	35
4.3    Radiación.....	38
4.3.1 Radiación de onda corta .....	38
4.3.2 Radiación de onda larga .....	41
4.3.2.1 Radiación neta .....	42

4.4	Otros Parámetros .....	43
4.5	Imágenes MODIS.....	45
4.6	Imágenes Landsat.....	46
4.7	Mejoramiento de la resolución de las imágenes satelitales de temperatura del aire. ....	46
Capítulo 5 : Resultados de Evapotranspiración .....		51
Capítulo 6 : Conclusiones.....		56
Bibliografía.....		58
Anexos.....		61
Anexo A .....		61
Anexo B .....		62
Anexo C .....		63
Anexo E.....		84
Anexo F.....		85

## **Tabla de Ilustraciones**

Figura 2.1:	Factor de conversión para la velocidad del viento. Fuente: FAO, 2006.....	12
Figura 3.1:	Subcuencas Elqui en Algarrobal.....	24
Figura 3.2:	Curva Hipsométrica Elqui en Algarrobal.....	24
Figura 3.3:	Estaciones hidrometeorológicas Elqui en Algarrobal.....	25
Figura 3.4:	Distribución temperatura media mensual en el período 2000-2016. ....	26
Figura 3.5:	Distribución precipitación media mensual en el período 2000-2016. ....	26
Figura 3.6:	Uso y tipo de suelo Elqui en Algarrobal.....	27
Figura 3.7:	Distribución estaciones Elqui en Algarrobal. ....	29
Figura 3.8:	Curva de variación estacional Elqui en Algarrobal en el periodo 1961-2016. ..	30
Figura 4.1:	Humedad relativa media diaria registrada. Período 2002-2016.....	31
Figura 4.2:	Correlaciones Humedad relativa entre Pisco Elqui y Llanos de Huanta. ....	32
Figura 4.3:	Humedad relativa media diaria. Periodo 2002-2016. ....	34
Figura 4.4:	Humedad relativa media anual. Período 2002-2016.....	34
Figura 4.5:	Velocidad del viento promedio registrada. Período 2002-2016. ....	35

Figura 4.6: Validación Explorador Eólico. Estación Llanos de Huanta.....	35
Figura 4.7: Relación estación Rivadavia y Explorador Eólico.....	36
Figura 4.8: Serie de velocidad del viento en las Estaciones de Elqui Alto. Período 2002-2016. .....	37
Figura 4.9: Velocidad del viento media anual. Período 2002-2016. ....	37
Figura 4.10: Radiación media diaria registrada. Período 2002-2016. ....	38
Figura 4.11: Ciclo anual Radiación de onda corta para cada estación. ....	39
Figura 4.12: Radiación simulada en estaciones de Elqui Alto. Período 2002-2016. ....	40
Figura 4.13: Radiación neta de onda corta para todas las estaciones. Periodo 2002-2016. .	41
Figura 4.14: Radiación neta de onda larga para todas las estaciones. Periodo 2002-2016. .	41
Figura 4.15: Radiación neta para todas las estaciones. Periodo 2002-2016.....	42
Figura 4.16: Radiación media diaria de onda corta, larga y neta. ....	42
Figura 4.17: Radiación neta media anual. Período 2002-2016.....	43
Figura 4.18: Diferencia presión de vapor media anual. Período 2002-2016.....	44
Figura 4.19: Pendiente curva de presión de vapor media anual. Período 2002-2016. ....	44
Figura 4.20: Constante Psicométrica en la cuenca Alta del río Elqui. ....	45
Figura 4.21: Diagrama de la metodología de relleno. ....	46
Figura 4.22: Polígonos de Thiessen a partir de estaciones que registran temperatura del aire. .....	47
Figura 4.23: Relación entre la temperatura del aire de cada estación y del suelo del satélite MODIS. ....	48
Figura 4.24: Temperaturas mínima media anual. Período 2002-2016. ....	50
Figura 4.25: Temperaturas máxima media anual. Período 2002-2016.....	50
Figura 5.1: Imágenes de evapotranspiración media mensual promedio del cultivo de referencia. Período 2002-2016. ....	51
Figura 5.2: Evapotranspiración media anual. Período 2002-2016. ....	52
Figura 5.3: Estaciones que miden evapotranspiración del cultivo de referencia. ....	53

Figura 5.4: Comparación entre valores medidos y calculados de evapotranspiración del cultivo de referencia para 5 estaciones. ....	53
Figura 5.5: Puntos de comparación de evapotranspiración. ....	54
Figura 5.6: Validación de resultados mediante producto MOD16. ....	55
Figura A.1: Mapa de pendientes. ....	61
Figura C.2: Correlaciones Humedad relativa entre Rio Claro y El Tapado. ....	63
Figura C.3: Correlaciones Humedad relativa entre Rio Toro y El Tapado. ....	63
Figura C.4: Correlaciones Humedad relativa entre Rio Turbio y El Tapado. ....	64
Figura C.5: Correlaciones Humedad relativa entre Paso Aguas Negras y El Tapado. ....	64
Figura C.6: Correlaciones Humedad relativa entre Laguna (Elqui) y El Tapado. ....	65
Figura C.7: Correlaciones Humedad relativa entre Llanos de Huanta y Laguna (Elqui). ....	65
Figura C.8: Correlaciones Humedad relativa entre Paso Aguas Negras y Laguna (Elqui). ..	66
Figura C.9: Correlaciones Humedad relativa entre Rio Claro y Laguna (Elqui). ....	66
Figura C.10: Correlaciones Humedad relativa entre Rio Toro y Laguna (Elqui) ....	67
Figura C.11: Correlaciones Humedad relativa entre Rio Toro y Laguna (Elqui) ....	67
Figura C.12: Correlaciones Humedad relativa entre Rivadavia y Laguna (Elqui). ....	68
Figura C.13: Correlaciones Humedad relativa entre Llanos de Huanta y El Tapado. ....	68
Figura C.14: Correlaciones Humedad relativa entre Llanos de Huanta y Paso Aguas Negras. ....	69
Figura C.15: Correlaciones Humedad relativa entre Rio Claro y Llanos de Huanta. ....	69
Figura C.16: Correlaciones Humedad relativa entre Rio Toro y Llanos de Huanta. ....	70
Figura C.17: Correlaciones Humedad relativa entre Rio Turbio y Llanos de Huanta. ....	70
Figura C.18: Correlaciones Humedad relativa entre Rivadavia y Llanos de Huanta. ....	71
Figura C.19: Correlaciones Humedad relativa entre Rivadavia y El Tapado. ....	71
Figura C.20: Correlaciones Humedad relativa entre Rio Toro y Paso Aguas Negras. ....	72
Figura C.21: Correlaciones Humedad relativa entre Rio Turbio y Paso Aguas Negras. ....	72



Figura C.22: Correlaciones Humedad relativa entre Pisco Elqui y El Tapado. ....	73
Figura C.23: Correlaciones Humedad relativa entre Pisco Elqui y Laguna (Elqui).....	73
Figura C.24: Correlaciones Humedad relativa entre Pisco Elqui y Llanos de Huanta. ....	74
Figura C.25: Correlaciones Humedad relativa entre Pisco Elqui y Paso Aguas Negras. ....	74
Figura C.26: Correlaciones Humedad relativa entre Rio Claro y Pisco Elqui. ....	75
Figura C.27: Correlaciones Humedad relativa entre Rio Toro y Pisco Elqui. ....	75
Figura C.28: Correlaciones Humedad relativa entre Rio Turbio y Pisco Elqui. ....	76
Figura C.29: Correlaciones Humedad relativa entre Rivadavia y Pisco Elqui.....	76
Figura C.30: Correlaciones Humedad relativa entre Rio Claro y Rio Toro. ....	77
Figura C.31: Correlaciones Humedad relativa entre Rio Claro y Rio Turbio.....	77
Figura C.32: Correlaciones Humedad relativa entre Rio Toro y Rio Turbio. ....	78
Figura C.33: Correlaciones Humedad relativa entre Rivadavia y Paso Aguas Negras. ....	78
Figura C.34: Correlaciones Humedad relativa entre Rio Claro y Rivadavia. ....	79
Figura C.35: Correlaciones Humedad relativa entre Rio Toro y Rivadavia. ....	79
Figura C.36: Correlaciones Humedad relativa entre Rio Turbio y Rivadavia. ....	80
Figura C.37: Correlaciones Humedad relativa entre Rio Claro y Paso Aguas Negras. ....	80
Figura D.38: Relación estación Rivadavia y Explorador Eólico.....	81
Figura D.39: Relación estación El Tapado y Explorador Eólico. ....	81
Figura D.40: Relación estación Pisco Elqui y Explorador Eólico.....	82
Figura D.41: Relación estación Llanos de Huanta y Explorador Eólico.....	82
Figura D.42: Relación estación Laguna (Elqui) y Explorador Eólico.....	83
Figura E.43: Humedad Relativa media posterior al Relleno 1. ....	84
Figura E.44: Humedad relativa media posterior al Relleno 2. ....	84
Figura F.45: Representación de imagen MODIS. ....	85
Figura F.46: Matriz a rellenar.....	86

Figura F.47: Matriz posterior al relleno.....	86
---	----

## **Índice de Tablas**

Tabla 2.1: Valores de emisividad asociados al índice NDVI. Fuente: Zhang, 2006.....	19
Tabla 3.1: Distribución uso y tipo de suelo. Fuente: IDE CIGIDEM (2016).....	27
Tabla 3.2: Estaciones Elqui en Algarrobal. ....	28
Tabla 4.1: Prioridades de estaciones para rellenar. ....	33
Tabla 5.1: Error relativos asociados a cada estación.....	54
Tabla B.1: Valores Curva Variación Estacional.....	62

# Capítulo 1 : Introducción

## 1.1 Motivación

La estimación de la temperatura del aire es de vital importancia para muchos ámbitos y estudios, tales como los relacionados con el cambio climático, el medio ambiente, la flora, la fauna, los balances de energía y las estimaciones de evapotranspiración del cultivo de referencia. En este último proceso las variaciones de temperatura del aire pueden cambiar drásticamente los volúmenes evapotranspirados y a su vez los resultados de un balance hídrico, por lo que ésta debe ser medida, calculada o estimada, con la mayor precisión posible. Debido a que no siempre se cuenta con estaciones meteorológicas que permitan determinar de manera directa la temperatura del aire, surge la necesidad de estimarla a través de métodos indirectos, dentro de los cuales se encuentra la temperatura del suelo la que puede ser obtenida mediante imágenes satelitales de manera gratuita.

Dentro de la diversidad de satélites que estiman temperatura del suelo se analizan tres, los cuales se diferencian principalmente en sus características espaciales y temporales, que permiten obtener la temperatura del suelo: Landsat es un satélite que entrega información cada 16 días, cuya resolución es de 30 metros por 30 metros y cuenta con 8 bandas espectrales en su versión número 7 y 11 para la versión siguiente, dicho satélite permite obtener una buena resolución espacial, MODIS Aqua y Terra, cuentan con 36 bandas espectrales y generan imágenes diarias, pero a una resolución de 500 metros por 500 metros.

Dado lo anterior, se considera importante estudiar una cuenca que cuente con una alta densidad de estaciones meteorológicas, tal como es la cuenca Alta del río Elquí para poder contrarrestar los resultados y poder calcular los parámetros asociados a la evapotranspiración, tales como, humedad relativa, velocidad del viento y radiación.

Se cuenta con variados estudios que relacionan temperatura del aire con la del suelo, tales como lo propuesto por Páez & Vargas (2014), Sun et al. (2014) y Aguilera (2017). También existen estudios que han abordado la generación o combinación de imágenes satelitales variando los parámetros espaciales y temporales, como el realizado para cobertura nival por Cepeda & Vargas (2016) y para incendios forestales por Borini et al. (2015).

Este trabajo busca combinar imágenes satelitales de temperatura de suelo para obtener evapotranspiración del cultivo de referencia, proponiendo metodologías las cuales pueden ser utilizadas para cualquier cuenca, y donde los valores calibrados podrían ser utilizados para cuencas sin estaciones e hidrológicamente similares.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 General**

Mejorar la resolución espacial y temporal de la estimación de evapotranspiración a través de imágenes satelitales.

### **1.2.2 Específicos**

- Proponer una metodología para estimar la distribución de temperatura media diaria de suelo usando imágenes del satélite Landsat.
- Mejorar la resolución espacial del producto temperatura media diaria del suelo entregado por los satélites MODIS Aqua y Terra.
- Determinar evapotranspiración diaria en la cuenca alta del río Elqui con alta resolución espacial para todo el periodo de estudio.

## **1.3 Organización del documento**

Este documento se organiza como se detalla a continuación:

En el Capítulo 2, se presentan los antecedentes para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo de referencia y sus variables asociadas, también se abarcan los diferentes satélites utilizados, sus productos, las metodologías de relleno de información, la parametrización de la temperatura del aire con respecto a la del suelo y el mejoramiento de resolución de las imágenes.

El Capítulo 3 presenta y describe la zona de estudio, abarcando sus características geomorfológicas, hidrometeorológicas y el uso de suelo.

En el Capítulo 4 se presenta la información disponible, las metodologías de relleno utilizadas y los resultados asociados a las diferentes variables necesarias para obtener la evapotranspiración del cultivo de referencia, es decir, en este capítulo se explica cómo se obtienen las matrices en alta resolución y para todo el periodo de estudio.

El Capítulo 5 consiste en los resultados, se presentan gráficos de evapotranspiración del cultivo de referencia medios mensuales promedio y medios anuales promedio, además se presentan las validaciones obtenidas al comparar con el satélite MOD16 y con los valores registrados por las diferentes estaciones meteorológicas.

Finalmente, en el Capítulo 6 se presentan las conclusiones, discusiones y comentarios finales del estudio, analizando el cumplimiento de los objetivos planteados al inicio y la validez de los resultados.

# Capítulo 2 : Revisión Bibliográfica

En el presente capítulo se presenta la revisión bibliográfica sobre el cálculo de la evapotranspiración del cultivo de referencia y los parámetros necesarios para su obtención, profundizando en la radiación, humedad relativa y velocidad del viento. También se analizan los productos satelitales a utilizar y las diferentes formas de obtener la información de temperatura de suelo, junto con metodologías para el relleno de información realizada por diferentes autores. Finalmente se abarca la parametrización de la temperatura del aire con respecto a la del suelo y el mejoramiento de la resolución de las imágenes satelitales.

## 2.1 Procesos físicos asociados a la evapotranspiración

Se define como evapotranspiración (ET) la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración del cultivo (FAO, 2006).

Hay variados factores que influyen en el cálculo de la evapotranspiración, tales como, la radiación, la velocidad del viento, la humedad atmosférica y la temperatura del aire. La temperatura del aire corresponde a una de las variables más importantes al momento de realizar los cálculos de evapotranspiración, ya que pequeñas variaciones de este valor significan cambios importantes en los valores obtenidos, independientes del método utilizado.

La radiación solar absorbida por la atmósfera y el calor emitido por la tierra elevan la temperatura del aire. El calor sensible del aire circundante transfiere energía al cultivo y entonces ejerce un cierto control en la tasa de evapotranspiración. En un día soleado y cálido, la pérdida de agua por evapotranspiración será mayor que en un día nublado y fresco ( FAO, 2006)

## 2.2 Cálculo de evapotranspiración

Existen variadas fórmulas de estimación de la evapotranspiración, ya sea de referencia ( $ET_0$ ) o real ( $ET_r$ ), tales como la fórmula de Thornthwaite (Thornthwaite, 1948), de Blaney-Cridle (Doorenbos & Pruitt, 1975), de Makkink (Doorenbos & Pruitt, 1975), de Turc (Comisión Nacional de Riego, 1997) y de Coutagne y también existen métodos disponibles como el método de Jensen-Haise (Rosenberg et al.,1983), el de Penman (Sánchez, 1992) y el de Penman-Monteith (FAO, 2006), siendo este último el que se mantiene como el método estándar único, validado por la FAO, para el cómputo de la  $ET_0$ , valor que corresponde a la tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia (cultivo hipotético de pasto con características específicas, sin restricciones de agua, FAO, 2006). Se determina a base de datos meteorológicos tales como radiación, temperatura del aire, humedad relativa y

velocidad del viento según se indica en la Ecuación (2.1), la cual corresponde a la Ecuación (2.1) FAO Penman-Monteith, que es una derivación del método original.

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 u_2)} \quad (2.1)$$

Donde,

- $ET_o$ : Evapotranspiración del cultivo de referencia [ $mm \cdot dia^{-1}$ ].
- $G$ : Flujo de calor de suelo [-].
- $R_n$ : Radiación neta [ $MJ \cdot dia^{-1} \cdot m^{-2}$ ].
- $T$ : Temperatura media del aire a 2m de altura [ $^{\circ}C$ ].
- $u_2$ : Velocidad del viento a 2m de altura [ $m \cdot s^{-1}$ ].
- $e_a$ : Presión real de vapor [ $KPa$ ].
- $e_s$ : Presión de vapor de saturación [ $KPa$ ].
- $\Delta$ : Pendiente de la curva de presión de vapor [ $KPa \cdot ^{\circ}C^{-1}$ ].
- $\gamma$ : Constante psicométrica [ $KPa \cdot ^{\circ}C^{-1}$ ].

La Ecuación (2.2) (FAO, 2006) permite determinar la presión de saturación de vapor a nivel diario a partir de las temperaturas extremas y los parámetros de ésta se presentan en las Ecuaciones (2.3) y (2.4).

$$e_s = \frac{(e^0(T_{max}) + e^0(T_{min}))}{2} \quad (2.2)$$

Donde,

- $T_{max}$ : Temperatura máxima [ $^{\circ}C$ ].
- $T_{min}$ : Temperatura mínima [ $^{\circ}C$ ].

$$e^0(T_{max}) = 0.6108 \cdot \exp \left[ \frac{17,27 \cdot T_{max}}{T_{max} + 237,3} \right] \quad (2.3)$$

$$e^0(T_{min}) = 0.6108 \cdot \exp \left[ \frac{17,27 \cdot T_{min}}{T_{min} + 237,3} \right] \quad (2.4)$$

Para obtener el déficit de presión de vapor es necesario obtener la presión real de vapor, la cual se calcula a partir de la Humedad Relativa media y la presión de saturación de vapor, como se muestra en la Ecuación (2.5).

$$e_a = \frac{e_s HR_{media}}{100} \quad (2.5)$$

Donde,

$HR_{media}$ : Humedad relativa media [%].  
 $e_s$ : Presión de vapor de saturación [ $kPa$ ].

La pendiente de la curva de presión de vapor corresponde a la relación entre la presión de saturación del vapor y la temperatura, calculándose según la Ecuación (2.6).

$$\Delta = \frac{4.098 [0,6108 \exp\left(\frac{17,27 T}{T + 237,3}\right)]}{(T + 237,3)^2} \quad (2.6)$$

En cuanto al flujo del calor del suelo, éste es pequeño comparado a la  $R_n$  y depende del intervalo de tiempo para el que se calcule. A continuación, se presentan las Ecuaciones (2.7) y (2.8) que corresponden a períodos diarios y para períodos mensuales planteados por la Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación (FAO) en el año 2006.

El flujo bajo la superficie de referencia es pequeño al considerar un período diario, según se muestra en la Ecuación (2.7) .

$$G_{day} \approx 0 \quad (2.7)$$

En cambio, para períodos mensuales dicho valor es considerable y la Ecuación (2.8) permite obtener el valor de G para un mes.

$$G_{mes,i} = 0,07(T_{mes,i+1} - T_{mes,i-1}) \quad (2.8)$$

Donde,

$T_{mes,i+1}$ : Temperatura media del aire en el mes  $i+1$  [ $^{\circ}C$ ].  
 $T_{mes,i-1}$ : Temperatura media del aire en el mes  $i-1$  [ $^{\circ}C$ ].

Por último, la constante psicométrica la cual se calcula a partir de la Ecuación (2.9).

$$\gamma = \frac{c_p P}{\varepsilon \lambda} = P \cdot 0,665 \cdot 10^{-3} \quad (2.9)$$

Donde,

- $P$ : Presión atmosférica [ $KPa$ ].
- $c_p$ : Calor específico a presión constante ( $1.013 \cdot 10^{-3}$ ) [ $MJ \cdot kg^{-1}$ ].
- $\varepsilon$ : Cociente del peso molecular del vapor de agua/aire seco (0.622) [-].
- $\lambda$ : Calor latente de vaporización (2.45) [ $MJ \cdot kg^{-1}$ ].

Donde la presión atmosférica se calcula en función de la altura según una simplificación de la ley de gases ideales, como se expresa en la Ecuación (2.10).

$$P = 101,3 \left( \frac{293 - 0,0065 z}{293} \right)^{5,26} \quad (2.10)$$

Donde,

- $P$ : Presión atmosférica [ $kPa$ ].
- $z$ : Elevación sobre el nivel del mar [ $m$ ].

## 2.2.1 Radiación

El proceso de la evapotranspiración está condicionado por la cantidad de energía disponible para evaporar el agua. La radiación solar es la fuente más importante de energía en el planeta y puede cambiar grandes cantidades de agua líquida en vapor de agua. La cantidad potencial de radiación que puede llegar a una superficie evaporante viene determinada por su localización y época del año. Debido a las diferencias en la posición del planeta y a su movimiento alrededor del sol, esta cantidad potencial de radiación es diferente para cada latitud y para las diversas estaciones del año. La radiación solar real que alcanza la superficie evaporante depende de la turbidez de la atmósfera y de la presencia de nubes que reflejan y absorben cantidades importantes de radiación. Cuando se determina el efecto de la radiación solar en la evapotranspiración, se debe también considerar que no toda la energía disponible se utiliza para evaporar el agua. Parte de la energía solar se utiliza también para calentar la atmósfera y el suelo (FAO, 2006).

Existen diversos tipos de radiación, pero para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo de referencia la Ecuación FAO Penman-Monteith requiere la radiación neta, la cual corresponde a la diferencia entre la radiación incidente y radiaciones salientes de longitudes cortas y largas, según muestra la Ecuación (2.11).



$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (2.11)$$

Donde,

- $R_n$ : Radiación neta [ $Mj m^{-2} dia^{-1}$ ].
- $R_{ns}$ : Radiación neta de onda corta [ $Mj m^{-2} dia^{-1}$ ].
- $R_{nl}$ : Radiación neta de onda larga [ $Mj m^{-2} dia^{-1}$ ].

Generalmente se cuenta con mediciones de radiación neta incidente de onda corta, pero en el caso de que no se cuente con dichos registros se puede calcular según la Ecuación (2.12) obtenida del manual de la Organización de las Naciones unidas para la agricultura y la alimentación (FAO, 2006).

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s \quad (2.12)$$

Donde,

- $\alpha$ : Albedo [-].
- $R_s$ : Radiación solar entrante [ $Mj m^{-2} dia^{-1}$ ].

Luego la radiación solar entrante se calcula según la Ecuación (2.13).

$$R_s = \left( a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a \quad (2.13)$$

Donde,

- $a_s$ : Constante de regresión que expresa la fracción de radiación extraterrestres que llega a la tierra en días nublados [-].
- $a_s + b_s$ : Fracción de radiación extraterrestres que llega a la tierra en días despejados ( $n = N$ ) [-].
- $\frac{n}{N}$ : Duración relativa de la insolación [-].
- $R_a$ : Radiación extraterrestre [ $Mj m^{-2} dia^{-1}$ ].

Finalmente, la radiación extraterrestre para períodos diarios se calcula según la Ecuación (2.14).

$$R_a = \frac{24 \cdot 60}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega)] \quad (2.14)$$

Donde,

- $R_a$ : Radiación extraterrestre [ $Mj m^{-2} dia^{-1}$ ].
- $d_r$ : Distancia relativa inversa Tierra-Sol [-].
- $G_{sc}$ : Constante solar (0,082) [ $Mj m^{-2} min^{-1}$ ].
- $\omega_s$ : Angulo de radiación a la puesta del sol [ $rad$ ].
- $\varphi$ : Latitud [ $rad$ ].
- $\delta$ : Declinación solar [ $rad$ ].

En cuanto a la radiación de onda larga, ésta en muy pocas ocasiones es medida, por lo que, al igual que para la radiación de onda corta, el manual FAO, (2006) propone una serie de fórmulas para obtenerla. La Ecuación (2.15) muestra cómo obtener dicho parámetro.

$$R_{nl} = \sigma \left[ \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right] (0,34 - 0,14 \sqrt{e_a}) \left( 1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (2.15)$$

Donde,

- $R_{nl}$ : Radiación neta de onda larga [ $Mj m^{-2} dia^{-1}$ ].
- $\sigma$ : Constante de Stefan-Boltzman ( $4,903 \cdot 10^{-9}$ ) [ $Mj K^{-4} m^{-2} dia^{-1}$ ].
- $T_{max}$ : Temperatura máxima diaria [ $K$ ].
- $T_{min}$ : Temperatura mínima diaria [ $K$ ].
- $e_a$ : Presión de vapor real [ $kPa$ ].
- $R_s$ : Radiación solar entrante [ $Mj m^{-2} dia^{-1}$ ].
- $R_{so}$ : Radiación en un día despejado [ $Mj m^{-2} dia^{-1}$ ].

La radiación en un día despejado se calcula según la ecuación (2.16)

$$R_{so} = (a_s + b_s) R_a \quad (2.16)$$

DeWalle & Rango (2008), proponen una manera análoga de calcular la radiación solar entrante en un día despejado, teniendo en cuenta su ubicación, pendiente y orientación, tal como se muestra en la Ecuación (2.17).

$$R_{so} = \frac{I_0}{e} \cos(Z') \quad (2.17)$$

Donde,

- $I_0$ : Constante Solar [ $Mj m^{-2} dia^{-1}$ ].
- $e$ : Radio Vector [-].
- $Z'$ : Ángulo entre el rayo del Sol y la perpendicular a la inclinación [ $^{\circ}$ ].

La constante solar corresponde al promedio de la densidad del flujo de radiación recibido fuera de la atmósfera de la Tierra perpendicular al rayo solar, su rango es de 1.360 a 1.400  $W m^{-2}$ .

### 2.2.1.1 Albedo

El albedo corresponde al porcentaje de radiación que la superficie refleja con respecto a la cual incide sobre ésta. Dicho parámetro se puede aproximar a 0,23 para una superficie de referencia de un cultivo hipotético de pasto (FAO, 2006), y existen valores estimativos dependiendo el tipo de suelo. Para aumentar la precisión del cálculo de la radiación y a su vez de la evapotranspiración del cultivo de referencia se puede obtener el albedo para la zona específica de estudio de manera remota, a partir del modelo de reanálisis atmosférico ERA Interim del European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) (Dee et al, 2011), la cual entrega el albedo en 4 horarios de cada día (00:00, 06:00, 12:00, 18:00) y en diferentes ángulos o grados de grilla (11 opciones).

Posteriormente, en la sección de metodología se explica cómo se utiliza el modelo de reanálisis atmosférico nombrado anteriormente.

### 2.2.2 Humedad Relativa

Este parámetro meteorológico corresponde a la proporción de vapor de agua real en el aire comparada con la cantidad de vapor de agua necesaria para la saturación a la temperatura correspondiente. Indica qué tan cerca está el aire de la saturación. Se mide en porcentaje entre 0 y 100, donde el 0% significa aire completamente seco y 100% aire saturado y existen diversas maneras de estimarlos a partir de valores de temperatura.

Meruane & Garreaud (2006) proponen la siguiente metodología:

- Presión parcial del vapor de agua: Cuando el aire está saturado de vapor de agua, la presión parcial del vapor de agua,  $e_s$ , depende sólo de la temperatura de acuerdo a la Ecuación (2.18) Clausius-Clapeyron.

$$e_s = 6.11 \cdot 10^{\left[\frac{7.5 \cdot T}{T+237.3}\right]} \quad (2.18)$$

Donde,

$T$ : Temperatura [ $^{\circ}K$ ].

- Humedad absoluta: Es la densidad de vapor de agua contenido en el aire a una temperatura y presión determinados (masa/volumen) y se calcula según la Ecuación (2.19).

$$\rho_V = \frac{e}{R_V \cdot T} \quad (2.19)$$

Donde,

$e$ : Presión de vapor actual [ $Pa$ ].

$R_V$ : Constante del gas de vapor de agua ( $461 [J Kg^{-1} K^{-1}]$ ).

$\rho_V$ : Humedad absoluta. Si el aire está saturado se tiene  $\rho_V = \rho_{Vs}(e_s, T)$ .

- Razón de mezcla: La razón de mezcla se define como la razón entre la densidad de vapor de agua ( $\rho_V$ ) y la densidad de aire seco ( $\rho_d$ ) tal como se muestra en la Ecuación (2.20).

$$r = \frac{\rho_V}{\rho_d} = 0.622 \cdot \frac{e}{p - e} \quad (2.20)$$

Donde,

$p$ : Presión atmosférica [ $hPa$ ].

$r$ : Razón de mezcla  $\left[\frac{kg}{kg}\right]$ . Si el aire está saturado se tiene  $r = r_s(e_s, p)$ .

- Humedad específica: La humedad específica de una muestra de aire húmedo, representa la fracción de masa de vapor de agua respecto de la masa de aire húmedo, según la Ecuación (2.21).

$$q = \frac{\rho_V}{\rho_V + \rho_d} = \frac{0.622 \cdot e}{p - 0.378 \cdot e} \quad (2.21)$$

Donde,

$q$ : Humedad específica  $\left[\frac{kg}{kg}\right]$ . Si el aire está saturado se tiene  $q = q_s(e_s, p)$ .

- Humedad relativa: Se calcula a partir de la Ecuación (2.22).

$$HR = 100 \cdot \left(\frac{r}{r_s}\right) \cong 100 \cdot \left(\frac{e}{e_s}\right) \cong 100 \cdot \left(\frac{q}{q_s}\right) \quad (2.22)$$

El manual FAO (2006) también propone un método alternativo de cálculo de humedad relativa a partir de la temperatura y la temperatura mínima, la cual consiste en:

- Humedad relativa ( $HR$ ): Expresa el grado de saturación del aire como el cociente entre la presión real de vapor ( $e_a$ ) a una temperatura dada y la presión de saturación de vapor ( $e^0(T)$ ) a la misma temperatura y se calcula según la Ecuación (2.23).

$$HR = \frac{e_a}{e^0(T)} 100 \quad (2.23)$$

- Presión de saturación de vapor: Puede ser calculada en función de la temperatura del aire, pues depende de ella. La relación entre ambas variables se expresa a partir de la Ecuación (2.24).

$$e^0(T) = 0.6108 \cdot \exp\left[\frac{17,27 \cdot T}{T + 237,3}\right] \quad (2.24)$$

Donde,

$e^0(T)$ : Presión de saturación de vapor a la temperatura del aire,  $T$  [kPa].

$T$ : Temperatura del aire [°C].

- Presión real de vapor ( $e_a$ ): Se supone que la temperatura del punto de rocío ( $T_{rocío}$ ) es similar a la temperatura mínima diaria ( $T_{min}$ ). Se considera implícitamente que, a la salida del sol, cuando la temperatura del aire está alrededor de  $T_{min}$ , el aire está casi saturado con vapor de agua y que la humedad relativa es de alrededor de 100%. Si  $T_{min}$  se utiliza para representar  $T_{rocío}$  entonces se calcula según la Ecuación (2.25).

$$e_a = e^0(T_{min}) = 0.611 \cdot \exp\left[\frac{17,27 \cdot T_{min}}{T_{min} + 237,3}\right] \quad (2.25)$$

Donde,

$T_{min}$ : Temperatura mínima del aire [°C].

La relación  $T_{rocío} \approx T_{min}$  se mantiene para localidades en que el cultivo que cubre el suelo de la estación está bien regado. Sin embargo, particularmente en regiones áridas, el aire no está saturado cuando la temperatura está en el mínimo. Por ello,  $T_{min}$  puede ser mayor que  $T_{rocío}$  y se necesita otra calibración para estimar la temperatura del punto de rocío.

### 2.2.3 Velocidad del Viento

En el año 2010, el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile desarrolla el producto llamado el explorador eólico, disponible online y de manera gratuita, que proporciona la información grillada de la velocidad del viento a 5 metros de altura. Estas simulaciones fueron realizadas usando el modelo WRF (Weather Research and Forecasting), con alta resolución en la horizontal (1 Km) como en la vertical (10 metros), y el modelo simuló el viento durante un año completo (2010). Estos resultados han sido validados con observaciones de viento en más de 350 sitios a lo largo de Chile.

Actualmente se encuentra en proceso la actualización de dicho modelo, entre los años 1980 a 2016, la información se encuentra grillada a los 10 metros de altura y cada 5 grados.

Como el explorador eólico entrega valores a 5 metros de altura, pero generalmente las estaciones miden a 2 metros y el cálculo de evapotranspiración del cultivo de referencia requiere la misma altura, es necesario utilizar un factor de conversión presente en el manual de la FAO (2006), el cual corresponde al que se muestra en la Ecuación (2.26).

$$u_2 = u_z \cdot \frac{4,87}{\ln(67,8 \cdot z - 5,42)} \quad (2.26)$$

Donde,

- $u_2$ : Velocidad del viento a 2 m sobre la superficie [ $m \cdot s^{-1}$ ].
- $u_z$ : Velocidad del viento medida a  $z$  m sobre la superficie [ $m \cdot s^{-1}$ ].
- $z$ : Altura de medición sobre la superficie [ $m$ ].

Lo anterior se ve representado en la Figura 2.1.

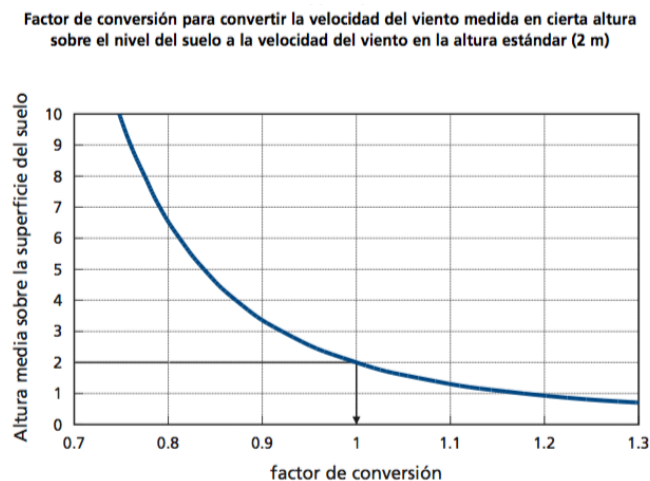


Figura 2.1: Factor de conversión para la velocidad del viento. Fuente: FAO, 2006.

## 2.3 Imágenes Satelitales MODIS

Los satélites MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) corresponden a dos instrumentos lanzados por la NASA, los cuales proporcionan imágenes satelitales de diferentes propiedades acuáticas y terrestres. El satélite TERRA fue el primero en ser despedido de la superficie terrestre en 1999, para ser seguido en 2002 por el satélite AQUA.

Las imágenes MODIS son generadas con frecuencia diaria por cada uno de estos satélites, pero desfasados entre sí en 12 horas (TERRA obtiene imágenes durante el día y AQUA durante la noche). Dichas imágenes de resolución moderada son generadas a través de espectrometrías, adquiriendo datos en 36 bandas espectrales, desde longitudes de onda de 0,4  $\mu\text{m}$  hasta 14,4  $\mu\text{m}$ . Esta información se traduce en diferentes características de la superficie de la tierra, tales como, reflectabilidad de la superficie, manto nival y mares de hielo, cobertura de la superficie, dinámica, índice de vegetación, índice de área de hojas, anomalías térmicas y/o incendios, productividad primaria bruta, albedo, campo continuo de vegetación, área quemada y finalmente, temperatura de la superficie terrestre (LST).

### Producto de la temperatura de la superficie terrestre (LST)

El producto temperatura de la superficie terrestre es obtenido en pixeles de 500 mts, generado por un algoritmo de ventanas separadas (Split-window) y una grilla de 6 km por el algoritmo día-noche. En el algoritmo de ventanas separadas, la emisividad en las bandas 31 y 32 son estimadas desde los diferentes tipos de cobertura terrestre, donde el vapor de agua en la columna atmosférica y la temperatura límite inferior de la columna de aire son separados en sub rangos manejables para una mejor obtención de información. En el algoritmo día-noche, durante el día y la noche la LST y la emisividad de la superficie terrestre son extraídas a partir del par de imágenes día y noche de las capturas de MODIS en siete bandas Termal Infrarrojas (TIR)<sup>1</sup>.

Diversos autores han realizado relleno de pixeles para imágenes MODIS, para la utilización de diferentes bandas o productos, a continuación, se presentan las principales metodologías utilizadas.

### Relleno de pixeles sin información

Cepeda & Vargas (2016) realizan el relleno de imágenes MODIS para áreas nivales, donde utilizan la siguiente metodología:

- Criterio temporal: Un pixel sin información se rellena con el promedio de los dos días siguientes en el caso que llueva el día a rellenar, y con el promedio entre los dos días anteriores y dos posteriores, en caso contrario.

---

<sup>1</sup> MODIS Land, National Aeronautics and Space Administration (<https://www.nasa.gov>).

- Criterio espacial: El valor del pixel representa el promedio de los 8 pixeles vecinos que tengan información.

Páez (2012) para estimar la temperatura del aire, utiliza las imágenes MODIS Terra y Aqua, para las cuales realiza el relleno de la siguiente manera. En primer lugar, selecciona la temperatura de la imagen de día (o noche) entre las imágenes de los satélites MODIS/TERRA y MODIS/AQUA; si hay información en ambas se elige el promedio, en el caso que sólo una presente información se elige sólo la que tenga, en el caso que no haya información se deja vacía.

Cornwell (2012) realiza el post-procesamiento de las imágenes satelitales MODIS, Terra y Aqua, para obtener la cobertura nival y el albedo nival, para eso realiza 4 pasos los cuales le permiten rellenar todos los pixeles de las imágenes, dichos pasos se muestran a continuación:

- Paso 1: Unificación de imágenes Terra y Aqua: Se crea una serie de imágenes con el promedio de MOD (Código imagen Terra) y MYD (Código imagen Aqua) en el caso de que ambos pixeles tengan un valor válido, el valor de MOD si el pixel en cuestión es null para MYD, el valor de MYD si el pixel en cuestión es null para MOD y null si para ambas imágenes el pixel es null.
- Paso 2: Promedio espacial por pixel de la serie: Se crea una serie de imágenes que asigna el promedio de los pixeles circundantes distintos de null si, al menos, existe un pixel circundante válido.
- Paso 3: Promedio temporal por pixel de la serie: Se crea una serie de imágenes que asigna un promedio temporal sobre los valores null de la serie, tomando el mismo pixel para días contiguos de manera que éste sea válido. Estos promedios temporales deben ser asignados de manera lineal, es decir, en proporción a la distancia temporal relativa del pixel rellenado (i, j) en el intervalo definido por las imágenes con el pixel (i, j) con valor real más cercano.
- Paso 4: Completar pixeles fallidos restantes: Se crea la serie que rescata los valores por pixel de la serie del paso 3, reemplazando los nulos restantes por el promedio de los pixeles válidos (dentro de la cuenca).

Gafurov & Bárdossy (2009) proponen una metodología de 6 pasos para la estimación de pixeles fallidos en zonas de alta montaña, metodología la cual se basa el post procesamiento de las imágenes satelitales MODIS de cobertura nival, dicha metodología incorpora consideraciones fisiográficas y se presenta a continuación de manera resumida.



- Paso 1: Combinación de los satélites Aqua y Terra: Se maximiza la posibilidad de obtener información despejada. Si un solo satélite registra información se utiliza la de dicho satélite.
- Paso 2: Promedio temporal por pixel de la serie: Si se tiene información uno o dos días hacia adelante se rellena con dicha información, chequeando primero un día de lejanía y luego el segundo. Tienen que tener ambos días (hacia adelante y hacia atrás) información para ser rellenos.
- Paso 3: Busca el límite de altura donde se encuentra la nieve (línea de nieve) y básicamente, con una serie de restricciones, asume que sobre esa altura todos los pixeles tienen nieve y bajo esta todos están cubiertos de tierra.
- Paso 4: Promedio espacial: Si 3 de los 4 pixeles circundantes tienen información de tierra o nieve, se asume dicha condición.
- Paso 5: Asume que, teóricamente, si un pixel está cubierto por nieve y algún vecino superior está cubierto por nieve, entonces el pixel que le sigue hacia arriba también debería estarlo.
- Paso 6: Se basa en la información anual de cada pixel, una vez que el pixel se encuentra con nieve comienza el periodo llamado “partida de acumulación de nieve” y una vez que se derrite comienza el periodo “deshielo completo”, por lo que identifica dichos procesos y le asigna a cada pixel con nieve, cuando se encuentra en el primer periodo y sin nieve cuando se encuentra en el segundo.

## 2.4 Imágenes satelitales Landsat

Los satélites Landsat corresponden a una serie de 8 instrumentos (hasta ahora) lanzados por Estados Unidos, el primero de estos corresponde a Landsat 1 lanzado en 1972 y el último a Landsat 8 lanzado en 2013. Actualmente se encuentran solo dos en servicio, correspondientes al 7 y 8, mientras que del 1 al 5 se encuentran fuera de servicio y el número 6 tuvo un lanzamiento fallido.

Los satélites Landsat están diseñados para el monitoreo de los recursos terrestres de manera más precisa y detallada, además busca la obtención de imágenes con la menor nubosidad posible. Estos satélites están compuestos por 7 u 8 bandas espectrales y obtienen imágenes de resoluciones espaciales desde los 120 a 15 metros.

## Obtención de temperatura de suelo para imágenes satelitales Landsat

A diferencia del satélite MODIS, Landsat no entrega el producto de temperatura de superficie terrestre calculada, pero a partir de las diferentes bandas que captura el satélite se puede obtener. A continuación, se presentan diferentes propuestas y fórmulas para el cálculo de dicho parámetro.

Jiménez-Muñoz & Sobrino (2003) recopilan distintos algoritmos que permiten una estimación de la temperatura de superficie terrestre donde la base teórica de los algoritmos es la ecuación de transferencia radiativa aplicada a la región del infrarrojo térmico, que se presenta en la Ecuación (2.27).

$$L_{sen} = [\varepsilon B(T_s) + (1 - \varepsilon)L^\downarrow]\tau + L^\uparrow \quad (2.27)$$

Donde,

- $L_{sen}$ : Radiancia medida por el sensor [ $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ ].
- $\varepsilon$ : Emisividad de la superficie [-].
- $B$ : Ley de Planck [-].
- $T_s$ : Temperatura de la superficie terrestre [ $^{\circ}K$ ].
- $L^\downarrow$ : Radiancia atmosférica descendente [ $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ ].
- $\tau$ : Transmisividad atmosférica [-].
- $L^\uparrow$ : Radiancia atmosférica ascendente [ $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ ].

El algoritmo monocanal de Qin, Karnieli, & Berliner (2001) permite obtener LST a partir de la Ecuación (2.28), donde existe dependencia de la temperatura atmosférica media, para la cual generaron aproximaciones lineales con el vapor de agua y la temperatura del aire:

$$T_s = \frac{1}{C_6} \{a_6(1 - C_6 - D_6) + [b_6(1 - C_6 - D_6) + C_6 + D_6]T_6 - D_6T_a\} \quad (2.28)$$

Donde,

- $C_6 = \varepsilon_6 \tau_6$  [-].
- $D_6 = (1 - \tau_6)[1 + (1 - \varepsilon_6)\tau_6]$  [-].
- $a_6 = 67.355351$  [-].
- $b_6 = 0.458606$  [-].
- $T_a$ : Temperatura atmosférica media [ $^{\circ}K$ ].

Jiménez-Muñoz & Sobrino (2003) desarrollaron un algoritmo monocanal generalizado, en principio aplicable a cualquier banda térmica con un ancho de banda entre aproximadamente 0,5 y 1,5  $\mu m$ . Este algoritmo monocanal viene dado por la Ecuación (2.29).

$$T_s = \gamma \left[ \frac{1}{\varepsilon} (\varphi_1 L_{sen} + \varphi_2) + \varphi_3 \right] + \delta \quad (2.29)$$

Donde,

- $L_{sen}$ : Radiancia [ $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m$ ].
- $\gamma$ : Parámetro que pueden obtenerse a partir de  $L_{sen}$  o temperatura de brillo del sensor [-].
- $\delta$ : Parámetro que pueden obtenerse a partir de  $L_{sen}$  o temperatura de brillo del sensor [-].
- $\varphi_1$ : Función atmosférica 1 [-].
- $\varphi_2$ : Función atmosférica 2 [-].
- $\varphi_3$ : Función atmosférica 3 [-].

Para calcular la temperatura de brillo del satélite, la cual posteriormente permite calcular la temperatura de suelo, es necesario calcular la radiancia espectral del sensor en el techo de la atmosfera  $L_\lambda$ , en inglés TOA (Top Of Atmosphere) spectral radiance, la cual corresponde a el porcentaje de radiación incidente reflejada por una superficie bidimensional (Chuvieco, 2002) la que se calcula según la Ecuación (2.30).

$$L_\lambda = \left( \frac{L_{max\lambda} - L_{min\lambda}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}} \right) \cdot (Q_{cal} - Q_{calmin}) + L_{min\lambda} \quad (2.30)$$

Donde,

- $L_\lambda$ : Radiancia espectral del sensor [ $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m$ ].
- $Q_{cal}$ : Valor del número digital (DN) [-].
- $Q_{calmin}$ : Valor mínimo del número digital (DN) [-].
- $Q_{calmax}$ : Valor máximo del número digital (DN) [-].
- $L_{max\lambda}$ : Radiancia espectral escalada por  $Q_{calmax}$  (Depende de la banda) [ $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m$ ].
- $L_{min\lambda}$ : Radiancia espectral escalada por  $Q_{calmin}$  (Depende de la banda) [ $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m$ ].

A la radiancia espectral calculada anteriormente es necesario aplicarle la corrección atmosférica, donde se utiliza el método de extracción de objetos oscuros (Dark Object Subtraction), para las bandas del satélite Landsat. Song et al (2001) plantea la Ecuación (2.31) para la corrección del satélite Landsat.

$$L_t = \frac{L_\lambda - \left( L_{dark} - 0.01 \cdot \left( \frac{E_{sun} \cdot \sin(e) + E_{sky}}{\pi \cdot d^2} \right) \right)}{\frac{E_{sun} \cdot \sin(e) + E_{sky}}{\pi \cdot d^2}} \quad (2.31)$$

Donde,

- $L_t$ : Reflectancia corregida atmosféricamente [–].  
 $L_{dark}$ : Radiancia calculada de los objetos oscuros (Para cada banda) [ $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ ].  
 $E_{sky}$ : Irradiancia difusa del cielo [ $W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$ ].  
 $E_{sun}$ : Irradiancia exoatmosférica del sol [ $W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$ ].  
 $d$ : Distancia entre la tierra y el sol [ua].  
 $e$ : Angulo de elevación del sol [°].

La última corrección necesaria se aplica únicamente a las imágenes de Landsat 4-5, debido a que Landsat 8 la tiene incorporada; dicha corrección es topográfica y ésta se realiza mediante el método del Factor C, según lo planteado por Meyer (1993) en las Ecuaciones (2.32) y (2.33).

$$L_H = L_t \frac{\cos(z) + c}{\cos(i) + c} \quad (2.32)$$

Donde,

$$c = \frac{b}{m} \text{ en la ec. } L_t = b + m \cdot \cos(i) \quad (2.33)$$

- $L_H$ : Reflectancia corregida topográficamente [–].  
 $z$ : Zenith [°].  
 $i$ : Ángulo de incidencia del sol [°].

Luego, es necesario calcular la emisividad de la superficie de la tierra (LSE), la cual se puede estimar a partir de NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), el cual corresponde a un índice de vegetación muy versátil para la evaluación de la vegetación y la dinámica de cambio de cobertura, la cual se calcula mediante el álgebra de bandas, según la Ecuación (2.34).

$$NDVI = \frac{NIR - VIS}{NIR + VIS} \quad (2.34)$$

Donde,

- $NIR$ : Banda de Rojo Visible [–].  
 $VIS$ : Banda de Infrarrojo Cercano [–].

Como se explicó anteriormente las imágenes satelitales Landsat 4-5 están compuestas por 7 bandas y las de Landsat 8, por 11 bandas, para obtener la el NDVI, son necesarias dos de estas bandas. Para Landsat 4-5 la NIR corresponde a la banda 4 y VIS a la banda 3, en cambio para el satélite en su versión 8, NIR corresponde a la banda 5 y VIS a la banda 4.

Finalmente, la forma más precisa de calcular la emisividad es por rangos, (Zhang, Wanga, & Lib, 2006), según se propone en la metodología expuesta en la Tabla 2.1.

**Tabla 2.1: Valores de emisividad asociados al índice NDVI. Fuente: Zhang, 2006**

NDVI	Land surface emissivity ( $\epsilon_i$ )
NDVI < -0.185	0.995
-0.185 ≤ NDVI < 0.157	0.970
0.157 ≤ NDVI ≤ 0.727	1.009 4 + 0.047ln(NDVI)
NDVI > 0.727	0.990

A partir de la emisividad es posible estimar la temperatura de brillo en el satélite,  $T_B$ , según la Ecuación (2.35), paso previo a obtener la temperatura superficial del suelo. Dicho procedimiento, al igual que el para obtener la LST, se realiza según lo planteado por Weng et al. (2004), planteamiento el cual también es validado por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (U.S.G.S.).

$$T_B = \frac{K_2}{\ln\left[\left(\frac{K_1}{L_\lambda}\right) + 1\right]} \quad (2.35)$$

Donde,

$K_1$ : Constante de conversión térmica específica de la banda [ $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ ].

$K_2$ : Constante de conversión térmica específica de la banda [ $^{\circ}K$ ].

$L_\lambda$ : Radiancia espectral en el sensor [ $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ ].

Finalmente es posible obtener la temperatura de suelo a partir de la temperatura de brillo y la emisividad, a través de la Ecuación (2.36).

$$T = \frac{T_B}{1 + (\lambda \cdot \frac{T_B}{C_2}) \cdot \ln(\epsilon)} \quad (2.36)$$

Donde,

$\lambda$ : Longitud de onda de la radiancia emitida [ $\mu m$ ].

$C_2 = 14388$  [ $\mu m K$ ].

A partir de lo desarrollado anteriormente se puede obtener la temperatura superficial de suelo para cada imagen, con lo que se obtiene toda la información requerida para obtener la temperatura del aire.

## 2.4 Parametrización de las temperaturas del aire con respecto al suelo

Para parametrizar la relación entre la temperatura del aire registrada en las estaciones y la temperatura del suelo obtenida para el período de estudio se cuentan con las metodologías propuestas por Páez & Vargas (2014), Sun et al. (2014) y Aguilera (2017), este último citando Williamson et al.. Estos tres autores sugieren generar relaciones lineales entre la temperatura del aire y la imagen satelital que registra temperatura del suelo según la Ecuación (2.37).

$$T_{aire} = A \cdot T_{modis} + B \pm \sigma \quad (2.37)$$

Donde,

$T_{aire}$ :	Temperatura del aire obtenida [ $^{\circ}C$ ].
$T_{modis}$ :	Temperatura obtenida del satélite [ $^{\circ}C$ ].
$A$ :	Pendiente de la regresión [-].
$B$ :	Coefficiente de posición de la regresión [-].
$\sigma$ :	Desviación estándar de la regresión [-].

Páez (2012) sugiere que para calibrar y validar el modelo es óptimo considerar  $\sigma = 0$  en la Ecuación (2.37), mientras que para la generación  $\sigma \neq 0$ , la cual representa la desviación estándar de los errores.

En la sección de metodología se utiliza la parametrización propuesta anteriormente.

## 2.5 Mejoramiento de la resolución de las imágenes

El objetivo principal de esta sección consiste en obtener las temperaturas en frecuencia diaria y en buena resolución, esto combinando la frecuencia diaria entregada por el satélite MODIS y la buena resolución de los píxeles de las imágenes Landsat. Diversos autores han propuesto metodologías para estos efectos y, a continuación, se explican los que realizan trabajos aplicables al caso de estudio.

Cepeda & Vargas (2016) plantean una metodología para obtener un nuevo producto de cobertura nival en base a los satélites MODIS y Landsat, la cual consiste en, posterior a su procesamiento, calcular una matriz de probabilidad de presencia de nieve (de 30 m de resolución espacial) a partir de un análisis espacio-temporal del índice NDSI obtenido de las imágenes Landsat en los días donde MODIS también está disponible. Como cada píxel de MODIS sólo tiene la fracción cubierta por nieve, ésta se distribuye en el espacio considerando los píxeles de la matriz de probabilidad contenidos en él. Para ello se crea una nueva matriz binaria, de 30 m de resolución espacial, asignando nieve a los píxeles de mayor probabilidad hasta completar el valor FSCA de cada píxel MODIS. Finalmente, al aplicar este método a las imágenes MODIS, es posible obtener un producto indicador de presencia de nieve a escala

diaria y de 30 metros de resolución espacial.

Borini et al. (2015) realizan el fusionamiento de imágenes satelitales MODIS (Terra) y Landsat bajo el contexto del análisis de un incendio forestal, a través del algoritmo STARFM; un algoritmo de fusión que simula imágenes con la resolución espacial de Landsat a partir de los registros diarios de reflectividad de MODIS. Este algoritmo opera en base a un análisis de vecindad (ventana móvil) en el que se establece una ponderación entre píxeles espectralmente similares en la imagen de baja resolución MODIS y la imagen de media resolución Landsat. De este modo, dado un par de imágenes Landsat-MODIS adquiridos en  $t_0$  (par predictor) y una imagen MODIS adquirida en  $t_k$  (fecha simulada), STARFM simula la reflectividad en  $t_k$  con la resolución espacial de Landsat (Gao, Masek, Schwaller & Hall, 2006)

A continuación, se presentan otras cuatro metodologías relacionadas con distribución espacial de variables.

- Kriging: Corresponde a un método geo-estadístico de estimación de puntos, el cual utiliza un modelo de variograma para la obtención de los ponderadores que se darán a cada punto de referencias usados en la estimación. Esta técnica de interpolación se basa en el supuesto de que la variación espacial continúa con el mismo patrón. (Emery, 2000).
- Cokriging: Este método estadístico es una extensión del Kriging en donde se estima una variable no solo a partir de las mediciones de esta, sino que también considerando las variables correlacionadas con ella. Es necesario que no existan datos duplicados y que las variables sean linealmente independientes de los sitios con datos. Comparte las mismas propiedades que el kriging (Emery, 2000).
- Inverso de la distancia ponderado: Corresponde a un método de distribución espacial que estima los valores dependiendo de su localización, con base en la asignación de “pesos” a los datos del entorno en función inversa a la distancia que los separa el punto en cuestión. De esta manera, los puntos más próximos al centroide intervienen de manera más relevante en el cálculo del valor definitivo para ese punto (Emery, 2000) .
- Wavelets: Las wavelets se generan a partir de la teoría de aproximación de funciones, lo que corresponde a una consecuencia de la transformada de Fourier. Este método permite estudiar y descomponer señales no estacionarias que pueden ser incluso discontinuas (Otondo, 2004).

- **Redes Neuronales:** Son una herramienta computacional que emula el funcionamiento de las redes neuronales del cerebro. Una característica atractiva de las redes neuronales es la capacidad de extraer la relación de las entradas y salidas de un proceso, sin conocer explícitamente la naturaleza física del problema de tal forma que el resultado es usado para transmitirlo a lo largo de la red y dar una señal de salida. Actualmente existen muchos modelos para la generación y previsión de caudales, precipitaciones y evaporaciones producidas en una determinada zona los cuales son usados en el planeamiento de los sistemas de gestión de recursos hídricos. (Kohonen, 1989)



# Capítulo 3 : Caracterización de la zona y período de estudio

La cuenca alta del río Elqui, que se aprecia en la Figura 3.1, se define por la estación fluviométrica de la Dirección General de Aguas (DGA), Elqui en Algarrobal, ubicada aproximadamente a 3 km aguas abajo de la confluencia del río Claro y el río Turbio, a 65 km de la ciudad de la Serena, IV región de Coquimbo, Chile, siendo sus coordenadas UTM 6680234 Norte y 346946 Este.

Los dos principales cursos de agua corresponden a los ríos Turbio y al río Claro; el primero de estos nace de la confluencia entre el río La Laguna y El Toro, en cambio el río Claro nace en la alta cordillera y posee como único afluente el río Incaguaz.

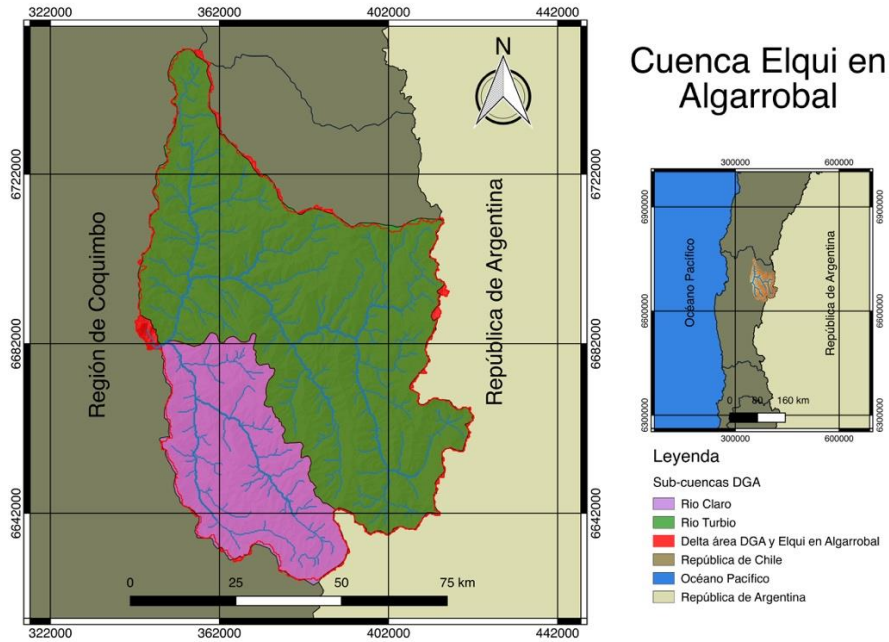
## 3.1 Parámetros Geomorfológicos

A partir de los dos cursos cauces principales se pueden definir dos sub-cuencas, de la misma manera que las define la DGA, donde la subcuenca del río Turbio posee un área aportante de 4.186 Km<sup>2</sup> y la del río Claro 1.534 km<sup>2</sup>. Existe una pequeña porción que no está incluida en las sub-cuencas anteriores, la cual corresponde a la parte más baja de la cuenca, parte de la subcuenca Elqui Medio y de la subsubcuenca Río Elqui entre junta ríos Turbio y Claro y bajo la quebrada de Leiva, cuya área aportante corresponde a 3 km<sup>2</sup> aproximadamente. Finalmente, el área total drenada por la cuenca es de 5.723 km<sup>2</sup>.

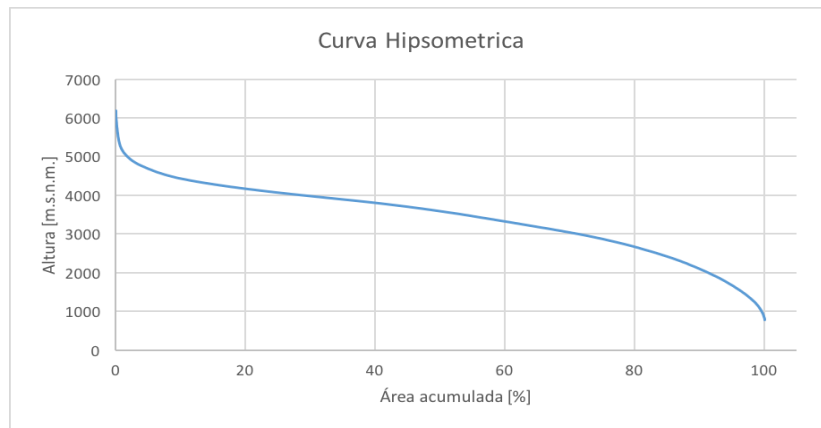
La Figura 3.1 presenta una imagen de la cuenca delimitada, con los principales cursos de agua y las sub-cuencas definidas por la DGA y la diferencia de áreas entre dichas cuencas y la definida por el software QGIS.

La pendiente media de la cuenca alta del río Elqui es de 25,9%, en la sub-cuenca Río Turbio se genera la pendiente máxima de toda cuenca, la cual corresponde a un 75% y su pendiente media es de 25,5%, en cambio en la sub-cuenca Río Claro posee una pendiente máxima de 68,1% y su pendiente media corresponde a 27%. En el Anexo A se presenta un mapa de pendientes de toda la cuenca.

La altura mínima presente en la cuenca corresponde a 774 m.s.n.m. y el valor máximo presente es de 6.184 m.s.n.m., en la Figura 3.2 se presenta la curva hipsométrica de la cuenca. Al tratarse de una cuenca alta, esta posee gran porcentaje de su área en altura, donde más del 70% del área se encuentra sobre los 3.000 m.s.n.m.



**Figura 3.1: Subcuencas Elqui en Algarrobal.**



**Figura 3.2: Curva Hipsométrica Elqui en Algarrobal.**

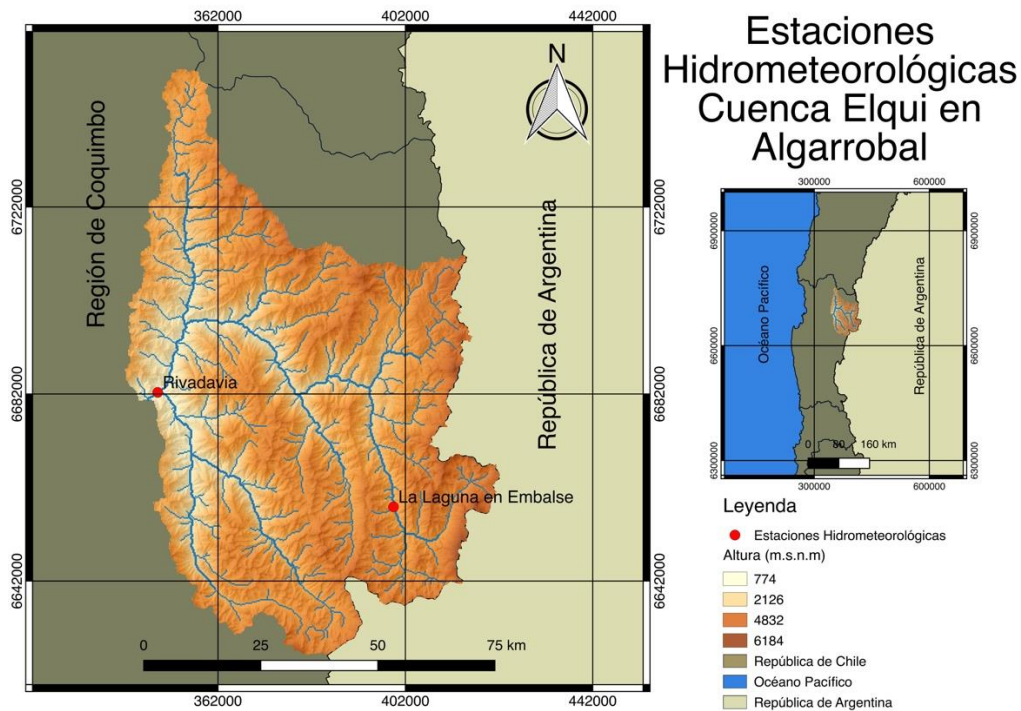
## 3.2 Clima

Al tratarse de una cuenca alta, se producen dos tipos de climas, dependiendo de la altura:

- Clima de estepa cálido: Se produce sobre los 800 metros de altura, se caracteriza por la ausencia de nubosidad y la sequedad del aire. Presenta precipitaciones poco abundantes, lo que produce que los períodos de sequía sean característicos (DGA, 2004).
- Clima templado frío de altura: Se produce sobre los 3.000 metros de altitud en la cordillera de los Andes. Presenta altas precipitaciones, bajas temperaturas y nieves

permanentes, lo que se traduce en un aporte significativo de caudal durante el período estival (DGA, 2004).

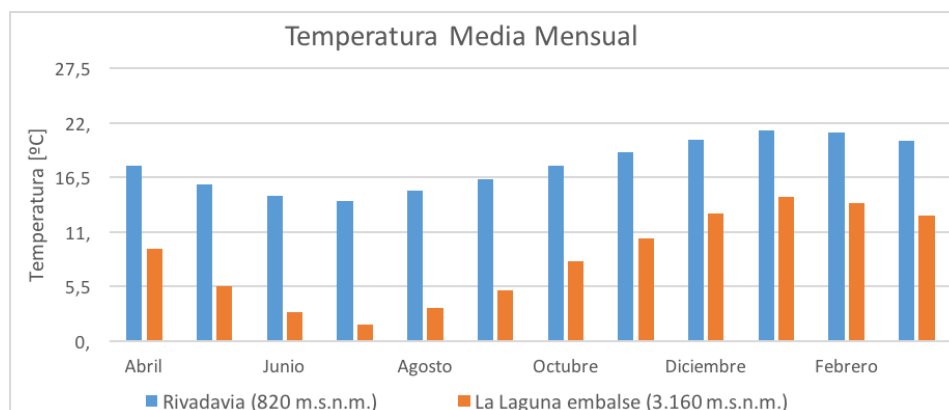
Para caracterizar los cambios de la temperatura y las precipitaciones según la altura en la cuenca se analizaron las temperaturas medias mensuales de 2 estaciones hidrometeorológicas DGA, desde los años hidrológicos 2000-2001 a 2015-2016, la primera estación corresponde a Rivadavia, la cual se encuentra a 820 m.s.n.m. y la segunda, Laguna en Embalse, se encuentra en la zona más cordillerana a 3.160 m.s.n.m. En la Figura 3.3 se ubican dichas estaciones en la cuenca.



**Figura 3.3: Estaciones hidrometeorológicas Elqui en Algarrobal.**

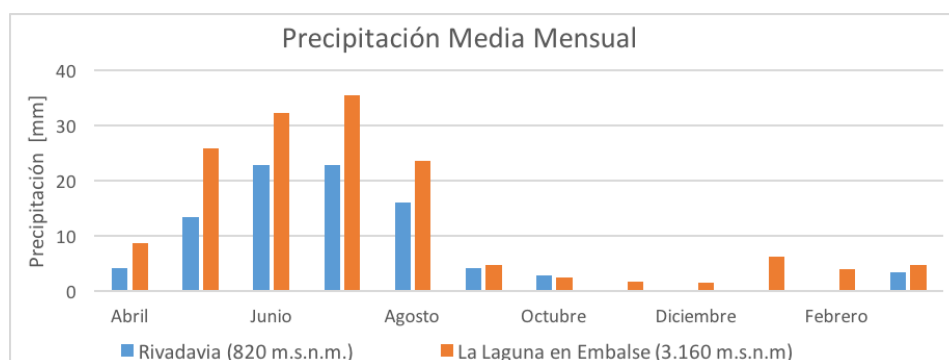
Como se puede observar en la Figura 3.4 existe un marcado gradiente de temperatura, el cual es generado por las diferencias de cotas que se pueden encontrar en la cuenca.

La temperatura media anual, en el periodo 2000-2016, de la parte baja de la cuenca es de 18°C (estación Rivadavia) mientras que la de la parte alta (estación la Laguna en Embalse) es de 8°C. Ambas estaciones presentan grandes cambios de temperatura entre los períodos de verano e invierno, pero como es de esperarse, las temperaturas de la parte alta son bastante inferiores a las de la parte baja.



**Figura 3.4: Distribución temperatura media mensual en el período 2000-2016.**

Para caracterizar las precipitaciones de la cuenca alta del río Elqui, se grafican en la Figura 3.5 las precipitaciones medias mensuales de las 2 estaciones meteorológicas DGA nombradas anteriormente. Las precipitaciones en la parte alta (estación la Laguna en Embalse) son mayores que las de la parte baja (estación Rivadavia) pero hay que tener en cuenta que dichas estaciones solo miden precipitaciones líquidas, por lo que los valores anteriores no son representativos de la acumulación de agua de la cuenca.



**Figura 3.5: Distribución precipitación media mensual en el período 2000-2016.**

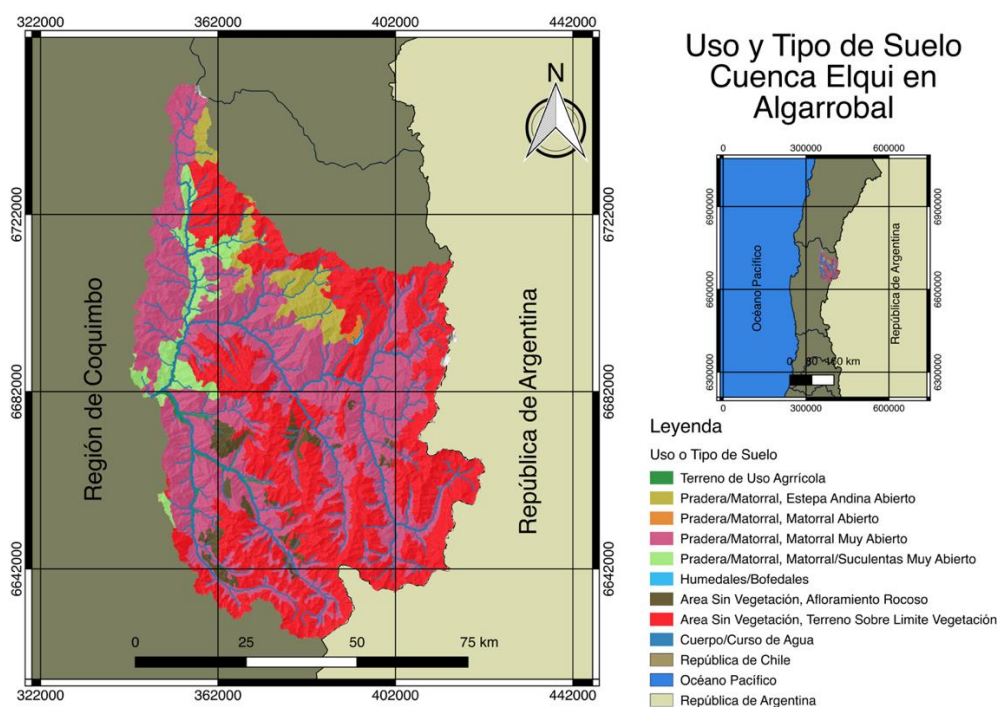
### 3.3 Uso de suelo

Al tratarse de una cuenca alta los terrenos productivos son muy pequeños. El uso agrícola se ubica en la cercanía de los cuerpos de agua, principalmente en algunos sectores del río Claro y el río Cochiguaz, afluente de este último.

Tal como se aprecia en la Figura 3.6, existen dos tipos de uso de suelo que abarcan casi la totalidad de la superficie de la cuenca, las Praderas o Matorrales y las Áreas sin vegetación, las cuales en conjunto abarcan un 98,4% de área de la cuenca, el resto corresponde a áreas cultivables, cuerpos de agua y humedales, en un mínimo porcentaje. A continuación, se muestra la Tabla 3.1 con dicha distribución y el mapa asociado en la Figura 3.6.

**Tabla 3.1: Distribución uso y tipo de suelo. Fuente: IDE CIGIDEM (2016).**

Uso o Tipo de Suelo	Área [km <sup>2</sup> ]	Porcentaje [%]
Terrenos de Uso Agrícola	64,3	1,12
Pradera o Matorral, Estepa Andina Norte	263,7	4,61
Pradera o Matorral, Matorral Abierto	12,0	0,21
Pradera o Matorral, Matorral Muy Abierto	2.555,9	44,66
Pradera o Matorral, Matorral-Suculentas Muy Abierto	269,7	4,71
Humedal o Bofedal	3,0	0,05
Área sin Vegetación, Afloramientos Rocosos	157,2	2,75
Área sin Vegetación, Terrenos Sobre Limite Vegetación	2.395,8	41,86
Cuerpo o Curso de Agua	1,5	0,03
TOTAL	5.723	100



**Figura 3.6: Uso y tipo de suelo Elqui en Algarrobal.**

### 3.4 Estaciones Meteorológicas

Con el fin de seleccionar las estaciones meteorológicas útiles para este estudio, se realiza un catastro para poder seleccionar las que poseen información útil de temperatura del aire y posteriormente serán utilizadas para generar correlaciones. El período de estudio está definido por la disponibilidad de información satelital al momento de la descarga, la cual corresponde desde 04-07-2002 hasta 31-07-2016 (Producto MOD16).

La Tabla 3.2 muestra una lista de las estaciones presentes en la cuenca alta del río Elqui.

**Tabla 3.2: Estaciones Elqui en Algarrobal.**

<b>Estación</b>	<b>Fuente</b>	<b>Inicio Registro</b>	<b>Fin Registro</b>	<b>Abarca periodo</b>
Juntas*	DGA	31-12-89	Vigente	Si
Rivadavia*	DGA	31-12-36	Vigente	SI
La Ortiga*	DGA	31-12-78	Vigente	Si
La Laguna Embalse*	DGA	31-12-63	Vigente	Si
Cerro Olivares*	DGA	30-05-74	Vigente	Si
Huanta*	DGA	31-03-89	Vigente	Si
Cochihuaz*	DGA	31-03-89	Vigente	Si
Los Nichos*	DGA	31-12-76	Vigente	Si
Pisco Elqui*	DGA	31-12-76	Vigente	Si
Monte Grande*	DGA	31-08-58	Vigente	Si
Rio Turbio en Varillar	DGA	01-09-16	18-03-17	No
Rio Toro Antes Junta Río la Laguna	DGA	01-09-16	28-03-17	No
Rio Claro en Rivadavia	DGA	02-09-16	28-03-17	No
El indio	DGA	30-04-83	01-12-99	No
Molino Yaco	DGA	31-08-58	01-11-65	No
Alto del toro muerto	DGA	30-06-74	01-09-80	No
Mina el indio	DGA	30-06-81	01-01-00	No
Pisco Elqui*	CEAZA	01-02-04	Vigente	Si
Los Corrales	CEAZA	01-02-16	01-03-16	No
Llano de las liebres	CEAZA	01-02-16	01-01-17	No
La laguna (Elqui)*	CEAZA	01-06-13	01-01-17	Si
Estero Derecho	CEAZA	01-08-16	Vigente	Si
Llanos de Huanta*	CEAZA	01-09-10	01-12-16	Si
El Tapado*	CEAZA	21-11-13	Vigente	Si
Rivadavia*	CEAZA	23-09-10	Vigente	Si
Paso Aguas Negras*	CEAZA	04-06-14	Vigente	Si

Finalmente son 16 las estaciones (\*) con información disponible en el período de estudio (o en gran parte de éste), posteriormente se analiza cuales poseen información de cada parámetro. En la Figura 3.7 se muestra un mapa con dichas estaciones.

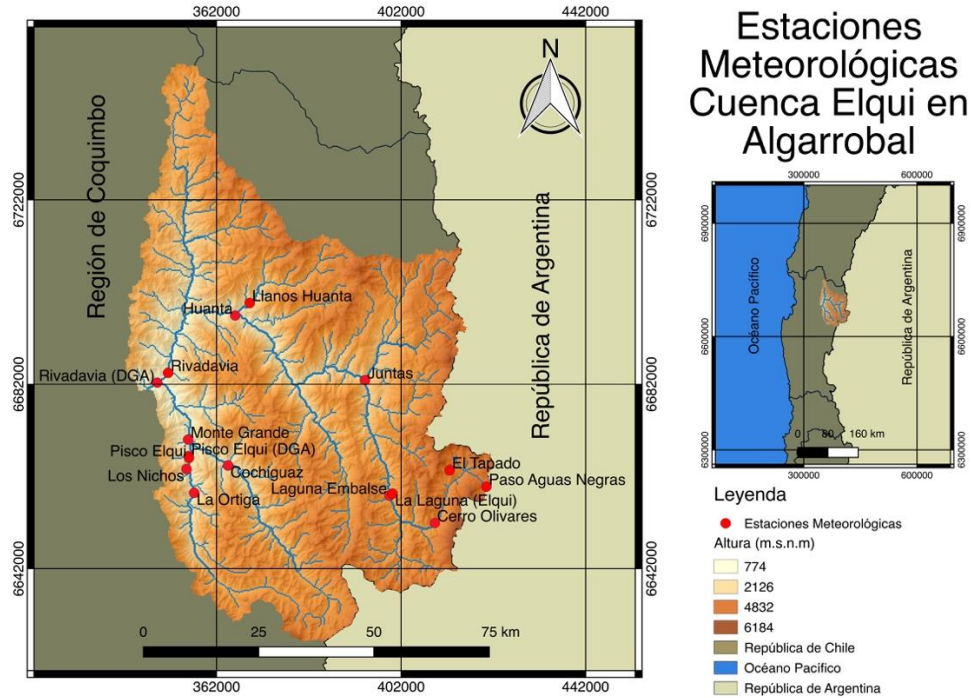


Figura 3.7: Distribución estaciones Elqui en Algarrobal.

### 3.5 Hidrología

A partir de la información histórica que entrega la DGA se obtuvieron los derechos de aguas superficiales consuntivos, los cuales se resumen en 441 usuarios, donde el principal uso corresponde a riego para agricultura, acumulando un caudal total de 2.317 lt/s, descontando las patentes por no uso a la fecha. En cuanto a los derechos no consuntivos estos son restituidos dentro de la cuenca bajo análisis, por lo que no influyen en los análisis posteriores.

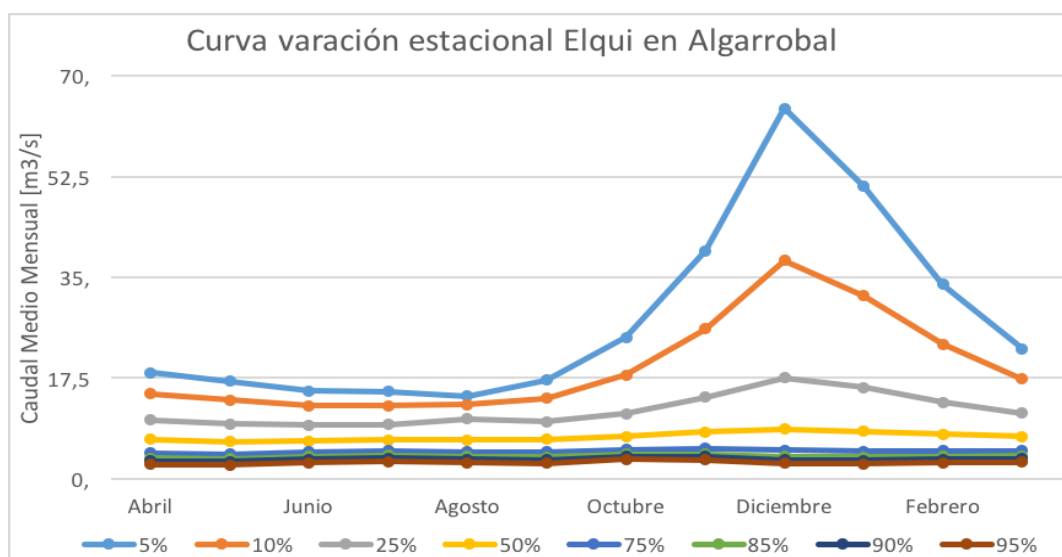
La estación de la DGA, Elqui en Algarrobal, cuenta con información de caudales desde 1960, por lo que se realiza la curva de variación estacional de caudales medios mensuales en régimen natural de los años hidrológicos 1960-1961 a 2015-2016. Dicha curva se realiza mediante un análisis de frecuencia para cada mes, donde se utiliza la distribución que mejor se ajuste a partir del test  $\chi^2$ .

Para realizar la curva de variación estacional fue necesario estimar la información de 6 meses, para los que no se contaba con el registro. La estación Elqui en Algarrobal se encuentra a 3 kilómetros aproximadamente de la confluencia de los ríos Claro y Turbio, donde a 1 y 5 kilómetros se encuentran dos estaciones fluviométricas de la DGA, Río Claro en Rivadavia y Río Turbio en Varillar, donde se miden los caudales de cada uno de los afluentes por separado, la suma de estos corresponde a una muy buena estimación del caudal que se debería haber registrado en la estación Elqui en Algarrobal. Por lo tanto, el relleno se realiza a través de la Ecuación (3.1).

$$Q_{ElquienAlgarrobal} = Q_{ClaroenRivadavia} + Q_{TurbioenVarillar} \quad (3.1)$$

Previo a la realización de los análisis de frecuencia fue necesario transformar el régimen de intervenido a natural, agregando los derechos de agua consuntivos a medida que avanza el tiempo. Se considera que se utiliza la totalidad de estos derechos, supuesto que puede ser no tan correcto, debido a que en el invierno la agricultura generalmente no precisa de la utilización total de los caudales solicitados, pero es la mejor manera de aproximarse a un régimen natural.

En el Anexo B se presenta una tabla con los valores que permiten construir la CVE, junto con la distribución o ajuste utilizado para cada mes. En la Figura 3.8 se presenta la curva de variación estacional para diferentes probabilidades de excedencia, desde 5% a 95%.



**Figura 3.8: Curva de variación estacional Elqui en Algarrobal en el periodo 1961-2016.**

La curva de variación estacional revela que el régimen de la cuenca es nival, donde en el período estival se derrite toda la nieve acumulada durante el período invernal y donde las precipitaciones en dicho período no generan un cambio en los caudales medios. Los mayores caudales se presentan entre los meses de Noviembre y Febrero, producto de los deshielos, mientras que los menores ocurren entre Junio y Agosto.

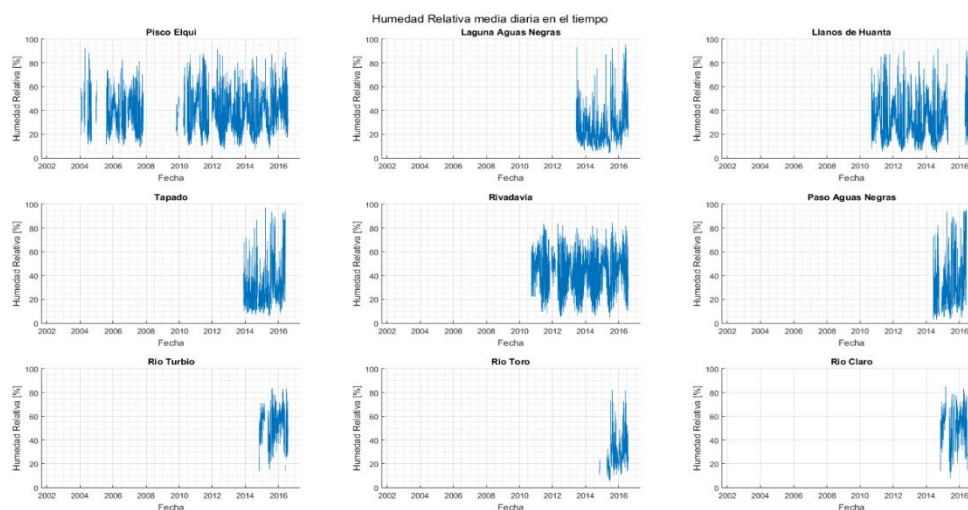
En los años secos, es decir, los con mayor probabilidad de excedencia, los caudales se distribuyen de manera homogénea, sin mostrar grandes variaciones durante los diferentes períodos, en cambio, durante los años húmedos se genera un notable aumento del caudal durante el verano.



# Capítulo 4 : Análisis de información disponible y relleno de datos

## 4.1 Humedad Relativa

Se cuenta con nueve estaciones meteorológicas que registran la humedad relativa máxima, mínima y promedio en frecuencia diaria, dichas estaciones no miden de manera continua durante todo el período de estudio, esto se debe a que cada estación tiene diferentes fechas de inicio de registro y ocurren problemas durante su funcionamiento, generando vacíos de información, como se puede apreciar en la Figura 4.1.

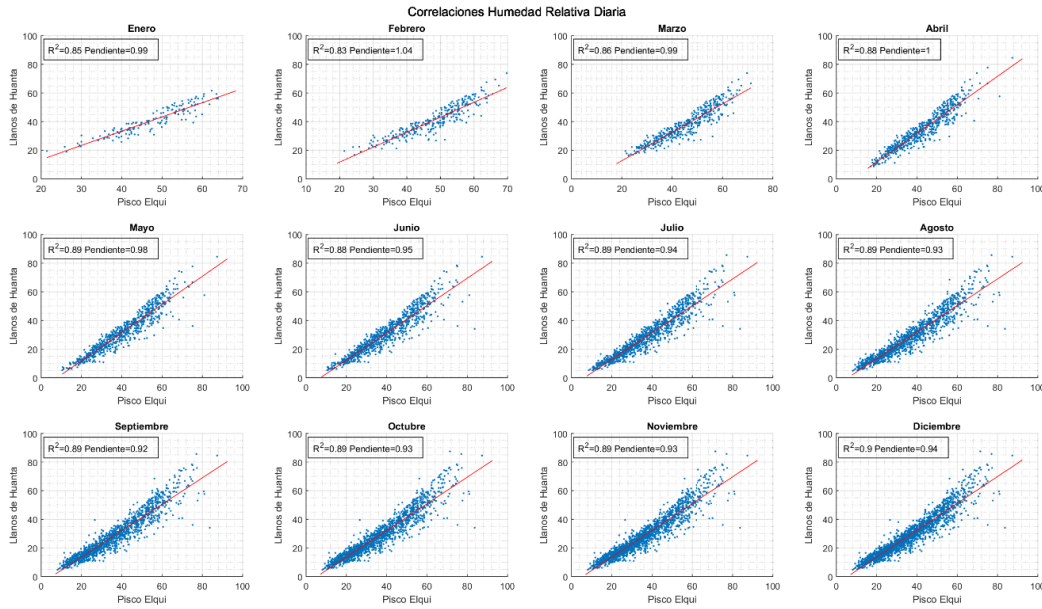


**Figura 4.1: Humedad relativa media diaria registrada. Período 2002-2016.**

Debido a los problemas anteriormente nombrados, es necesario rellenar los datos faltantes de la manera más precisa posible, por lo que, se descartan los días con precipitación, ya que la humedad relativa cuando sucede dicho fenómeno es cercana al 100% y no aportan información relevante. A continuación, se plantea una metodología de relleno que consiste en aplicar dos criterios, los cuales se explican a continuación:

1. **Correlaciones entre estaciones:** Se generan relaciones mensuales entre todas las estaciones, independiente de su distribución geográfica. A partir de las relaciones generadas se rellenan los datos de la estación incompleta con las dos estaciones que presenten la pendiente y el coeficiente de determinación más cercano a 1 y el coeficiente de posición más cercano a cero, siempre y cuando la pendiente se encuentre entre 0,75 y 1,25 y el coeficiente de determinación sea mayor o igual 0,7, para así evitar rellenar con datos que se alejen de la realidad. Además, si la estación a rellenar posee registro en la misma fecha que la estación que rellena, se conserva la información original. Para abarcar todos los casos posibles se generan 36 figuras, con

12 gráficos cada una, como se muestra en la Figura 4.2 todas estas relaciones se encuentran en el Anexo C.



**Figura 4.2: Correlaciones Humedad relativa entre Pisco Elqui y Llanos de Huanta.**

- Relaciones estadísticas:** Para rellenar los datos faltantes se considera el comportamiento mensual de cada estación, calculando el promedio de todos los días disponibles para cada mes de cada estación y su desviación estándar. Luego, a través de un valor aleatorio, se generan series para completar los datos faltantes. Los promedios se realizan previos al primer relleno, para así generar series a partir de la información original. La fórmula para cada valor corresponde a:

$$HR_{e,m,d} = \overline{HR}_m + 2.5 \cdot \sigma_m \cdot A \quad (4.1)$$

Donde,

- $HR_{e,m,d}$ : Humedad relativa a rellenar, para la estación  $e$ , mes  $m$  y el día  $d$  [%].
- $\overline{HR}_{e,m}$ : Humedad relativa promedio de la estación  $e$  y el mes  $m$  [%].
- $A$ : Aleatorio entre -1 y 1 [-].
- $\sigma_{e,m}$ : Desviación estándar asociada a la estación  $e$  y el mes  $m$  [-].

El valor que acompaña la desviación estándar, tiene asociado cierto porcentaje de los valores que se encuentran considerados en la distribución normal, para este caso el valor que mejor se ajusta a los valores es de 2.5, el cual tiene asociado el 98.76% de los datos.

En la Tabla 4.1 se presenta la forma en la que se aplica el primer criterio para las estaciones presentes en la cuenca:

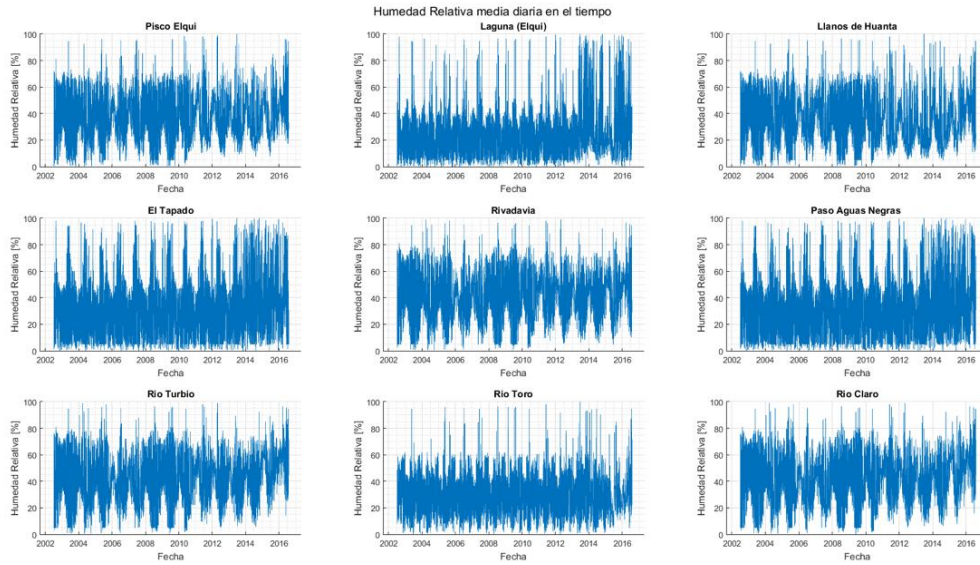
**Tabla 4.1: Prioridades de estaciones para rellenar.**

<b>Estación a rellenar</b>	<b>Primera correlación</b>	<b>Segunda correlación</b>
Pisco Elqui	Llanos de Huanta	Rivadavia
Laguna (Elqui)	-	-
Llanos de Huanta	Pisco Elqui	-
El Tapado	Paso Aguas Negras	-
Rivadavia	Río Claro	Pisco Elqui
Paso Aguas Negras	El Tapado	-
Río Turbio	Río Claro	Rivadavia
Río Toro	-	-
Río Claro	Río Turbio	Rivadavia

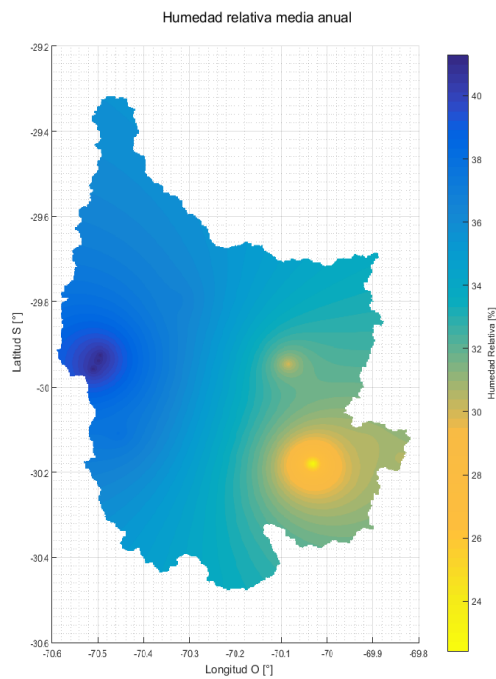
Se generan las series completas, tal como se explicó anteriormente, obteniéndose para cada relleno las figuras que se presentan en el Anexo D.

Finalmente, como se realizó el relleno sin precipitaciones, hay que agregar la influencia de este fenómeno, donde los días que precipitó se registraron valores de humedad relativa entre 30% y 100%, la variabilidad de estos valores depende de las horas de lluvia registrada, pero como solo se cuenta con el registro diario y no horario, a los días con precipitación se le aplica una humedad relativa con distribución normal entre 30% y 100%, con lo que se obtiene la serie de humedad relativa media diaria final, la cual se presenta en la

Una vez generadas las series temporales, se extrapolan todos los datos mediante el inverso de la distancia ponderado, obteniendo así, la humedad relativa para cada pixel de 30 m<sup>2</sup> y para todo el período de estudio. muestra el resultado obtenido, correspondiente a la humedad relativa media anual promedio.



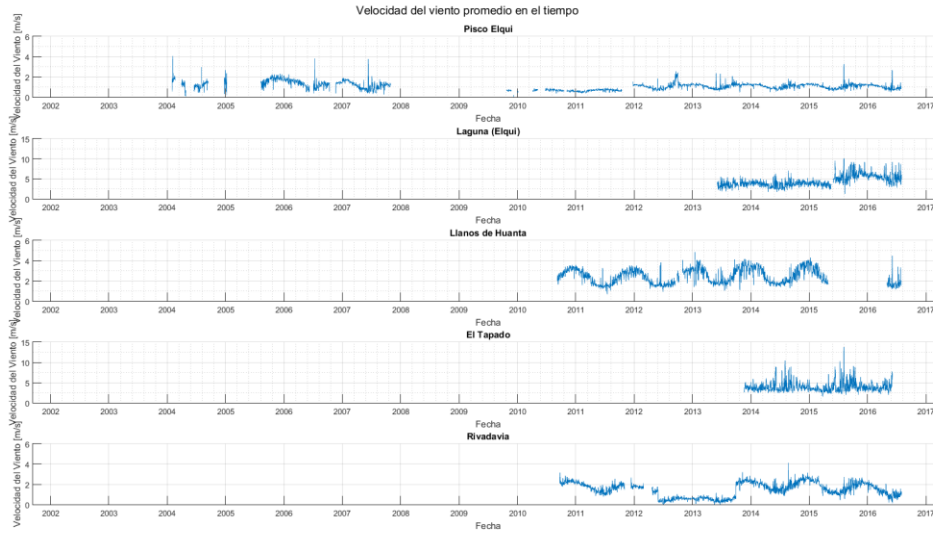
**Figura 4.3: Humedad relativa media diaria. Período 2002-2016.**



**Figura 4.4: Humedad relativa media anual. Período 2002-2016**

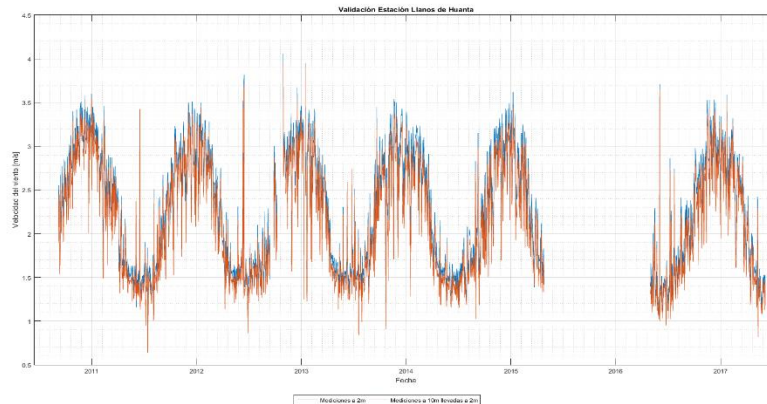
## 4.2 Velocidad del Viento

En la cuenca alta del río Elqui existen 5 estaciones que generan mediciones de velocidad del viento para el período de estudio, en la Figura 4.5 se presentan dichos registros.



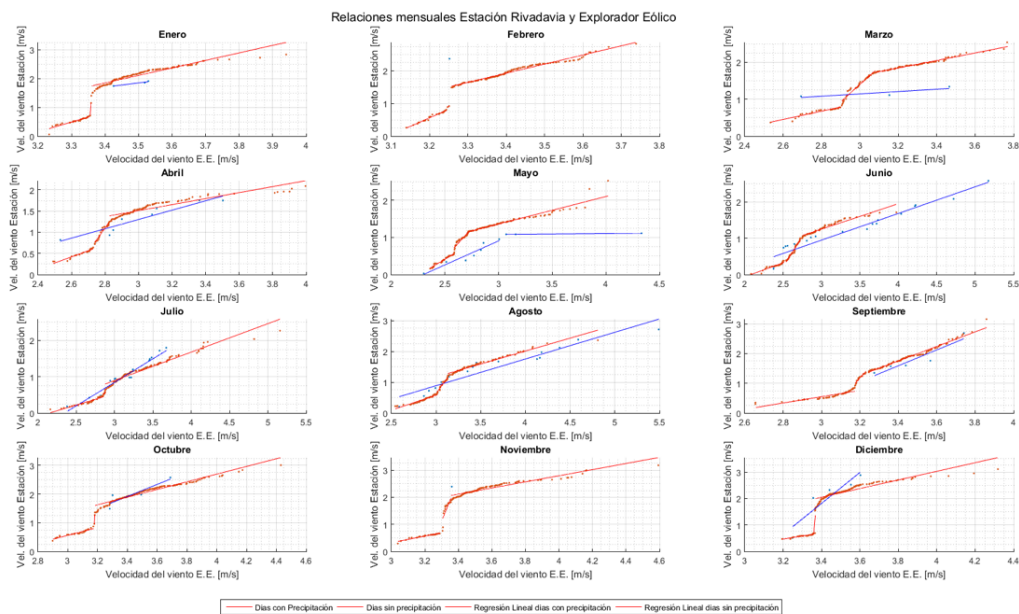
**Figura 4.5: Velocidad del viento promedio registrada. Período 2002-2016.**

También se cuenta con los valores generados por el explorador eólico, información generada para todo Chile por el CR2. La estación Llanos de Huanta posee mediciones a 10 metros y a 2 metros, por lo que se realiza la calibración con dicha información, con lo que se obtiene  $Z_0 = 0,002$ , lo que corresponde al orden de magnitud de clase suave generada por Wieringa (2001) descrita como superficie sin obstáculo notable y sin vegetación, lo que coincide con la estructura de la cuenca, donde el mayor porcentaje de uso de suelo corresponde a superficie sin vegetación y a praderas o matorrales muy abierto. A partir de este valor, se puede graficar el ajuste para la estación Llanos de Huanta, información que se presenta en la Figura 4.6.



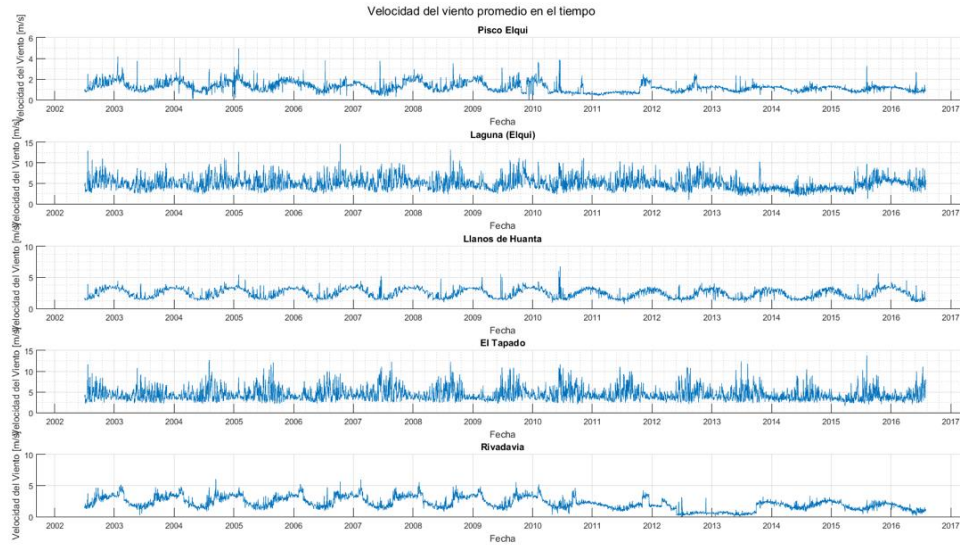
**Figura 4.6: Validación Explorador Eólico. Estación Llanos de Huanta.**

Con la información anterior se determinan los valores de velocidad del viento del Explorador Eólico a 2 metros. Para realizar el relleno de datos faltantes se generó funciones de transferencia mensuales diferenciando los días que ocurría precipitación. Para obtener dichas funciones de transferencia se realizó un ordenamiento estadístico de los datos, debido a que no se generan tendencias o relaciones aceptables entre el explorador y la estación. Finalmente, en muchos casos se apreciaron diferentes funciones de transferencia para un mismo mes, por lo que se discretizaron dichas funciones para rangos de velocidades del explorador eólico, para así poder obtener una mejor estimación del parámetro a estimar. En la Figura 4.7 se aprecian las relaciones para los diferentes meses para la estación Rivadavia. En el Anexo E se presentan todas las relaciones generadas.



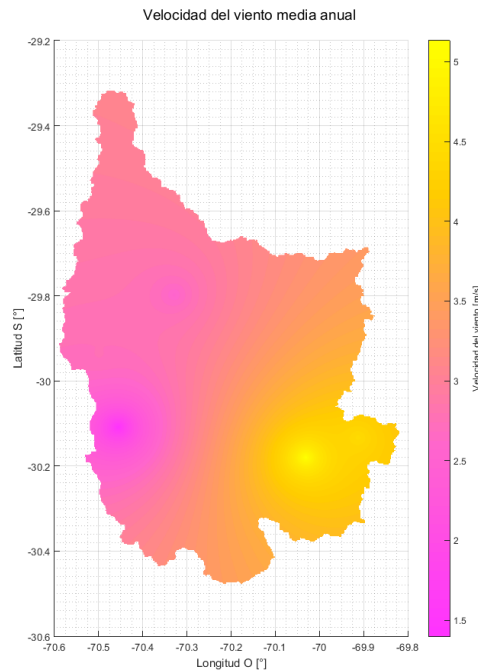
**Figura 4.7: Relación estación Rivadavia y Explorador Eólico.**

A partir de las funciones de transferencia y la serie de precipitaciones de cada estación para el período de estudio se generan los valores faltantes para cada estación, obteniendo un valor de velocidad del viento promedio para cada día y para cada estación, como se puede observar en la Figura 4.8.



**Figura 4.8: Serie de velocidad del viento en las Estaciones de Elqui Alto. Período 2002-2016.**

Se aprecia que los periodos rellenados mantienen las características de los valores registrados. A base de los valores obtenidos para cada estación se genera un mapa de velocidad del viento para cada día, donde los pixeles sin información son rellenados mediante método del inverso de la distancia ponderado. En la Figura 4.9 se puede apreciar un mapa de la velocidad de viento media anual.



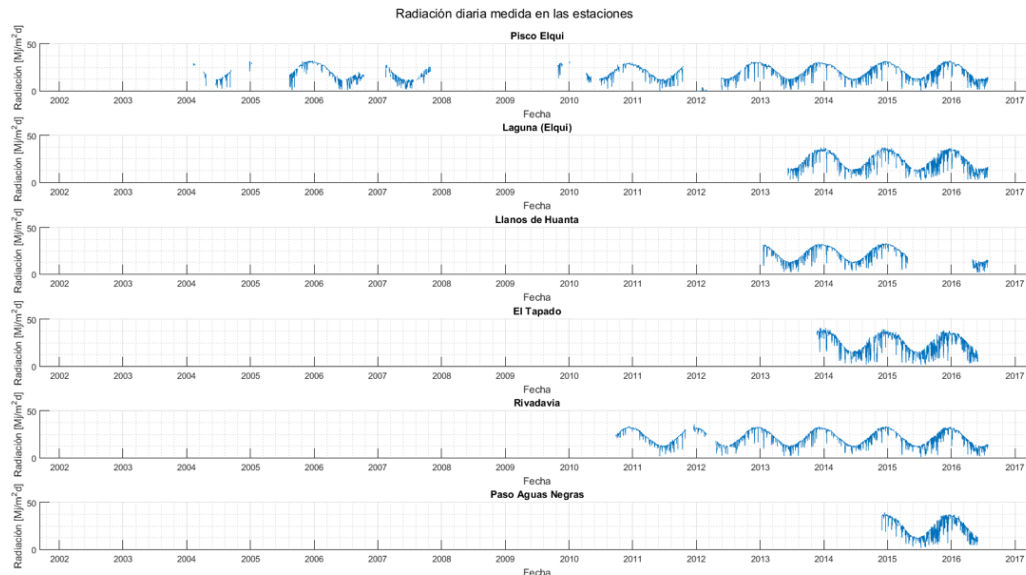
**Figura 4.9: Velocidad del viento media anual. Período 2002-2016.**

## 4.3 Radiación

La Ecuación (2.1) que permite estimar la evapotranspiración del cultivo de referencia requiere la radiación neta, la cual consiste, según la Ecuación (2.11), en la diferencia entre la radiación neta de onda corta y la radiación neta de onda larga.

### 4.3.1 Radiación de onda corta

Se cuenta con seis estaciones meteorológicas que registran la radiación de onda corta, en frecuencia diaria, dichas estaciones no miden de manera continua durante todo el período de estudio, esto se debe a que cada estación tiene diferentes fechas de inicio de registro y ocurren problemas durante su funcionamiento, generando vacíos de información, como se puede apreciar en la Figura 4.10.



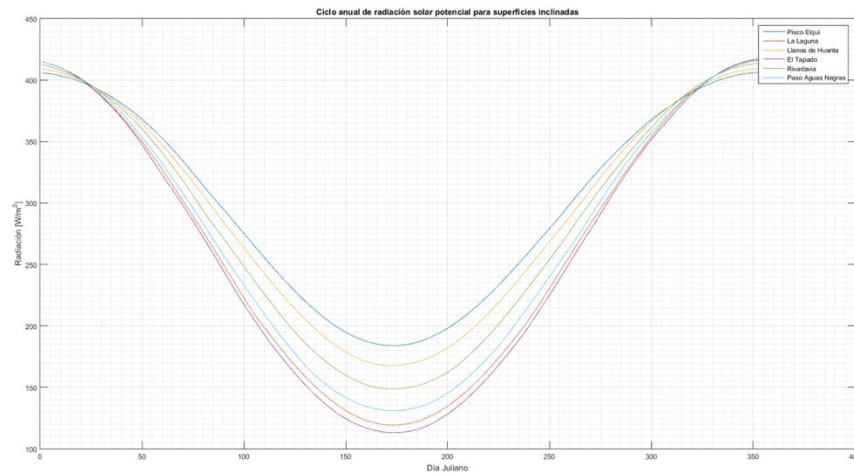
**Figura 4.10: Radiación media diaria registrada. Período 2002-2016.**

Debido a los problemas anteriores fue necesario completar los datos faltantes de la manera más precisa posible. La radiación es un fenómeno que posee un ciclo anual modificado a partir de la nubosidad, parámetro que se estima a partir del satélite MODIS, con su producto MOD10A1 y MYD10A1. Este identifica la nubosidad en un pixel con el valor 255 y despedado con valor 0.



También se cuenta con el Explorador Solar<sup>2</sup>, un producto de radiación disponible online y para todo Chile, desarrollado por el Ministerio de Energía y el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, el cual a partir de 2004 posee información de radiación solar incidente. Al generar el relleno de información a partir de estos datos se obtienen gran cantidad de inconsistencias, debido a que los ciclos estimados por el Explorador Solar sobrestiman los valores medidos en todas las estaciones y poseen un pequeño desfase del ciclo de radiación, por lo que se descarta utilizar dicha información.

A partir del estudio de DeWalle & Rango, (2008), citando a Frank & Lee, (1966) se genera un vector de valores diarios de radiación para cada estación, con lo que se obtiene el ciclo anual de la radiación de onda corta para cada estación para días descubiertos, como se muestra en la Figura 4.11. La Ecuación (2.17) es la utilizada para obtener dicho ciclo.



**Figura 4.11: Ciclo anual Radiación de onda corta para cada estación.**

La constante solar que se utilizó es de  $1360 \text{ W m}^{-2}$ , al igual que DeWalle & Rango, (2008) en su publicación, de igual manera dicha constante oscila entre  $1360 \text{ W m}^{-2}$  y  $1400 \text{ W m}^{-2}$  (Monteith, 1973).

Luego a partir de los productos MODIS nombrados anteriormente, se cruza la nubosidad con la radiación solar, calculando la radiación en un día nublado de manera estadística, según la Ecuación (4.2).

$$R_{e,m,d} = \bar{R}_{e,m} + 1,5 \cdot \sigma_m \cdot A \quad (4.2)$$

<sup>2</sup>Explorador Solar, Ministerio de Energía y el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile (2017) <http://ernc.dgf.uchile.cl:48080/exploracion>

Donde,

$R_{e,m,d}$ : Radiación a rellenar, para un día con nubosidad, para la estación  $e$ , mes  $m$  y el día  $d$  [%].

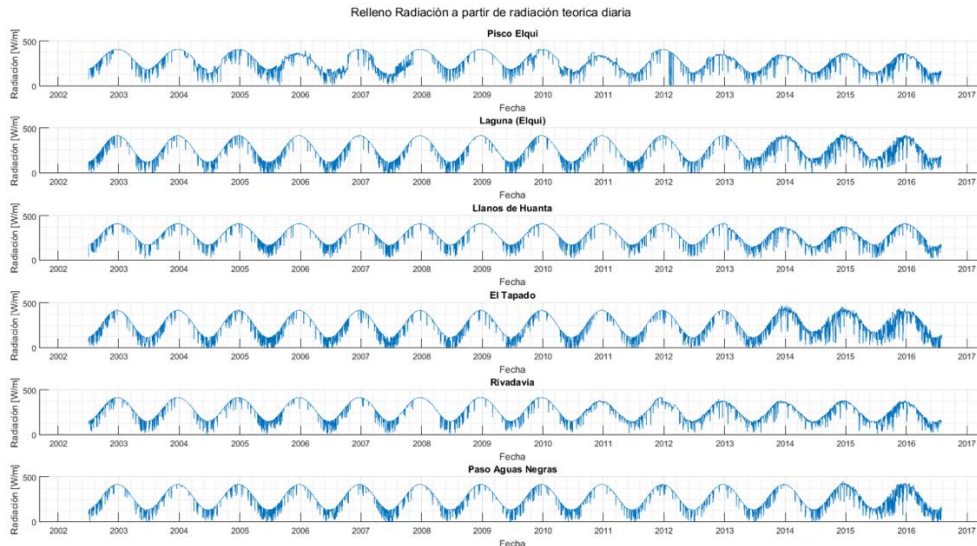
$\bar{R}_{e,m}$ : Radiación promedio de la estación  $e$  y el mes  $m$ , calculada para los días nubosos medidos en la estación [%].

$A$ : Aleatorio entre -1 y 1 [-].

$\sigma_{e,m}$ : Desviación estándar asociada a la estación  $e$  y el mes  $m$  [-].

El valor que acompaña la desviación estándar, tiene asociado cierto porcentaje de los valores que se encuentran considerados en la distribución normal, para este caso el valor que mejor se ajusta a los valores es de 1.5, el cual tiene asociado el 93,32% de los datos.

Finalmente, se obtiene la serie de radiación solar entrante completa para todas las estaciones, como se muestra en la Figura 4.12.



**Figura 4.12: Radiación simulada en estaciones de Elqui Alto. Período 2002-2016.**

La radiación de onda corta neta se obtiene con la Ecuación (2.12), la cual utiliza la radiación solar entrante y el albedo, parámetro que corresponde al porcentaje de radiación que la superficie refleja con respecto a la cual incide sobre ésta, dicho parámetro se obtiene a partir del modelo de re-análisis atmosférico ERA Interim del European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) (Dee et al, 2011). Se descarga la información de albedo<sup>3</sup> para el período de estudio en los cuatro horarios disponibles y con la grilla más precisa posible, es decir, cada 0,125°. Promediando para cada día se obtiene el albedo para cada estación, el

<sup>3</sup>ERA Interim del European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (2011) <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/>

cual permite obtener la radiación de onda corta neta, como se puede apreciar en la Figura 4.13.



Figura 4.13: Radiación neta de onda corta para todas las estaciones. Periodo 2002-2016.

### 4.3.2 Radiación de onda larga

Se cuenta con todos los parámetros de la Ecuación (2.15), por lo que se utiliza dicha ecuación para obtener la radiación neta de onda larga. Para cada estación se obtienen las series de radiación para todo el periodo de estudio, las cuales se muestran en la Figura 4.14.

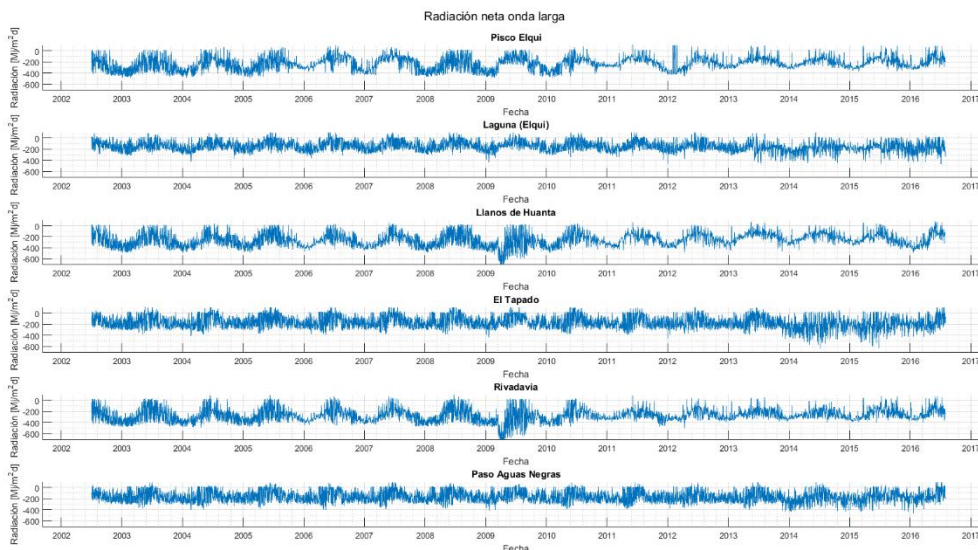


Figura 4.14: Radiación neta de onda larga para todas las estaciones. Periodo 2002-2016.

### 4.3.2.1 Radiación neta

Finalmente, con la Ecuación (2.11) se obtiene la radiación neta para cada estación, como se muestra en la Figura 4.15.

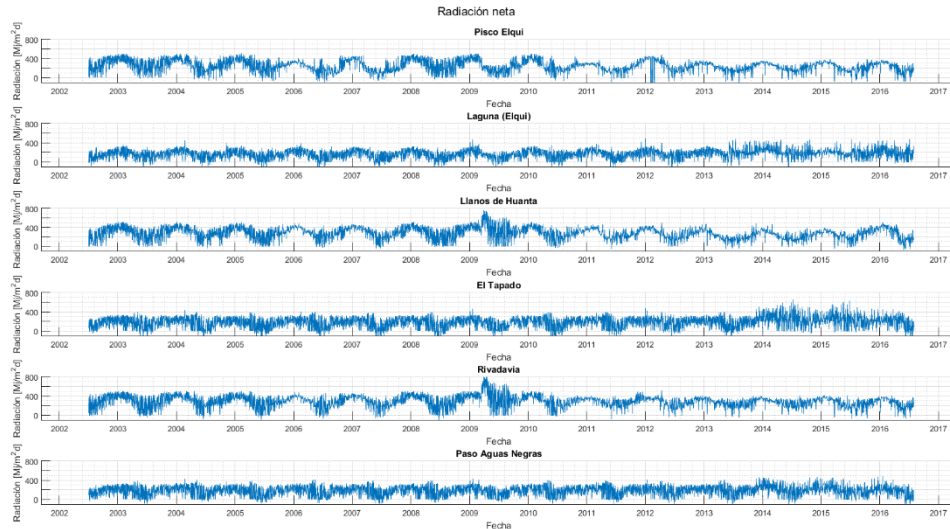


Figura 4.15: Radiación neta para todas las estaciones. Periodo 2002-2016.

Para poder visualizar de mejor manera los ciclos de la radiación se genera un gráfico con la radiación de onda larga, corta y neta a nivel medio diario para la estación Pisco Elqui, la Figura 4.16 muestra dicha información.

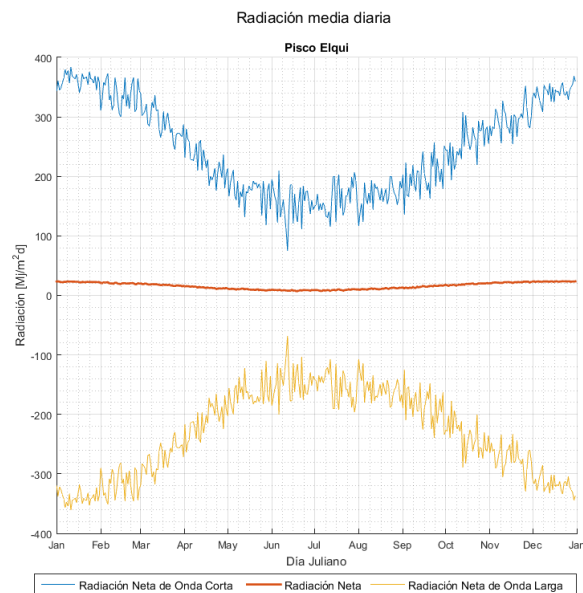
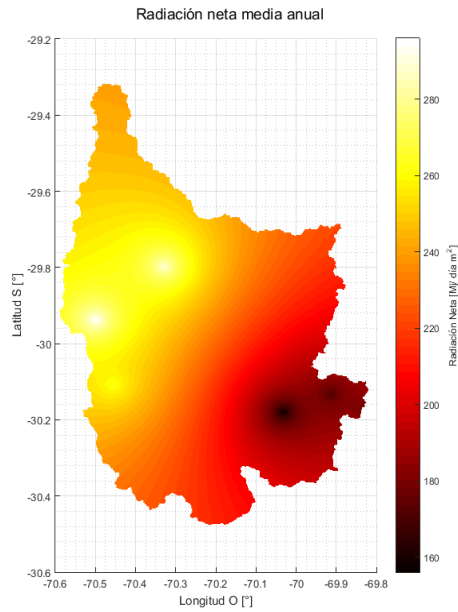


Figura 4.16: Radiación media diaria de onda corta, larga y neta.

Dicha información se distribuye para todos los píxeles sin información, a partir del método del inverso de la distancia ponderado. En la Figura 4.17 se puede apreciar un mapa de radiación neta media anual.

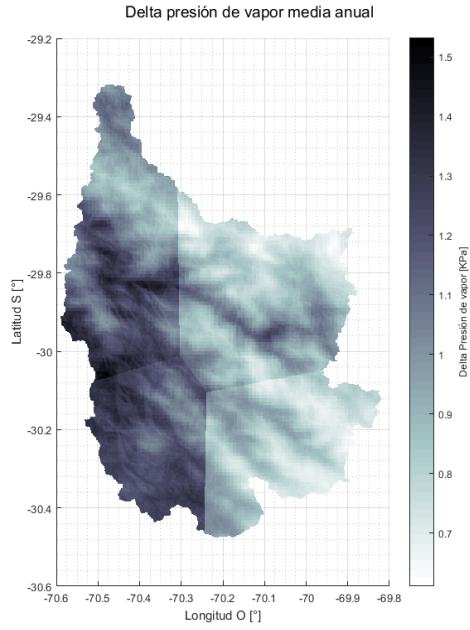


**Figura 4.17: Radiación neta media anual. Período 2002-2016.**

## 4.4 Otros Parámetros

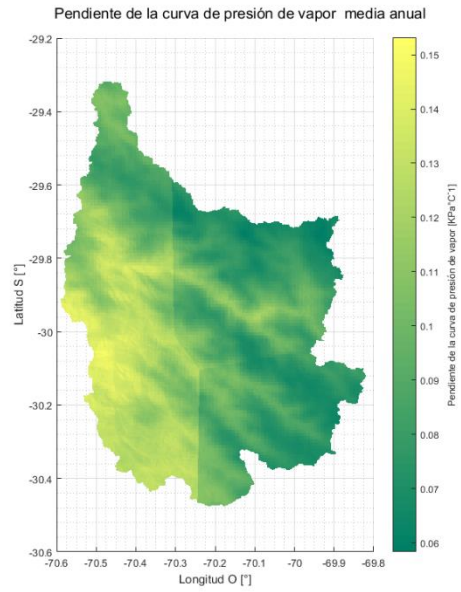
Debido a que el cálculo de la evapotranspiración del cultivo de referencia se realiza a nivel diario se considera según la Ecuación (2.7) que el flujo de calor de suelo es nulo.

La diferencia entre la presión real de vapor y la presión de vapor de saturación se calcula a través de las Ecuaciones (2.2), (2.3), (2.4) y (2.5). En la Figura 4.18 se puede apreciar un mapa medio anual de dicha diferencia.



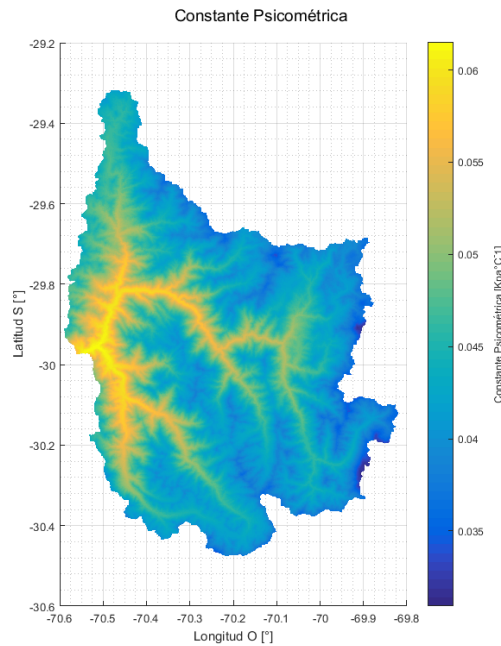
**Figura 4.18: Diferencia presión de vapor media anual. Período 2002-2016**

La pendiente de la curva de presión de vapor se calcula según la Ecuación (2.6) y en la Figura 4.19 se puede apreciar su distribución media anual para del periodo de estudio.



**Figura 4.19: Pendiente curva de presión de vapor media anual. Período 2002-2016.**

Finalmente, la constante psicrométrica se obtiene a través de la Ecuaciones (2.9) y (2.10), donde es necesaria la elevación sobre el nivel del mar, la cual se obtiene a partir de los DEMs de elevación en resolución de 30 m por 30 m generados por la NASA en su Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). En la Figura 4.20 se puede apreciar un mapa de dicho parámetro, el cual es constante para todos los días del periodo de estudio.



**Figura 4.20: Constante Psicométrica en la cuenca Alta del río Elqui.**

## 4.5 Imágenes MODIS

A través de la página [www.earthdata.com](http://www.earthdata.com) de la Nasa se descargaron las imágenes para el período de estudio, correspondiendo a 10.566 para el satélite Aqua y 10.540 para el satélite Terra, para ambos satélites se descargaron dos gránulos para cada día, debido a que la cuenca bajo análisis no se encontraba abarcada en su totalidad en uno de estos. Por diversos problemas, muchas veces los satélites dejan de transmitir información, este caso no fue la excepción y Terra no generó imágenes durante un total de 25 días y Aqua en 12 ocasiones, para todo el período de estudio, el cual corresponde a 5.142 días. Afortunadamente los días que capturó información un satélite el otro sí lo hizo, por lo que para todos los días bajo análisis existen datos. El formato de dichas imágenes corresponde a HDF y fueron procesadas mediante el software Matlab de Mathworks.

Teniendo en cuenta la metodología de relleno de estaciones planteada por Cepeda & Vargas, (2016), Páez (2012) y Cornwell (2012), se elaboró el procedimiento que se detalla en el Anexo F, que considera que el criterio espacial es más preciso que el temporal, por lo que el

criterio espacial se aplica primero. En la Figura 4.21 se presenta un diagrama el cual explica la metodología utilizada.

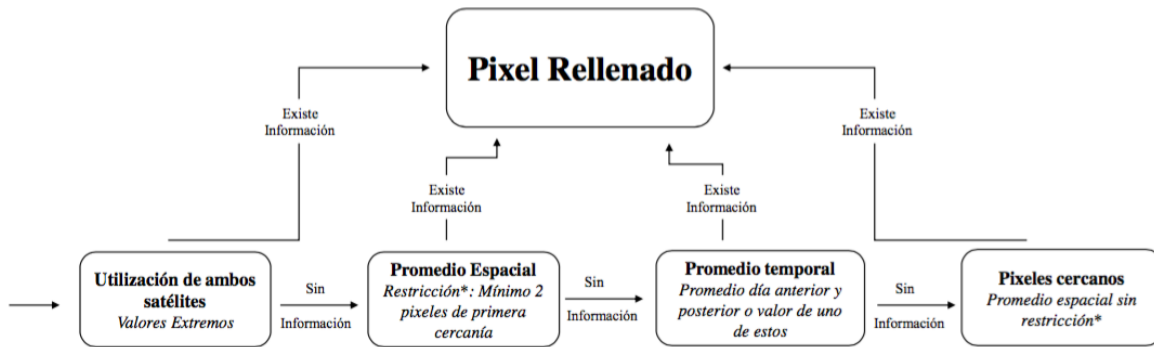


Figura 4.21: Diagrama de la metodología de relleno.

## 4.6 Imágenes Landsat

Dado el período de estudio se utilizaron imágenes del satélite Landsat 4, 5 y 8, excluyendo el número 7, debido que este satélite a partir del 2003 sufre una falla en el sensor ETM+, que es parte de sistema SLC, el cual compensa el movimiento del satélite hacia adelante durante la captura de imágenes. Al tener dicho problema, el área escaneada por el sensor delinea un patrón de zigzag, provocando un bandeo en la imagen que está siendo capturada.

Dentro de las metodologías planteadas en la revisión bibliográfica la propuesta por Weng, Lu, & Schubringa (2004), es la que se recomienda actualmente por diferentes entidades, incluyendo el U.S. Geological Survey, quienes, en conjunto con la NASA, están a cargo del proyecto Landsat y sus satélites. De acuerdo con la metodología expuesta en el Capítulo 2 se obtiene la temperatura superficial del suelo.

## 4.7 Mejoramiento de la resolución de las imágenes satelitales de temperatura del aire.

En la zona de estudio se cuenta con 4 estaciones que registran temperatura del aire durante el período de estudio, donde, al igual que para el caso de las imágenes satelitales, hay días que no se registra dicha información, por lo que se utilizan los datos existentes para generar las relaciones. Al tratarse de un período de aproximadamente 14 años, la información disponible es suficiente para generar relaciones entre los satélites y las estaciones de manera confiable.

A partir de las imágenes de temperatura de suelo de los satélites MODIS y Landsat y las cuatro estaciones meteorológicas que registran la temperatura del aire, se elaboró la metodología que se detalla a continuación para obtener el producto de temperatura media del aire a nivel diario con resolución 30 metros.



1. **Correlación temperaturas medidas con temperaturas de suelo satelitales MODIS:** Se generan correlaciones para cada estación, donde se busca la función de transferencia que mejor permita llevar las temperaturas extremas de suelo a temperaturas del aire. Esto se realiza con el 67% de la información, para así, poder validar con el 33% restante. Para obtener la temperatura del aire en todos los pixeles de la cuenca y no solo en los que se encuentra la estación, se extiende la función de transferencia de cada estación a una fracción del área de la cuenca. Debido a que no existe una buena relación entre temperatura y altura para generar un gradiente altitudinal, se utiliza el método de los polígonos de Thiessen, se generan 4 polígonos, los que se muestran en la Figura 4.22, a los que se les aplicó la función de transferencia correspondiente definida por una ecuación tipo como la mostrada en la Ecuación (4.3).

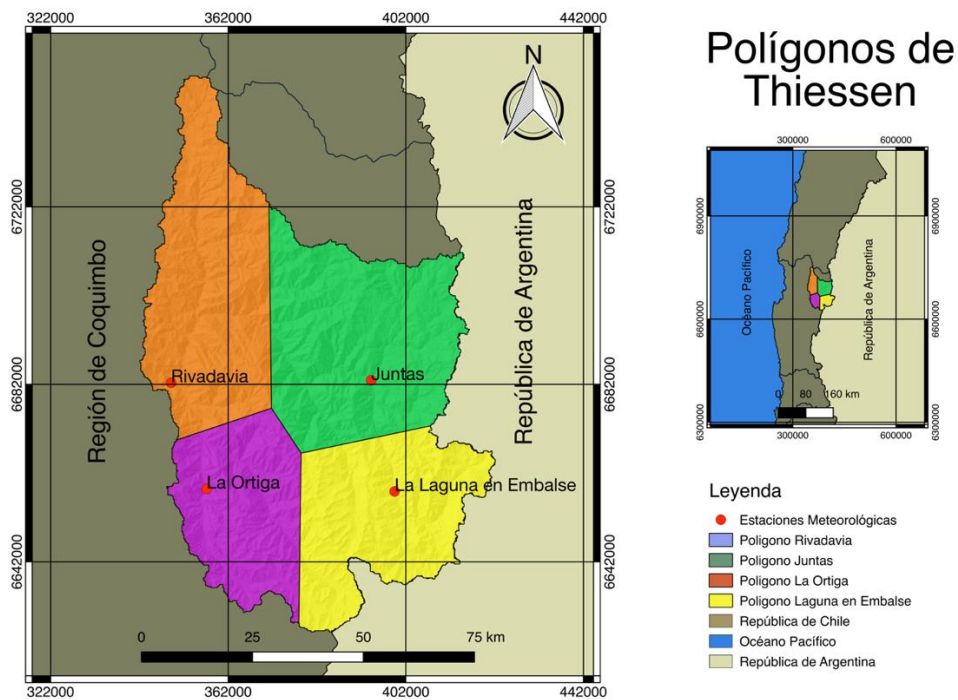


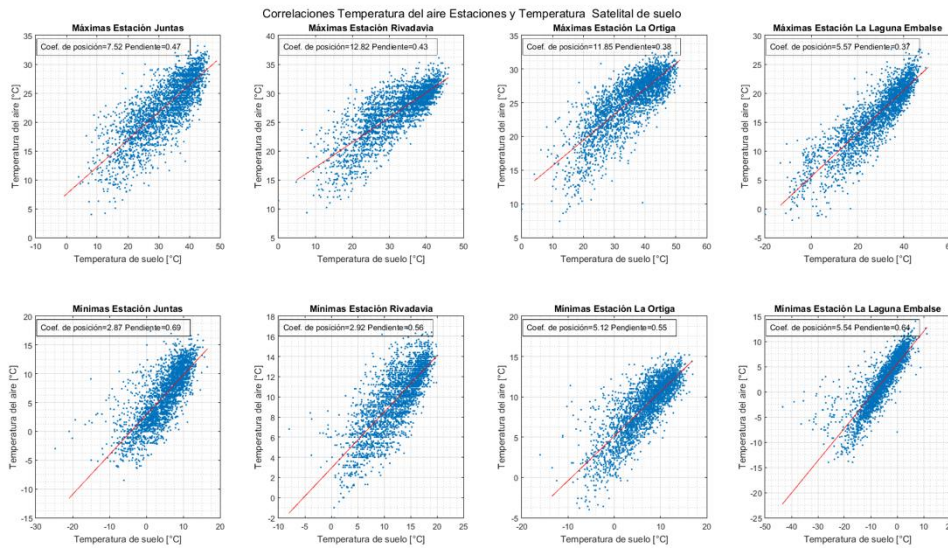
Figura 4.22: Polígonos de Thiessen a partir de estaciones que registran temperatura del aire.

$$A^e = S^e \cdot X^e + B^e \quad (4.3)$$

Donde,

- $A^e$ : Temperatura extrema (máxima o mínima) del aire del pixel de la estación  $e$  [ $^{\circ}C$ ].
- $S^e$ : Temperatura del suelo del satélite ubicado en el pixel de la estación  $e$  [ $^{\circ}C$ ].
- $X^e$ : Pendiente de la función de transferencia para la estación  $e$  [-].
- $B^e$ : Coeficiente de posición de la función de transferencia para la estación  $e$  [-].

En la Figura 4.23 se muestran las funciones de transferencias obtenidas, las cuales poseen un coeficiente de determinación mayor o igual a 0.6.



**Figura 4.23: Relación entre la temperatura del aire de cada estación y del suelo del satélite MODIS.**

Como resultado de este proceso se obtuvo las temperaturas extremas del aire para todo el período y la cuenca de estudio en resolución de 500 metros.

2. **Relaciones entre píxeles de las imágenes Landsat:** Se generó relaciones de temperatura de suelo para cada imagen, para cada mes, entre el pixel donde se ubica la estación y todos sus vecinos dentro de cada polígono correspondiente, luego se promedian dichas relaciones, con el objetivo de obtener un factor para cada mes, para cada pixel dentro de cada polígono. Dichos procedimientos se representan con las Ecuaciones (4.4) y (4.5).

$$K_{i,j}^n = \frac{L_{i,j}}{L^e} \quad (4.4)$$

$$\overline{K}_{i,j}^n = \frac{1}{t} \sum_{p=1}^t K_{i,j}^n \quad (4.5)$$

Donde,

- $L_{i,j}$ : Temperatura diaria del suelo en pixel en la coordenada  $i, j$  [°C].
- $L^e$ : Temperatura de suelo del pixel en la coordenada de la estación  $e$  [°C].
- $K_{i,j}^n$ : Cociente o relación entre el pixel de la estación con otro ubicado en la coordenada  $i, j$ , para el mes  $n$  [-].

$\overline{K_{i,j}^n}$ : Promedio de todos los cocientes a aplicar para el pixel ubicado en la coordenada  $i, j$ , para el mes  $n$  [-].

$t$ : Cantidad de imágenes Landsat en el mes  $n$  [-].

El producto obtenido de estos cálculos corresponde a un promedio de la relación de la temperatura de suelo en el pixel de la estación con cada pixel dentro del polígono a nivel mensual, donde se consideran todas las imágenes Landsat procesadas, acoplando ambos satélites (Landsat 4-5 y Landsat 8). Es decir, para cada mes, cada pixel de cada polígono tiene un factor el cual simula el comportamiento de la temperatura del aire con respecto al pixel donde se encuentra la estación.

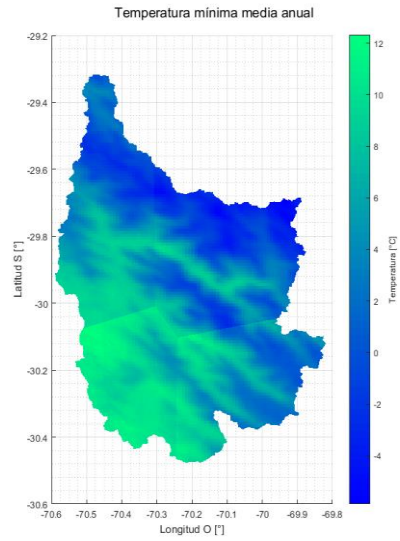
3. **Aplicar la relación entre los pixeles Landsat a las Imágenes MODIS:** Para generar el producto final de temperatura del aire, se multiplicó la temperatura del aire máxima y mínima diaria obtenida del satélite MODIS con el factor Landsat generado, dependiendo del mes y el polígono en el que se ubique el pixel, para así obtener la temperatura del aire a nivel diario y a resolución de 30 metros, como se observa en la Ecuación (4.6).

$$AT_{i,j} = T_{i,j} \cdot \overline{K_{i,j}^n} \quad (4.6)$$

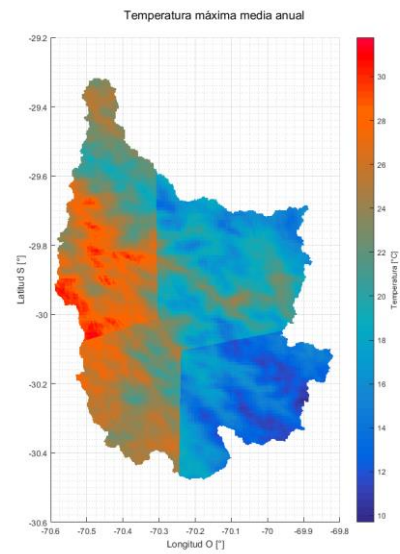
Donde,

$AT_{i,j}$ : Temperatura extrema (máxima o mínima) del aire en resolución de 30 metros para el pixel ubicado en la coordenada  $i, j$  [ $^{\circ}C$ ].

Así se obtiene el producto de temperatura extrema del aire en alta resolución y carácter diario. En la Figura 4.25 y Figura 4.25 se muestran imágenes de temperaturas medias anuales máximas y mínimas del aire obtenidas a partir de la metodología anterior.



**Figura 4.24: Temperaturas mínima media anual. Período 2002-2016.**



**Figura 4.25: Temperaturas máxima media anual. Período 2002-2016.**

# Capítulo 5 : Resultados de Evapotranspiración

A base de la información presentada en el capítulo anterior, se calculó la evapotranspiración del cultivo de referencia diaria en cada uno de los pixeles con resolución de 30 metros en el periodo 2002 a 2016. En la Figura 5.1 se muestran 12 mapas de evapotranspiración de cultivo de referencia media mensual promedio obtenidos para la zona de estudio, donde se puede apreciar las diferencias en los valores de evapotranspiración, confirmando que este fenómeno ocurre con mayor tasa en la época de mayores temperaturas.

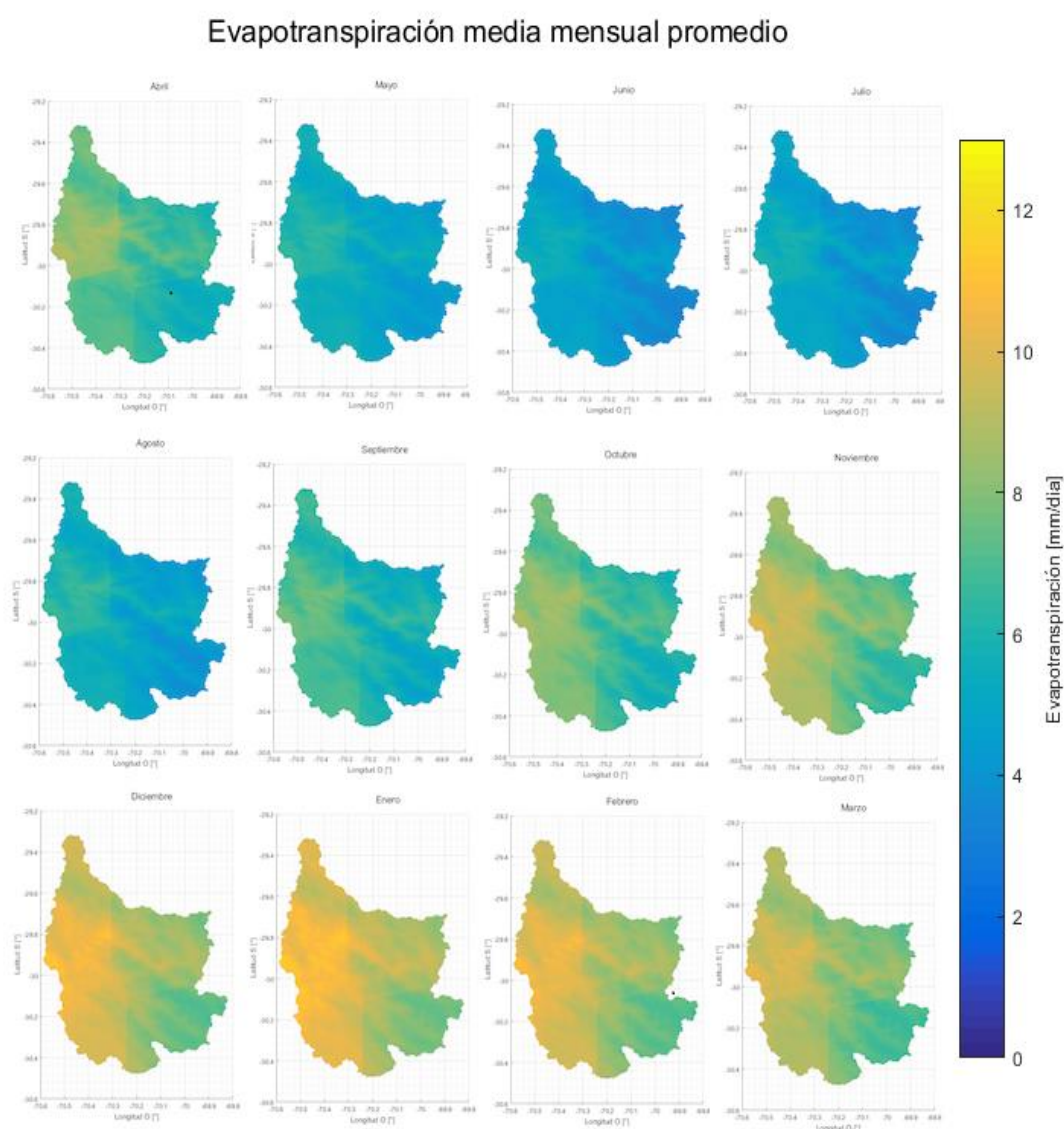
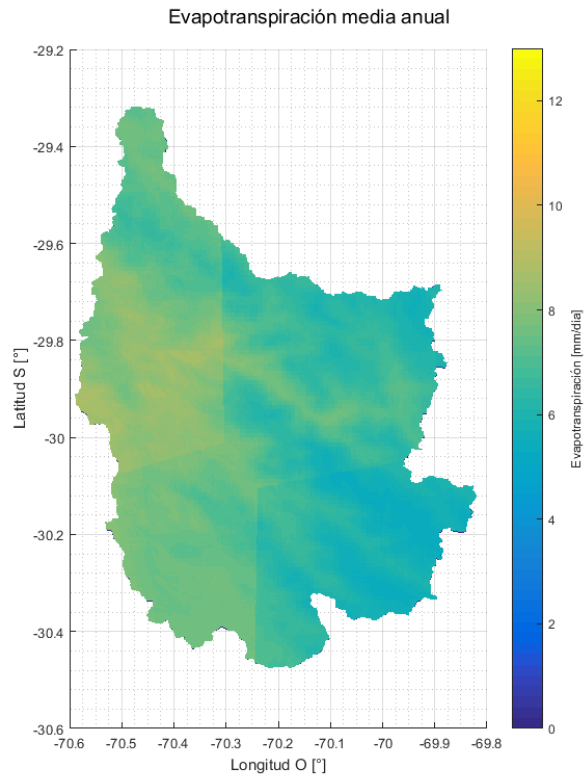


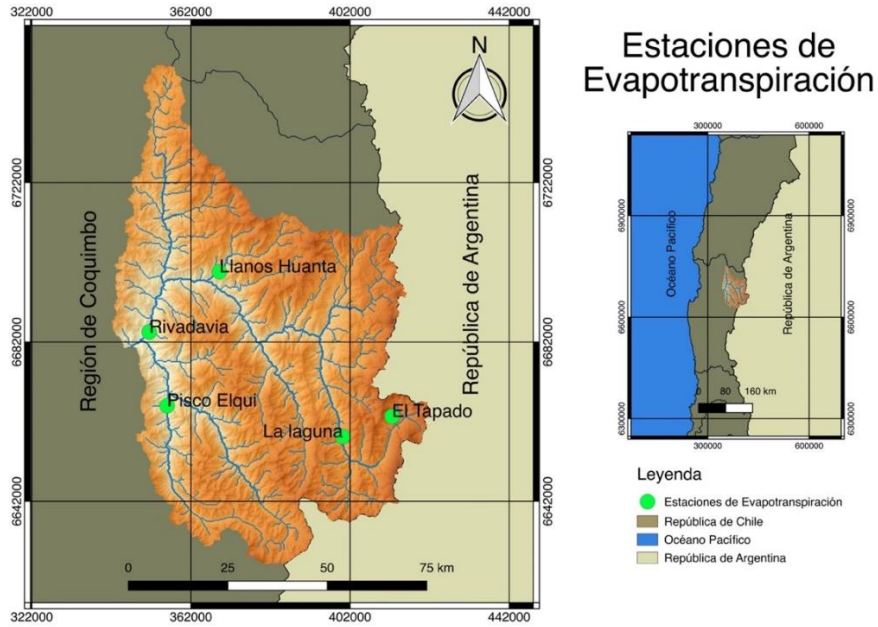
Figura 5.1: Imágenes de evapotranspiración media mensual promedio del cultivo de referencia. Período 2002-2016.

En la Figura 5.2 se aprecia la evapotranspiración del cultivo de referencia media anual, la cual representa la climatología de dicha variable. Se puede apreciar mayores valores en la parte baja de la cuenca, esto debido a que en la parte alta existe una disminución de la radiación neta, principalmente debido a la nubosidad presente en las zona cordillerana chilena.

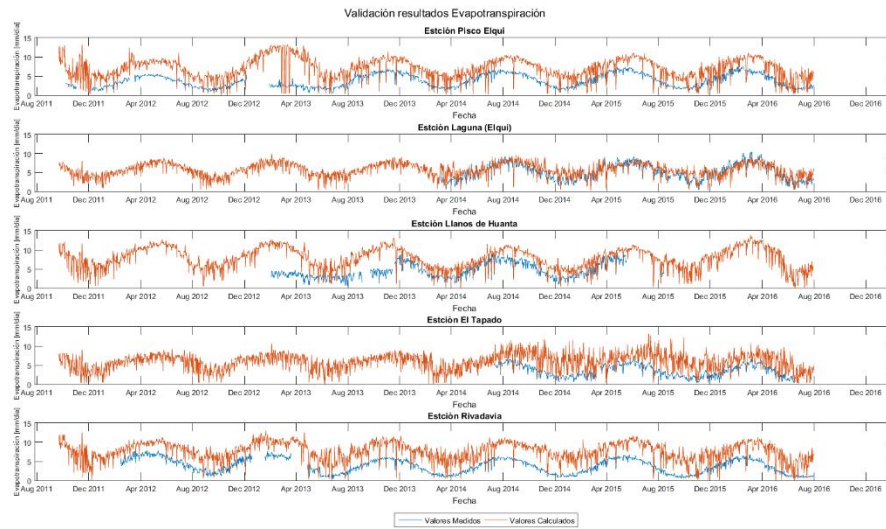


**Figura 5.2: Evapotranspiración media anual. Período 2002-2016.**

Con el fin de validar los resultados, se extraen los valores calculados de evapotranspiración del cultivo de referencia para los pixeles de las estaciones con mediciones directas y se comparan, dichas estaciones se muestran en la Figura 5.3 y en la Figura 5.4 se puede apreciar dicha comparación.



**Figura 5.3: Estaciones que miden evapotranspiración del cultivo de referencia.**



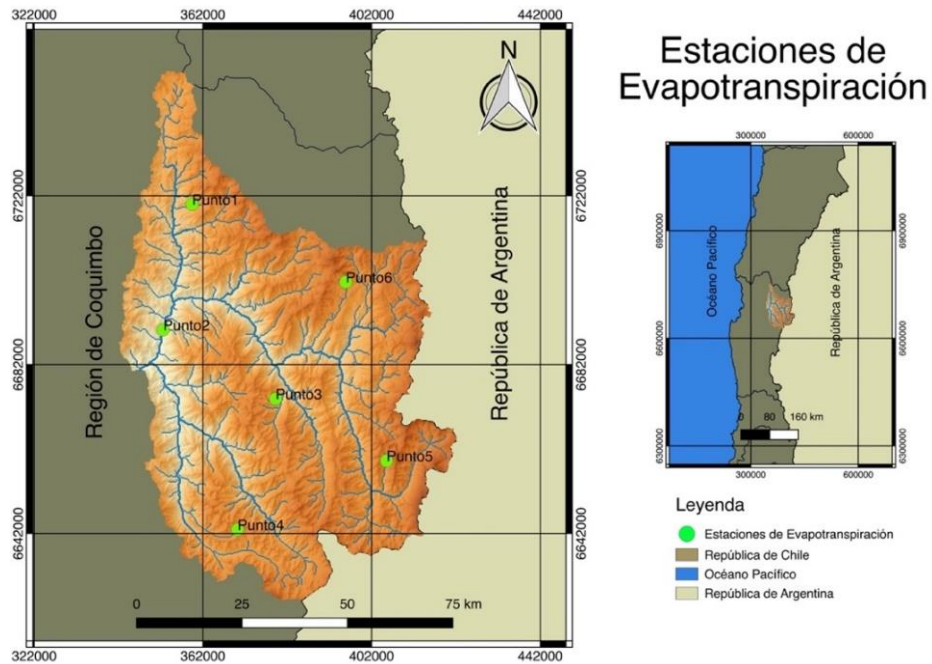
**Figura 5.4: Comparación entre valores medidos y calculados de evapotranspiración del cultivo de referencia para 5 estaciones.**

Al validar los resultados con las mediciones directas de las estaciones (Evapotranspiración del cultivo de referencia), se observan comportamientos similares, pero en todas las estaciones, a excepción de Laguna (Elqui), los valores calculados sobrestiman a los medidos y presentan una mayor dispersión. En la Tabla 5.1 se presentan los errores relativos de las 5 estaciones, donde la estación Laguna (Elqui) es la que presenta un menor error y la estación Rivadavia es la que presenta el mayor índice. En promedio se obtiene un error de un 25,1%.

**Tabla 5.1: Error relativos asociados a cada estación.**

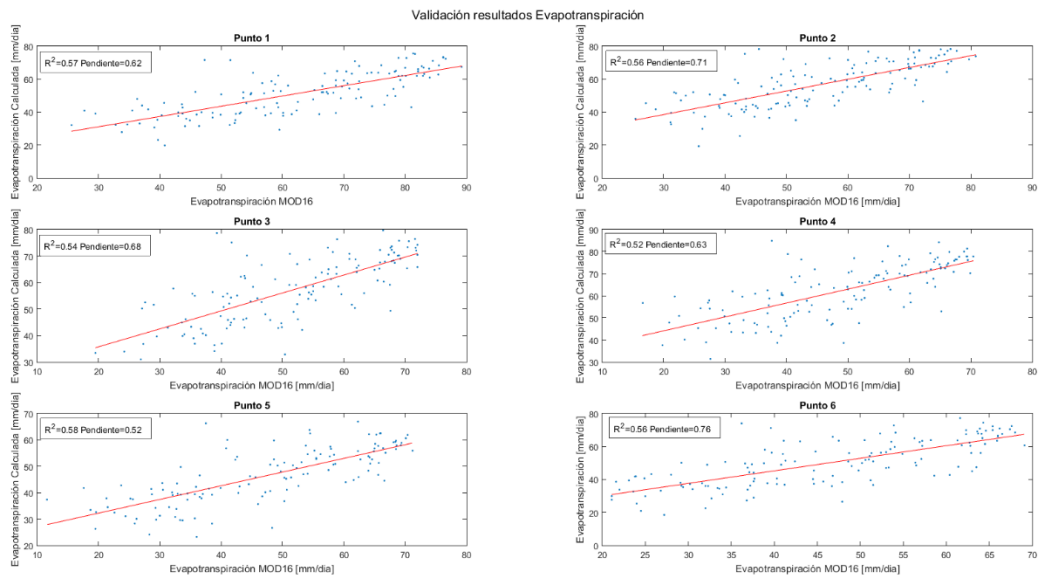
Estación	Error [%]
Pisco Elqui	25,6
Laguna (Elqui)	7,8
Llanos de Huanta	22,1
El Tapado	31,2
Rivadavia	38,6

También se cuenta con el producto MOD16, del satélite MODIS, el cual entrega resultados de evapotranspiración real y del cultivo de referencia acumulada cada 8 días, por lo que para validar se acumulan los valores de evapotranspiración del cultivo de referencia de las matrices calculadas para períodos coincidentes. Para realizar la comparación se seleccionan 6 puntos bien distribuidos en la cuenca, considerando diferentes alturas y pendientes, los cuales se pueden observar en la Figura 5.5 y se extraen las series de valores de evapotranspiración del cultivo de referencia acumulada para dichos pixeles (independientemente de su resolución). A partir de lo anterior se obtienen las correlaciones de la Figura 5.6.



**Figura 5.5: Puntos de comparación de evapotranspiración.**





**Figura 5.6: Validación de resultados mediante producto MOD16.**

## Capítulo 6 : Conclusiones

La importancia de este estudio se basa en la escasa disponibilidad de estaciones meteorológicas, limitante al momento de la determinación de muchas variables, incluyendo la evapotranspiración, la cual es un importante componente para variados análisis, como el cálculo de un balance hídrico o el análisis de ciclos hidrológicos, por lo que al realizar una estimación a nivel diario y en alta resolución de manera remota de dicha variable es una buena alternativa para dar solución a esta problemática.

Los objetivos planteados se cumplieron a cabalidad, se mejoró la resolución espacial y temporal de la estimación de evapotranspiración del cultivo de referencia a partir de las imágenes satelitales disponibles, generando matrices de temperatura y posteriormente de evapotranspiración, a nivel diario en alta resolución espacial para toda la cuenca.

En el actual trabajo se optó por realizar la distribución espacial de las variables que permiten calcular la evapotranspiración del cultivo de referencia (exceptuando temperatura), a través del método del inverso de la distancia ponderado, el cual dio resultados aceptables, tal vez se pudieron haber obtenido mejores resultados a partir de alguna de las metodologías planteadas en el Capítulo 2, sección 2.5.

Como se planteó en la metodología fue necesario crear una metodología de relleno (Anexo F) para las imágenes satelitales MODIS, las cuales vienen con información faltante, al aplicar dicha metodología se aprecian resultados satisfactorios, ya que se aprecia continuidad en dicho parámetro y no se aprecian anomalías en las imágenes resultantes.

En cuanto a la mejora espacial y temporal de temperatura de suelo, a partir de las imágenes satelitales disponibles y la posterior transformación a temperatura del aire, dicho proceso se realiza de manera satisfactoria, obteniendo los productos esperados. Se puede mejorar dicho procesamiento estimando la variación de la temperatura extrema diaria y la capturada por el satélite, mediante un factor de diferencia horaria, es decir, si el satélite capta la temperatura máxima a las 13:56 y generalmente en la zona de estudio la temperatura máxima ocurre a las 15:30, ponderar la temperatura por un factor que permita aumentar o disminuir, según el caso, la temperatura.

En cuanto a la información utilizada es clave destacar la utilización de varias estaciones meteorológicas, las cuales permiten calibrar las temperaturas extremas y obtener los parámetros complementarios para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo de referencia.

Al analizar los resultados obtenidos, en comparación con las mediciones directas de las estaciones, claramente se presenta una mayor dispersión de los valores calculados, esto se puede deber a que todos los parámetros utilizados en el método FAO Penman-Monteith (FAO, 2006) presentan una variabilidad por si solos, por lo que al combinarlos dicha variabilidad se vio potenciada. También, en casi todos los lugares de medición, los resultados

obtenidos sobrestiman los medidos in-situ, esto puede ser atribuible a valores elevados de radiación o de temperatura, el error calculado entre los valores medidos y calculados corresponde en un promedio a un 25 %.

Al realizar la validación con el producto del satélite Modis, MOD16 de evapotranspiración del cultivo de referencia acumulada se obtienen buenas relaciones, todas con coeficiente de determinación mayor a 0.5 y en promedio mayor a 6.5, validando así los resultados obtenidos. De igual manera la información proporcionada por dicho satélite posee un error asociado, por lo que la variabilidad asociada a esta información no es menor.

Durante las diferentes épocas del año se aprecian cambios en los niveles de evapotranspiración del cultivo de referencia a nivel mensual o estacional, donde en verano y sus respectivos meses asociados, se aprecian mayores volúmenes evapotranspirados, los cuales van en decaimiento hasta llegar al invierno. Además, en la parte alta de la cuenca la evapotranspiración del cultivo de referencia es menor que en la parte baja, lo que se puede deber a las condiciones meteorológicas asociadas a la altura y zona cordillerana.

Se presenta la complejidad del procesamiento de gran cantidad de imágenes satelitales y parámetros para obtener el producto final, lo anterior genera un problema de procesamiento, ya que al realizar cálculos algebraicos incluyendo matrices de alta resolución y para un periodo de estudio extenso, es necesario utilizar computadores o servidores de alta gama, particionar los cálculos y disponer de mucho tiempo de procesamiento.

# Capítulo 7 Bibliografía

- Aguilera, E. (2017). *Representación de la hidrología glaciar de la cuenca del río Maipo a través de un modelo hidrológico simplificado*. Tesis para optar al grado de Ingeniero Civil mención recursos y medio ambiente hídrico. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.
- Borini, D., Montorio, R., Pérez-Cabello, F., & Vlassova, L. (2015). *Fusionado de imágenes Terra-MODIS y Landsat-TM/OLI en el contexto del análisis del incendio forestal de Las Hurdes (Cáceres)*. (2. R.-C. D. Borini Alves1, Ed.)
- Cepeda, J., & Vargas, X. (2016). *Metodología para obtener un nuevo producto de cobertura nival en base a Modis FCSA NDSI Landsat*. Lima, Peru: XXVII Congreso latinoamericano de hidráulica.
- Chuvieco, E. (2002). *Teledetección Ambiental: La observación de la Tierra desde el Espacio*. Barcelona. Barcelona, España: Ariel Ciencia. 584 pp. ISBN 978-84-344-8073-3.
- Cornwell, E. (2012). *Reconstrucción del equivalente en agua de nieve mediante imágenes Modis incorporadas a un balance de masa-energía*. Santiago, Chile: Tesis para optar al grado de magister en ciencias de la ingeniería mención recursos y medio ambiente hídrico. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile. .
- Dee, D. P., Monge-Sanz, B., Morcrette, J., Park, B., Peubey, C., de Rosnay, P., . . . Vitart, F. (2011). *The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society.
- DeWalle, D., & Rango, A. (2008). *Principles of Snow Hydrology*. New York, United States of America.
- Dirección General de Aguas (DGA) . (2004). *Diagnostico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del Rio Elqui*. Santiago, Chile.
- Doorenbos, J., & Pruitt, W. O. (1975). *Guidelines for predicting crop water requirements, Irrigation and Drainage*. Paper 24, FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Emery, X. (2000). *Geoestadística lineal*. Departamento de Ingeniería en Minas. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.
- Frank, E., & Lee, R. (1966). *Potential Solar Beam Irradiation on Slopes: Tables for 30° to 50° Latitude*. US Department of Agriculture, Forest Service.
- Gafurov, A., & Bárdossy, A. (2009). *Cloud removal methodology from MODIS snow cover product*. Hidrol. Earth Syst. Sci., 13, 13611373.

- Gao, F., Masek, J., Schwaller, M., & Hall, F. (2006). *On the blending of the Landsat and MODIS surface reflectance: predicting daily Landsat surface reflectance*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.
- Guevara, J. (2013). *Cuantificación del perfil del viento hasta 100 m de altura desde la superficie y su incidencia en la climatología eólica*. TERRA XXIX. N° 46, 2013, pp 81 - 101 .
- Jiménez-Muñoz, J., & Sobrino, J. (2003). *A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data*. Journal of Geophysical Research, Volume 108, Issue D22.
- Kohonen, T. (1989). *Self-organization and associative memory*. Springer Verlag, New York, USA.
- Meruane, C., & Garreaud, R. (2006). *Determinación de la Humedad en la Atmósfera*.
- Meyer, P. (1993). *Radiometric corrections of topographically induced effects on Landsat TM data in an alpine environment Author links open overlay*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing.
- Monteith, J. L. (1973). *Principles of Environmental Physics*. . New York: American Elsevier Publishing Co., Inc.
- Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación (FAO). (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma, Italia.
- Otondo, I. (2004). *Validación de campos de precipitación y su desagregación mediante análisis multiescalar*. Tesis para optar al grado de magister en ciencias de la ingeniería mención recursos y medio ambiente hídrico. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile. Santiago. Chile. .
- Paez, F. (2012). *Comportamiento de un modelo hidrológico distribuido frente a la incertidumbre de la temperatura del aire*. Santiago: Tesis para optar al grado de Ingeniero Civil mención recursos y medio ambiente hídrico. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.
- Paez, F., & Vargas, X. (2014). *Obtención de la temperatura del aire mediante imágenes satelitales Modis y análisis de su variabilidad*. Santiago, Chile: Revista Chilena de Ingeniería ISSN 0370-4009- N° 472: 49-58.
- Qin, Z., Karnieli, A., & Berliner, P. (2001). *A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region*. International Journal of Remote Sensing.
- Riego, C. N. (1997). *Cálculo y cartografía de la evapotranspiración*. Santiago, Chile.

- Rosenberg, N. J., Blad, B. L., & Verma, S. (1983). *Microclimate, the biological environment*. New York, USA.: John Wiley & Sons, second edition.
- Sánchez, M. I. (1992). *Métodos para el estudio de la evaporación y evapotranspiración*. Cuadernos Técnicos de la Sociedad Española de Geomorfología N° 3. Logroño: Geofoma Ediciones.
- Song, C., Woodcock, C., Seto, K., PaxLenney, M., & Macomber, S. (2001). *Classification and Change Detection Using Landsat TM Data: When and How to Correct Atmospheric Effects?* Remote Sensing of Environment 75.
- Sun, H., Chen, Y., Gong, A., Zhao, X., Zhan, W., & Wang, M. (2014). *Estimating mean air temperature using MODIS day and night land surface temperatures*. Journal of Theoretical and Applied Climatology 118: 81-92.
- Thornthwaite, C. (1948). *An approach toward a rational classification of climate*. Geogr. Rev. 38, 55–94.
- Weng, Q., Lu, D., & Schubringa, J. (2004). *Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies*. Remote Sensing of Environment Volume 89, Issue 4.
- Wieringa, J. (2001). *Station exposure metadata needed for judging and improving quality of observations of wind, temperature and other parameters*.
- Williamson, S. N., Hik, D. S., Gamon, J. A., Kavanaugh, J. L., & Flowers, G. E. (2014). *Estimating temperature elds from modis land surface temperature and air temperature observations in a sub-arctic alpine environment*. Remote Sensing 6(2), 946 963.
- Zhang, J., Wanga, W., & Lib, Y. (2006). *A C++ program for retrieving land surface temperature from the data of Landsat TM/ETM+ band6*. Computers & Geosciences, Volume 32, Issue 10, Pages 1796-1805.

# Anexos

## Anexo A

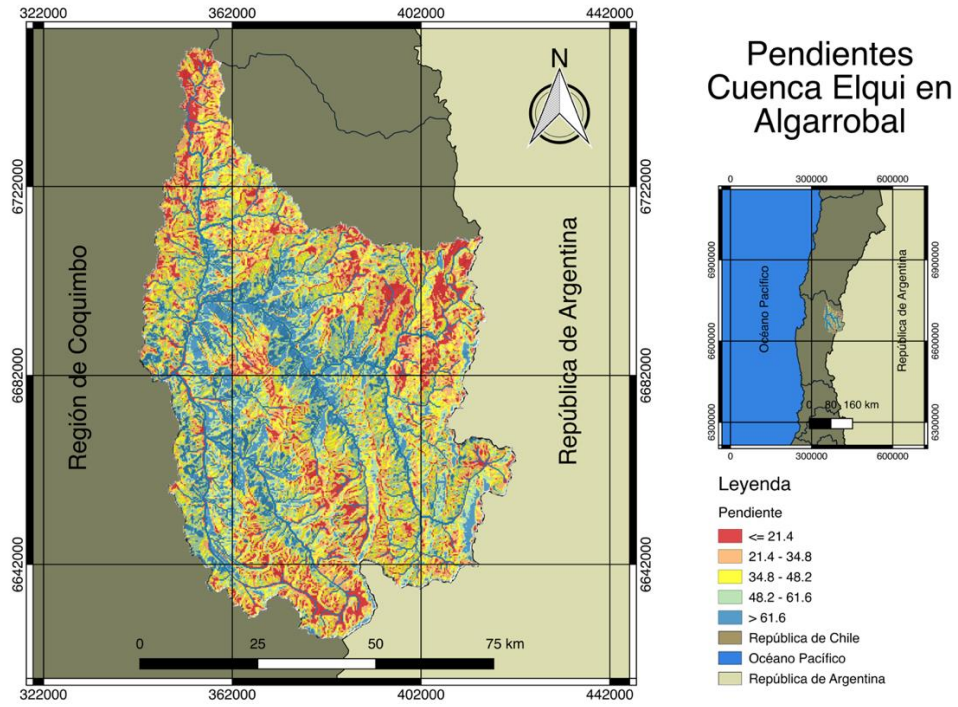


Figura A.1: Mapa de pendientes.

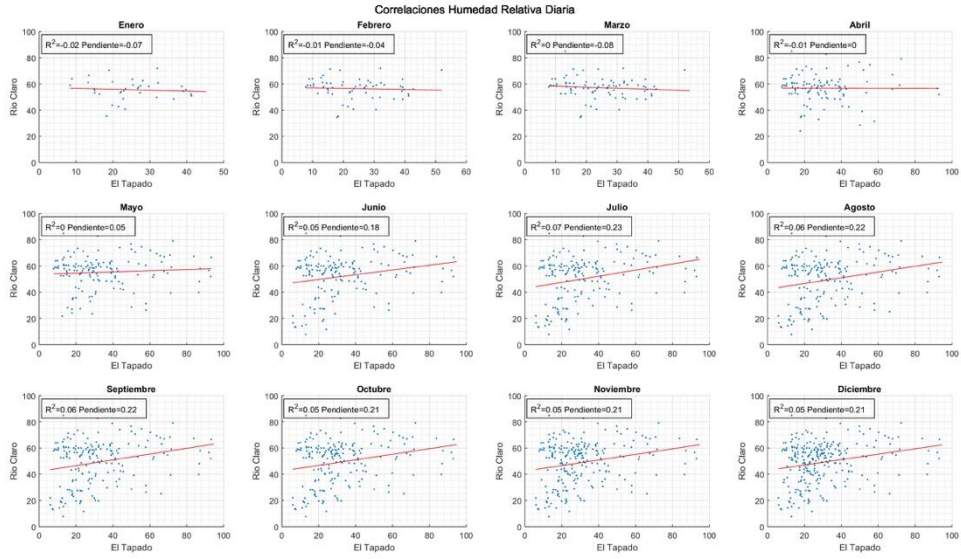
## Anexo B

**Tabla B.1: Valores Curva Variación Estacional.**

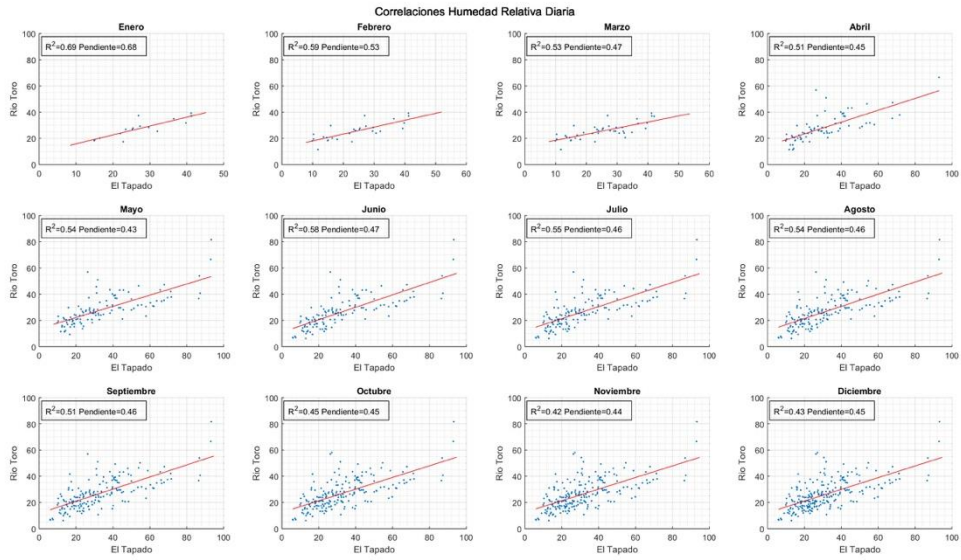
	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Octubre	Nov.	Dic.	Enero	Febrero	Marzo
	Log-Normal	Log-Normal	Log-Normal	Log-Pearson	Log-Pearson	Log-Pearson	Log-Pearson	Log-Pearson	Log-Pearson	Log-Normal	Log-Normal	Log-Normal
5%	18,5	17,0	15,3	15,2	14,4	17,1	24,6	39,6	64,3	50,8	33,7	22,6
10%	14,8	13,7	12,7	12,7	12,9	14,0	18,0	26,1	37,9	31,8	23,3	17,3
25%	10,3	9,6	9,3	9,4	10,4	9,9	11,3	14,2	17,5	15,8	13,3	11,4
50%	6,8	6,4	6,6	6,8	6,7	6,8	7,3	8,1	8,6	8,2	7,7	7,3
75%	4,5	4,3	4,7	4,9	4,7	4,7	5,1	5,2	4,9	4,8	4,8	4,9
85%	3,6	3,5	3,9	4,1	3,8	3,8	4,3	4,3	3,8	3,7	3,9	4,0
90%	3,1	3,0	3,4	3,6	3,4	3,3	3,9	3,8	3,3	3,2	3,4	3,5
95%	2,5	2,4	2,8	3,0	2,8	2,7	3,4	3,3	2,7	2,6	2,8	2,9



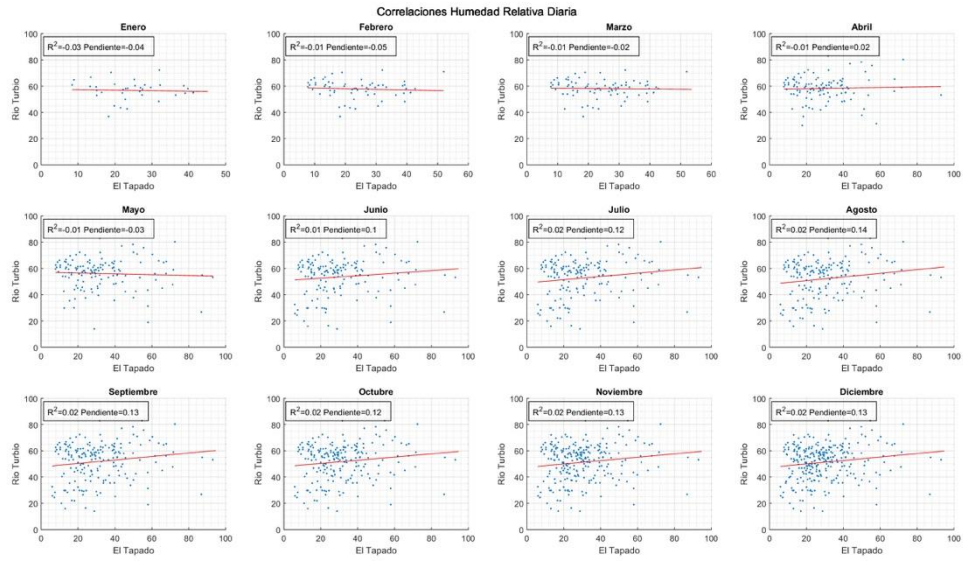
# Anexo C



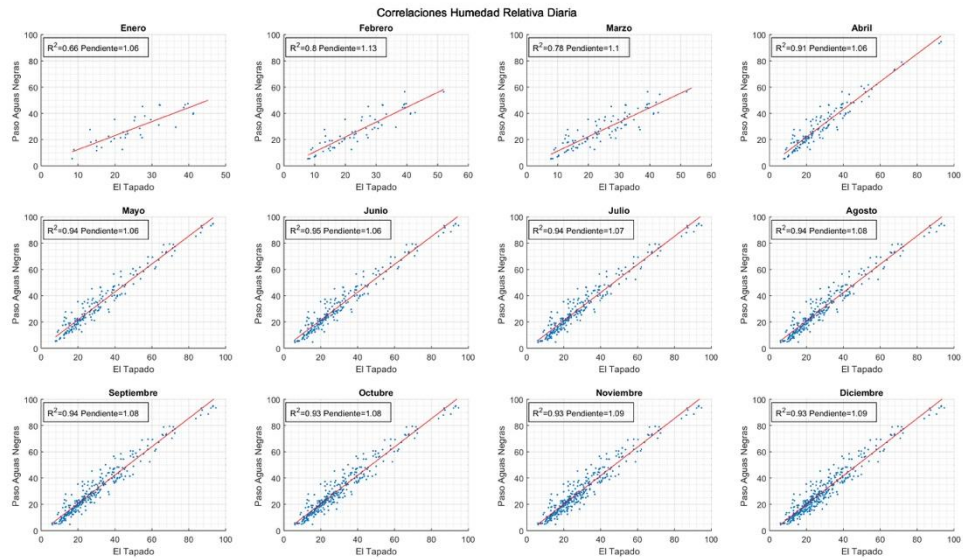
**Figura C.2: Correlaciones Humedad relativa entre Rio Claro y El Tapado.**



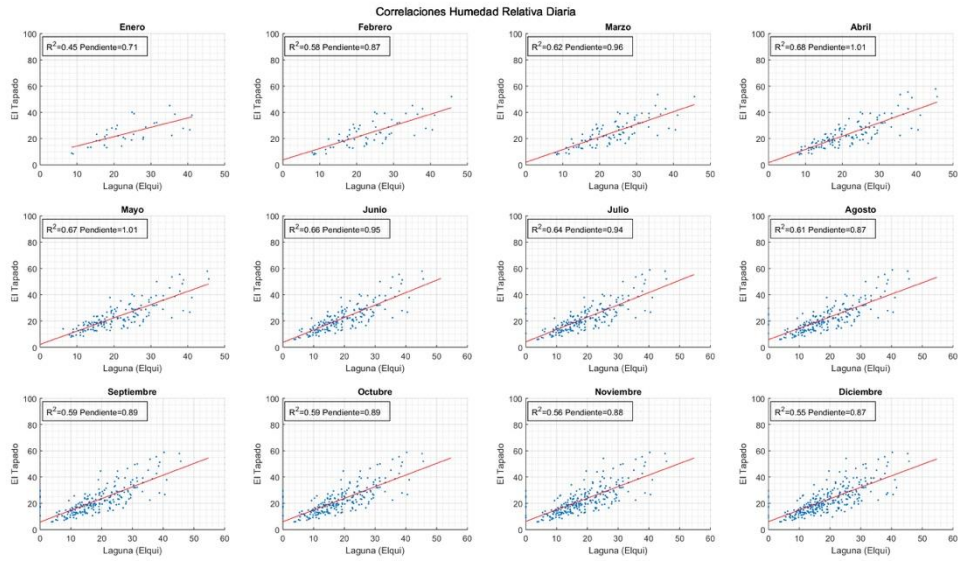
**Figura C.3: Correlaciones Humedad relativa entre Rio Toro y El Tapado.**



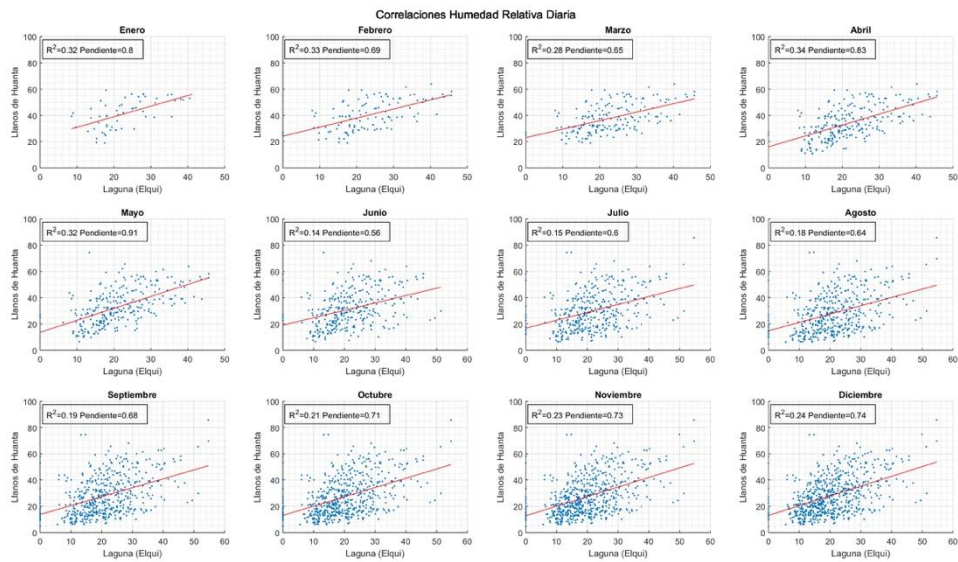
**Figura C.4: Correlaciones Humedad relativa entre Rio Turbio y El Tapado.**



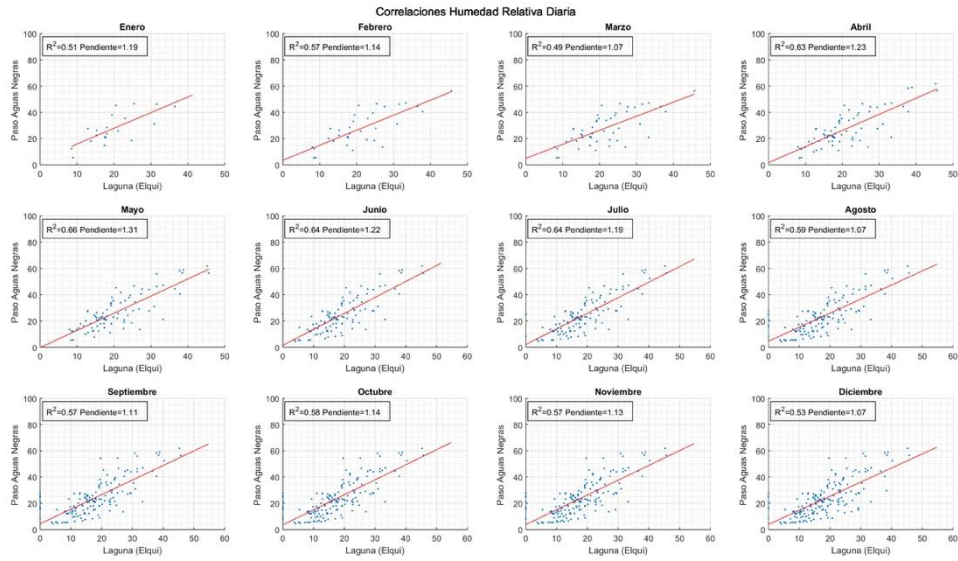
**Figura C.5: Correlaciones Humedad relativa entre Paso Aguas Negras y El Tapado.**



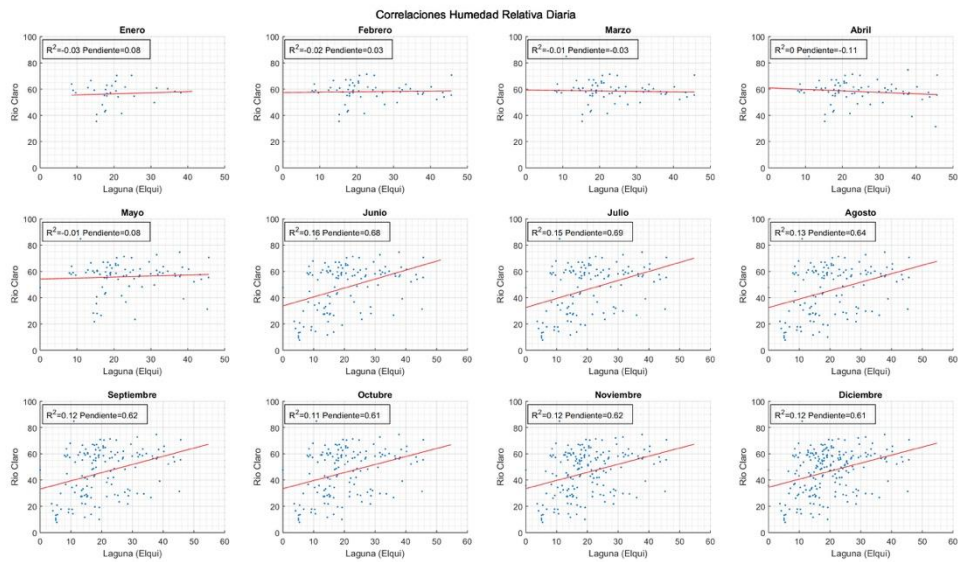
**Figura C.6: Correlaciones Humedad relativa entre Laguna (Elqui) y El Tapado.**



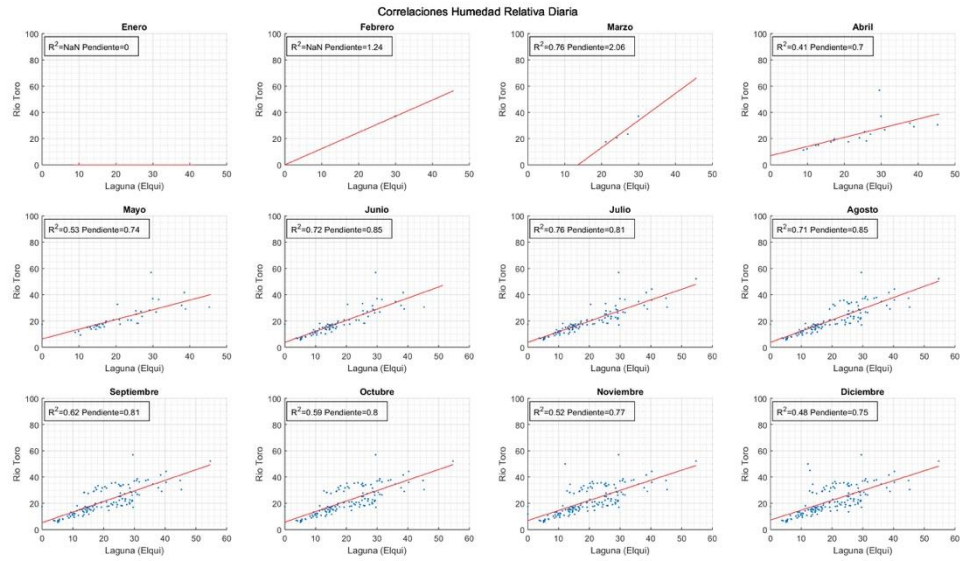
**Figura C.7: Correlaciones Humedad relativa entre Llanos de Huanta y Laguna (Elqui).**



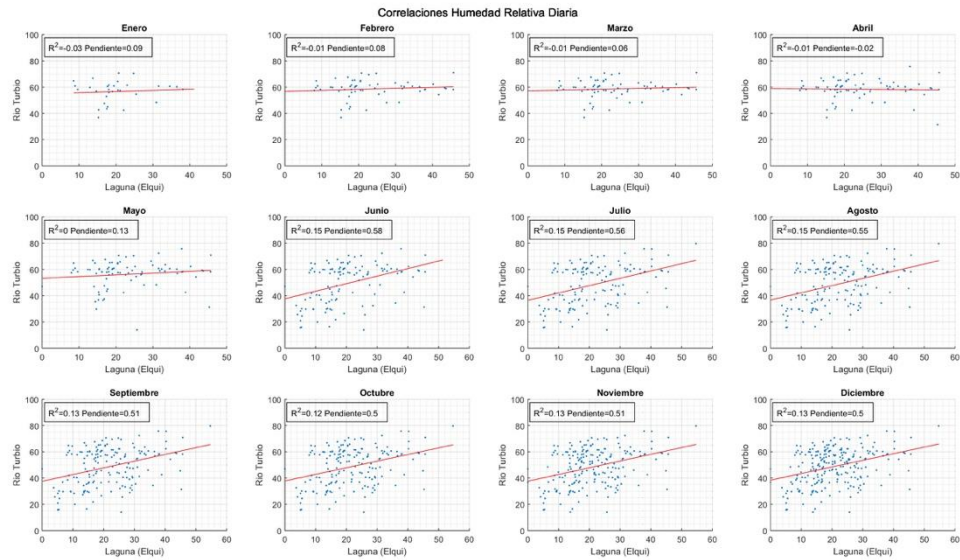
**Figura C. 8: Correlaciones Humedad relativa entre Paso Aguas Negras y Laguna (Elqui).**



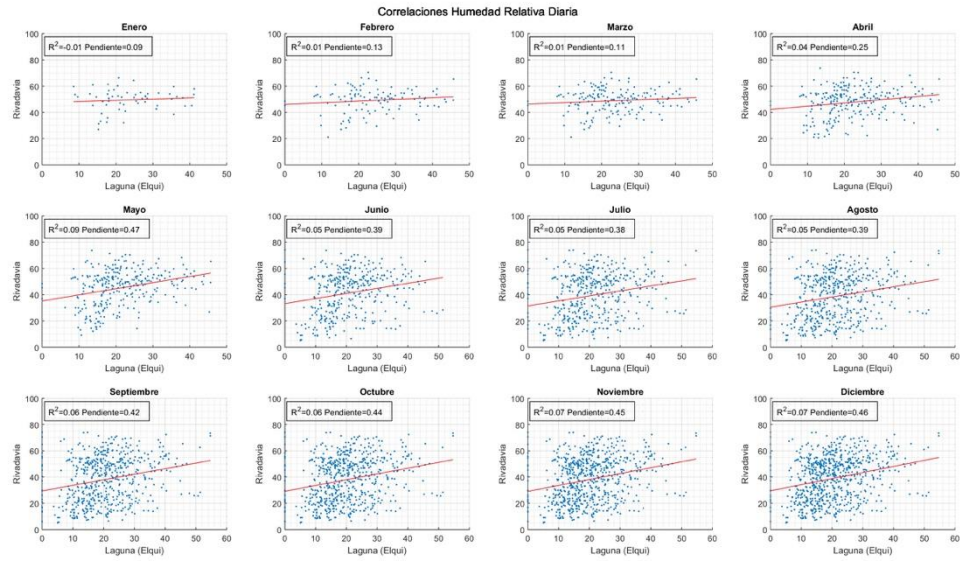
**Figura C. 9: Correlaciones Humedad relativa entre Rio Claro y Laguna (Elqui).**



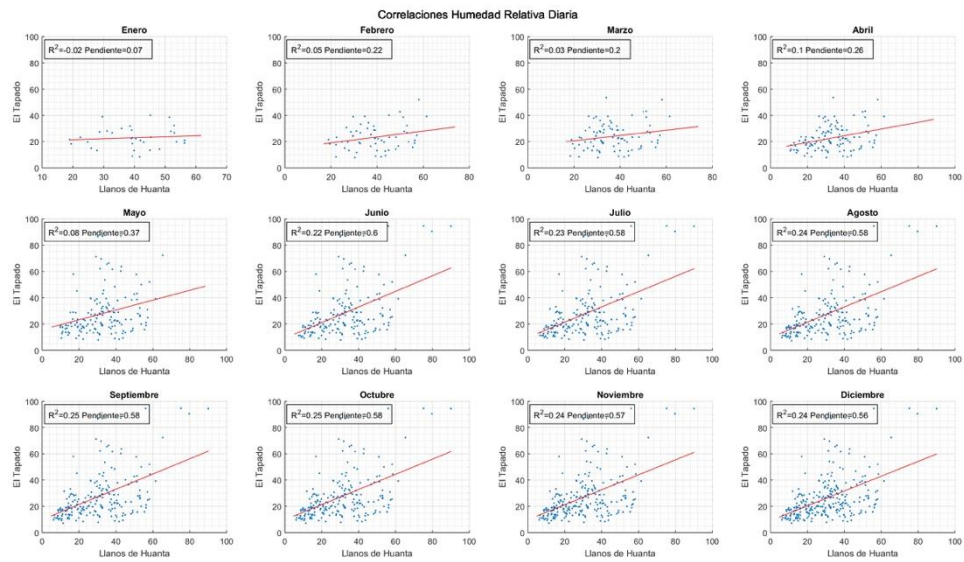
**Figura C.10: Correlaciones Humedad relativa entre Rio Toro y Laguna (Elqui)**



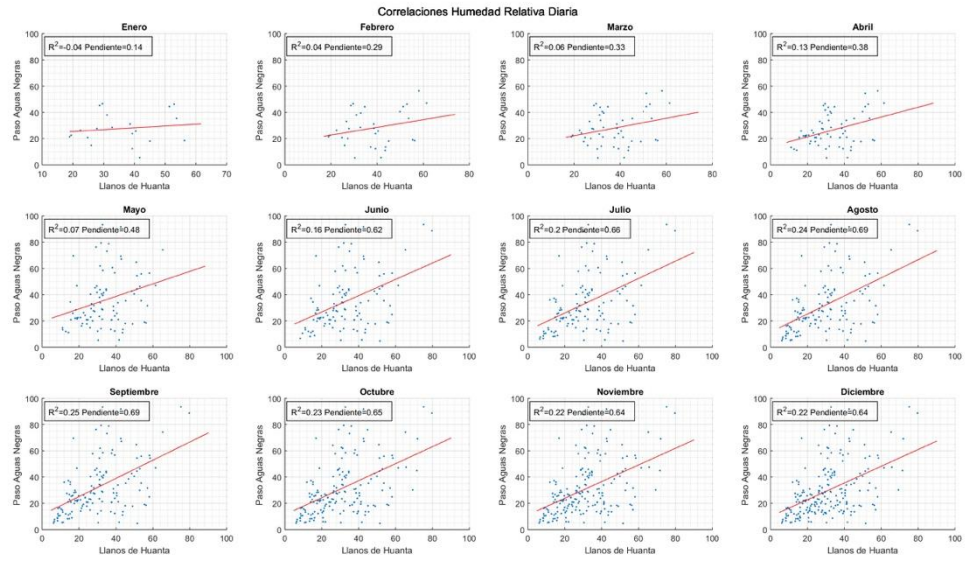
**Figura C.11: Correlaciones Humedad relativa entre Rio Toro y Laguna (Elqui)**



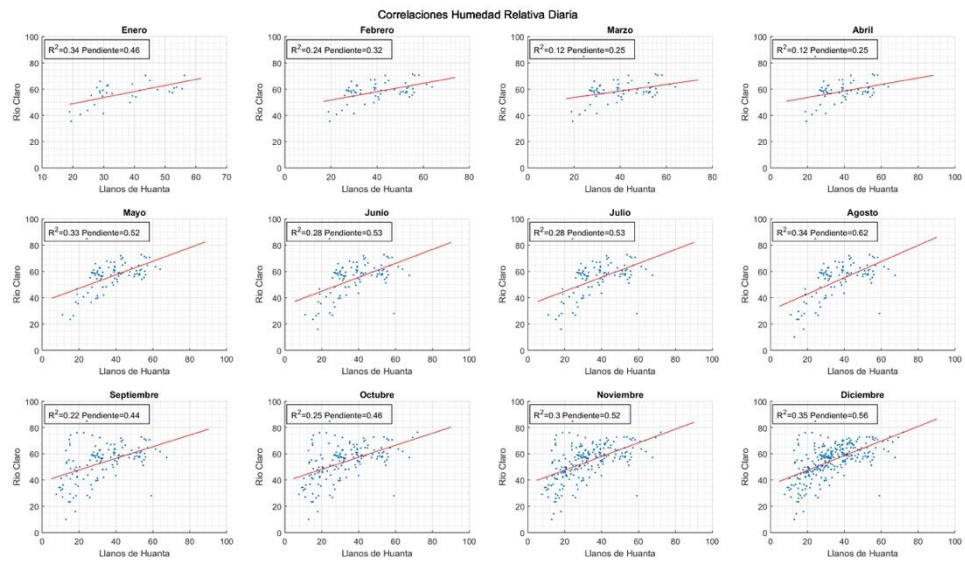
**Figura C.12: Correlaciones Humedad relativa entre Rivadavia y Laguna (Elqui).**



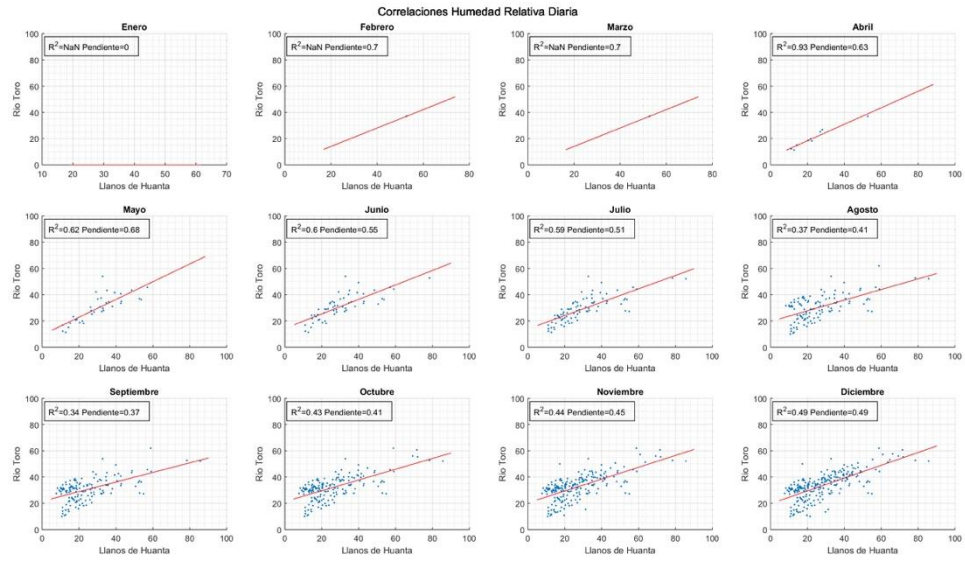
**Figura C. 13: Correlaciones Humedad relativa entre Llanos de Huanta y El Tapado.**



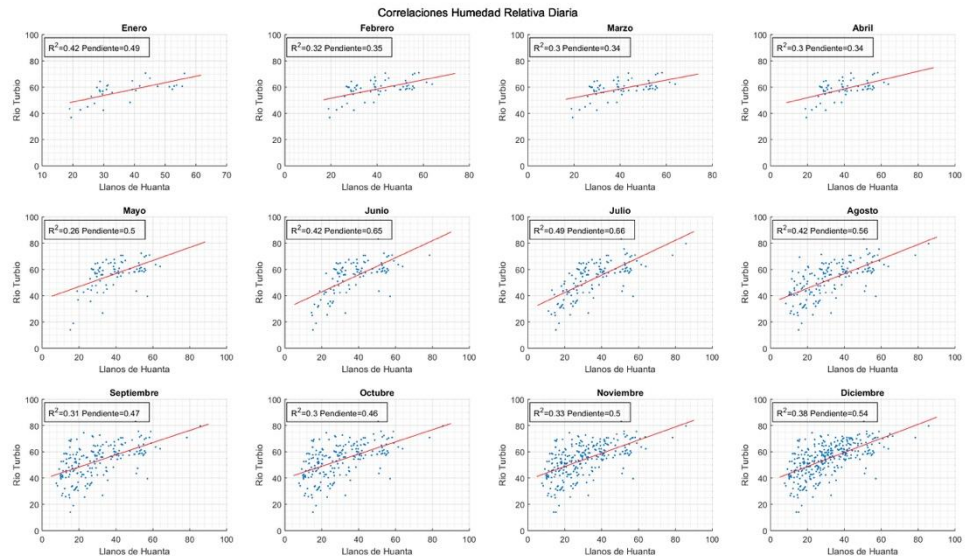
**Figura C.14: Correlaciones Humedad relativa entre Llanos de Huanta y Paso Aguas Negras.**



**Figura C.15: Correlaciones Humedad relativa entre Rio Claro y Llanos de Huanta.**

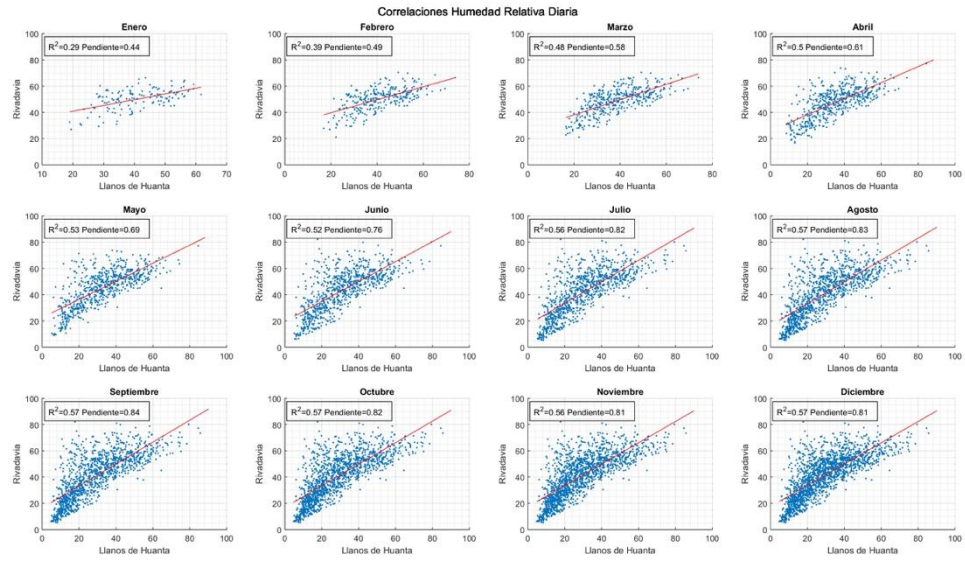


**Figura C.16: Correlaciones Humedad relativa entre Rio Toro y Llanos de Huanta.**

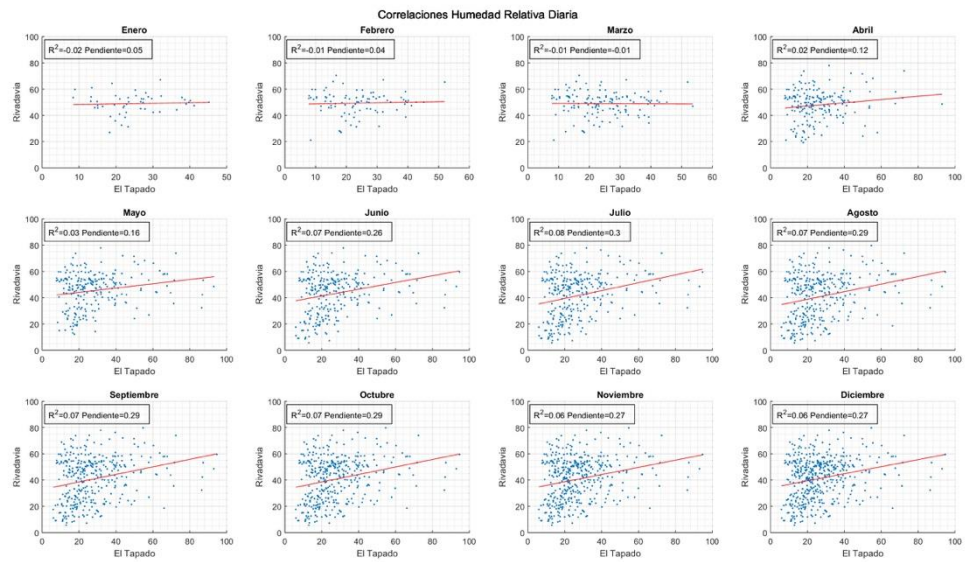


**Figura C.17: Correlaciones Humedad relativa entre Rio Turbio y Llanos de Huanta.**

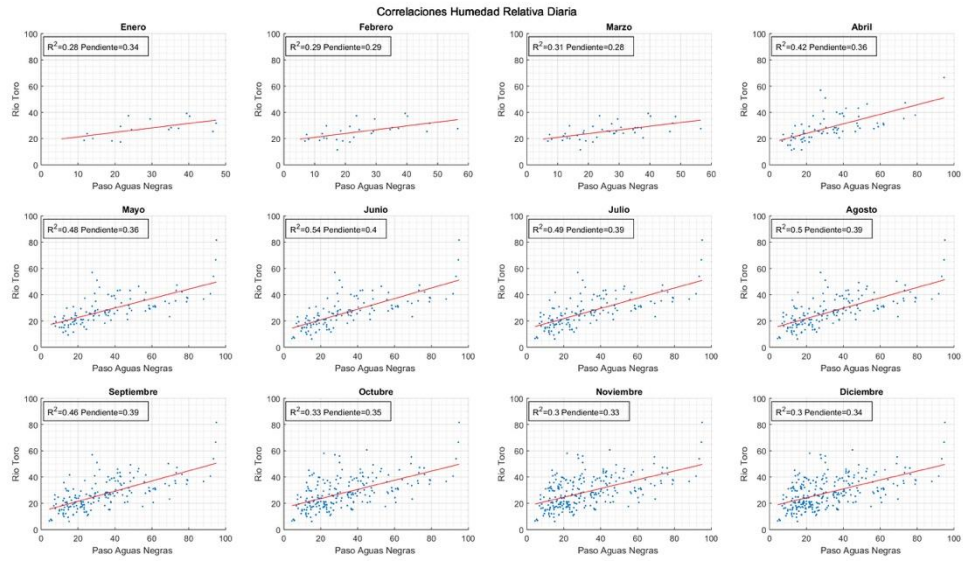




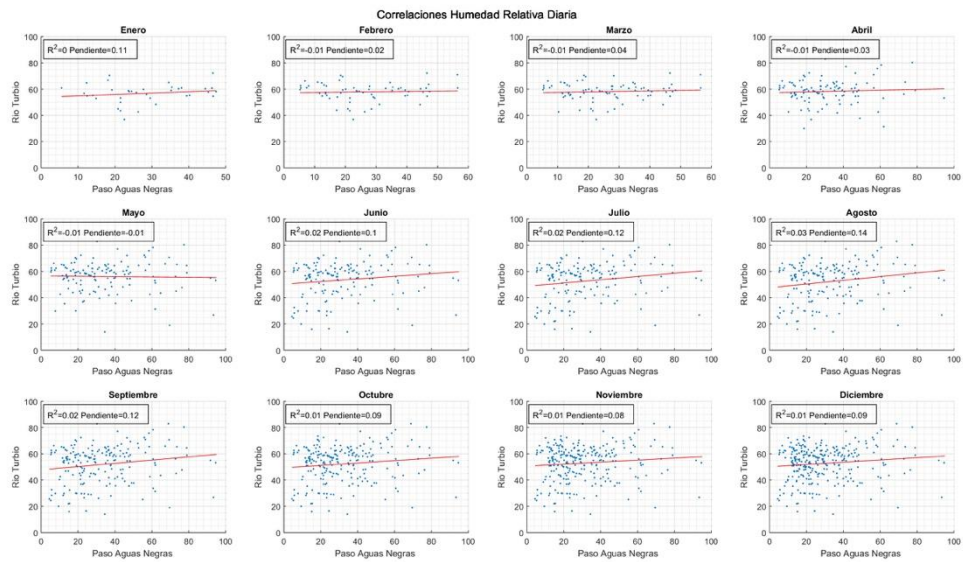
**Figura C.18: Correlaciones Humedad relativa entre Rivadavia y Llanos de Huanta.**



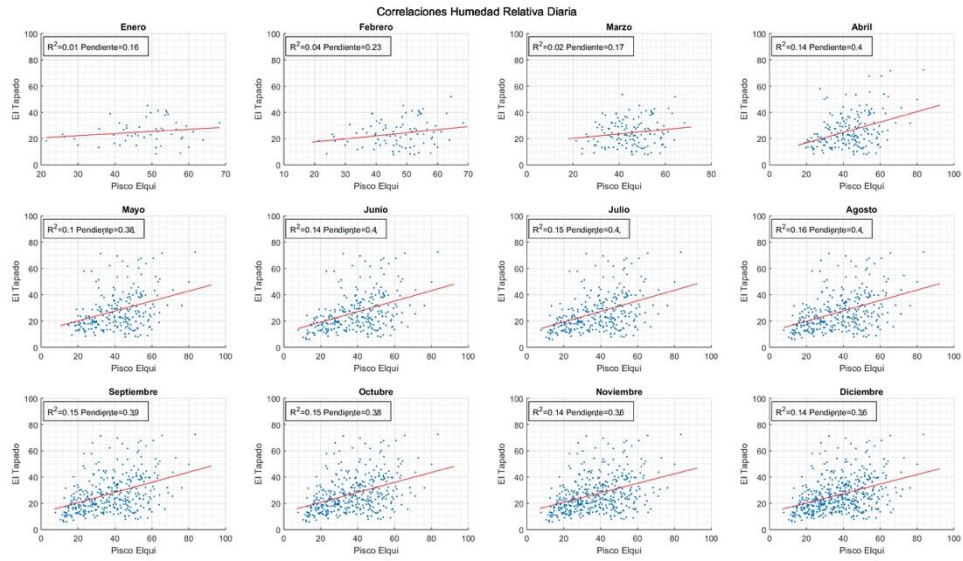
**Figura C.19: Correlaciones Humedad relativa entre Rivadavia y El Tapado.**



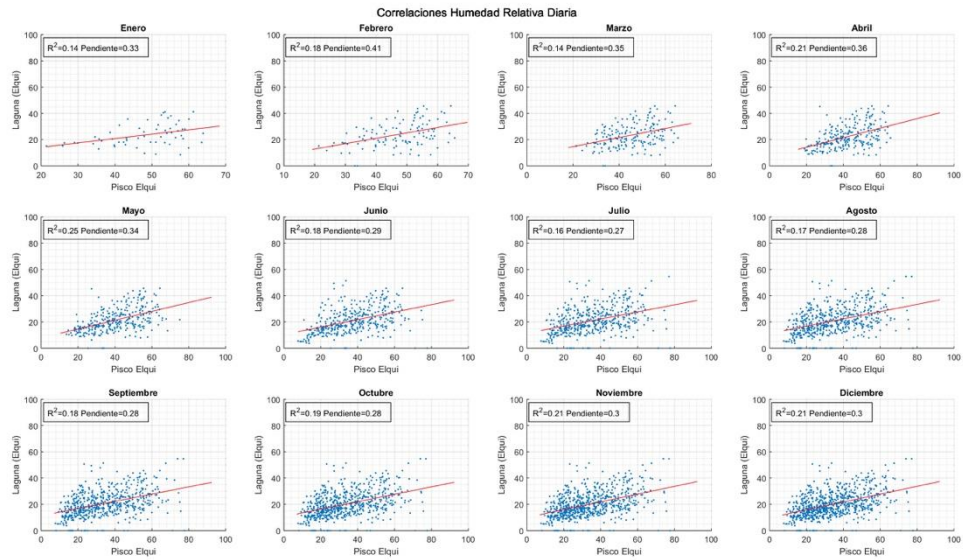
**Figura C.20: Correlaciones Humedad relativa entre Rio Toro y Paso Aguas Negras.**



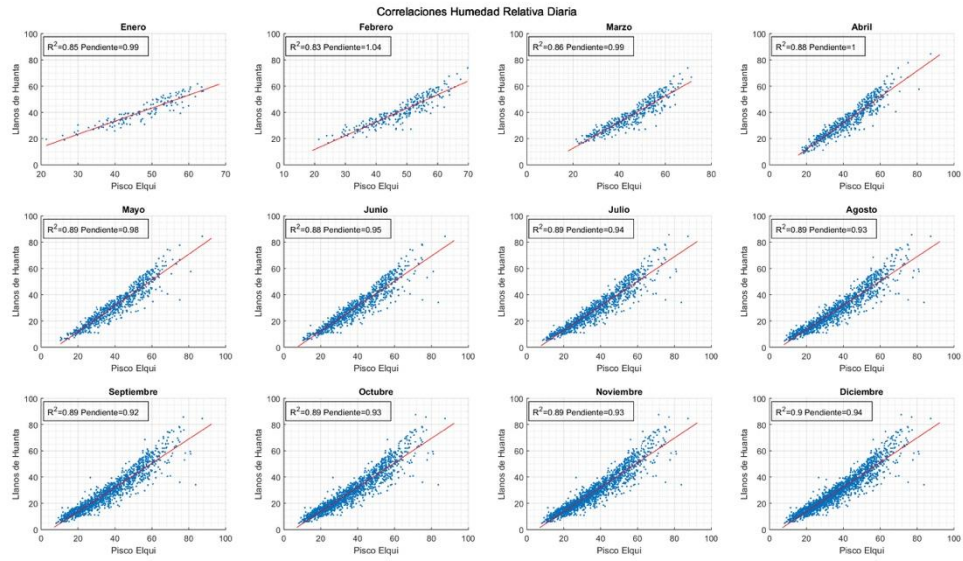
**Figura C.21: Correlaciones Humedad relativa entre Rio Turbio y Paso Aguas Negras.**



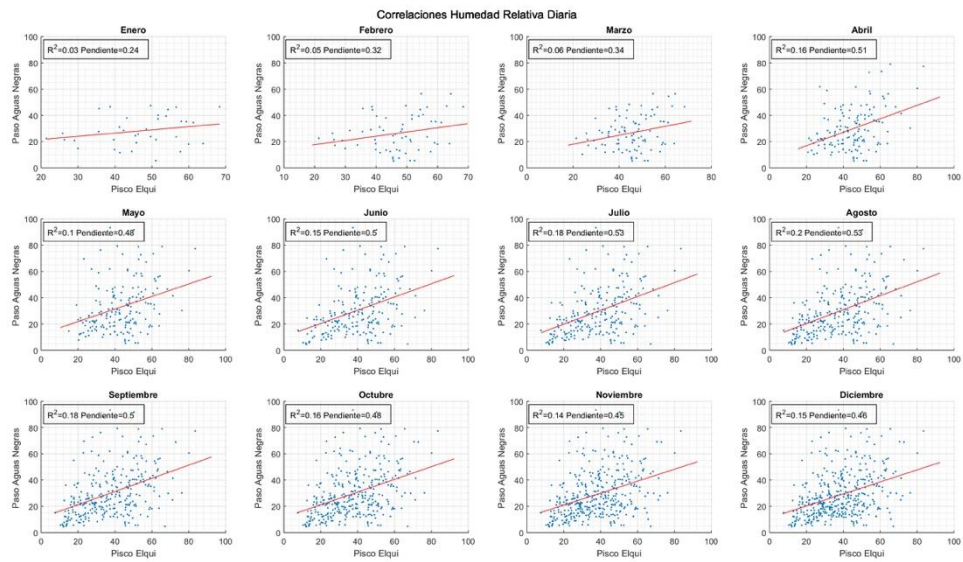
**Figura C.22: Correlaciones Humedad relativa entre Pisco Elqui y El Tapado.**



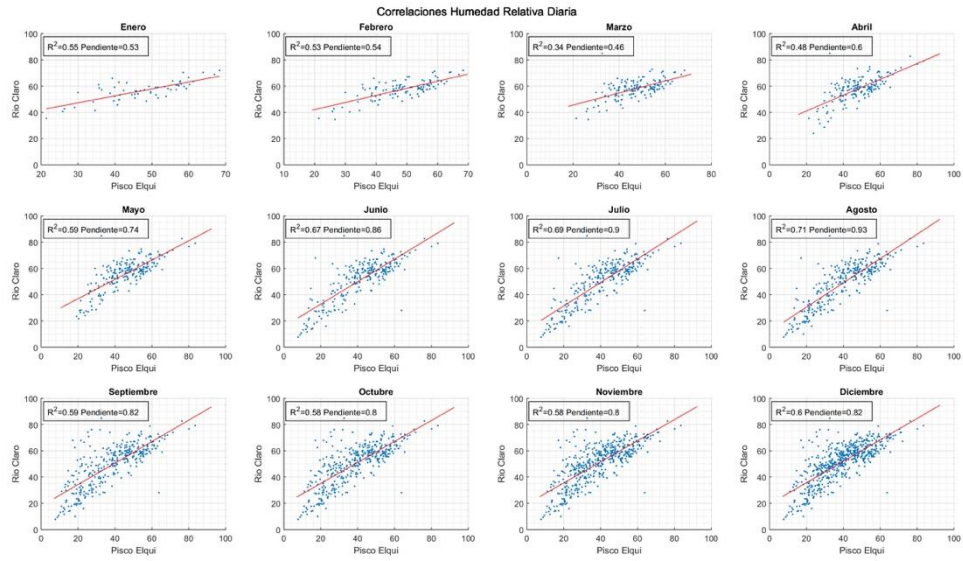
**Figura C.23: Correlaciones Humedad relativa entre Pisco Elqui y Laguna (Elqui).**



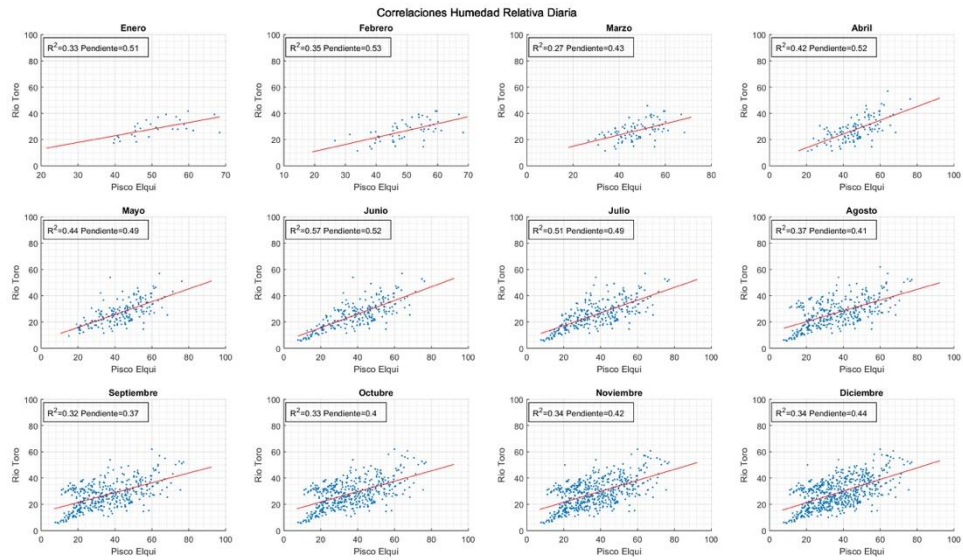
**Figura C.24: Correlaciones Humedad relativa entre Pisco Elqui y Llanos de Huanta.**



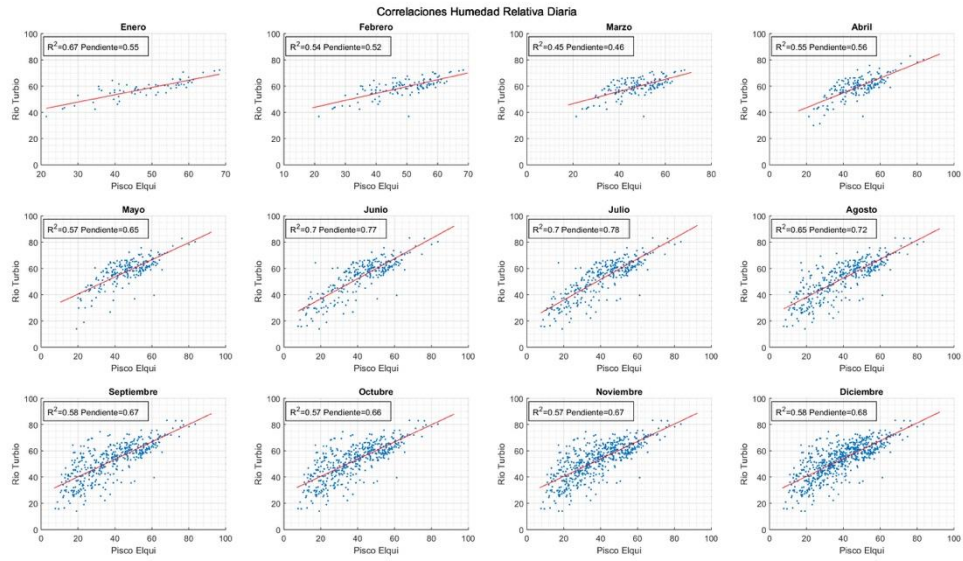
**Figura C.25: Correlaciones Humedad relativa entre Pisco Elqui y Paso Aguas Negras.**



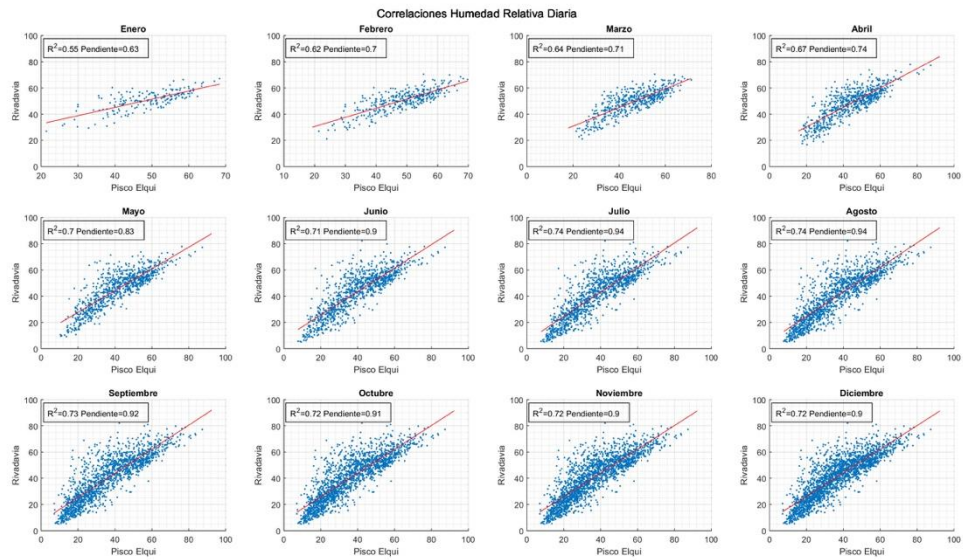
**Figura C.26: Correlaciones Humedad relativa entre Rio Claro y Pisco Elqui.**



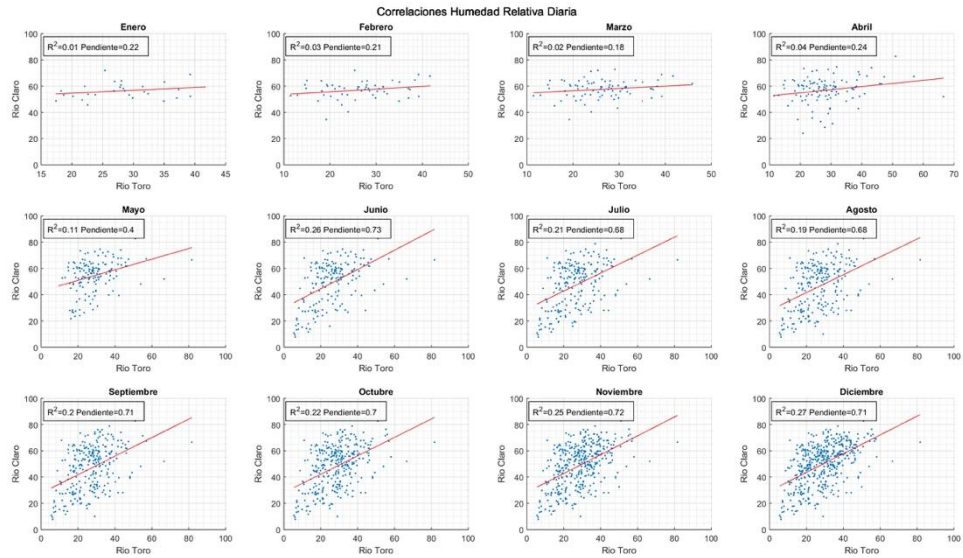
**Figura C.27: Correlaciones Humedad relativa entre Rio Toro y Pisco Elqui.**



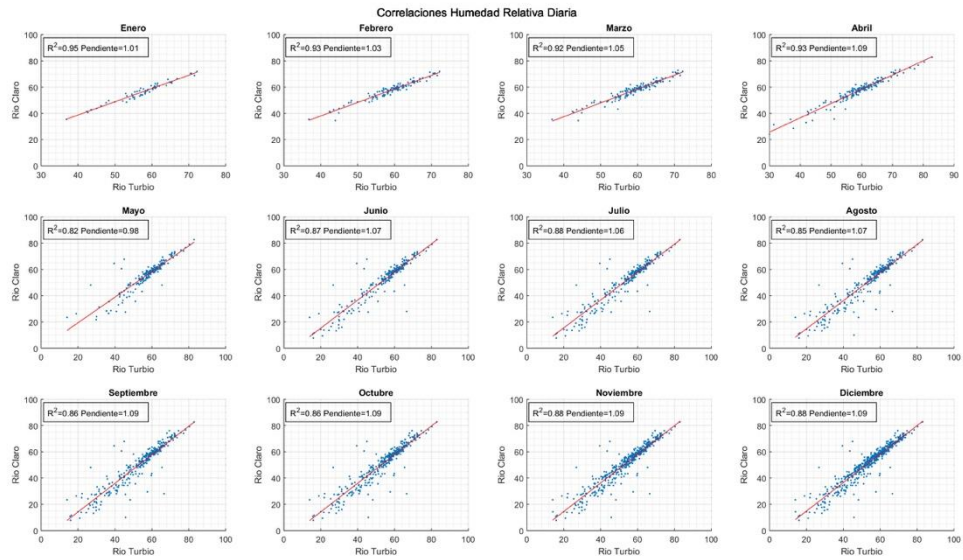
**Figura C.28: Correlaciones Humedad relativa entre Rio Turbio y Pisco Elqui.**



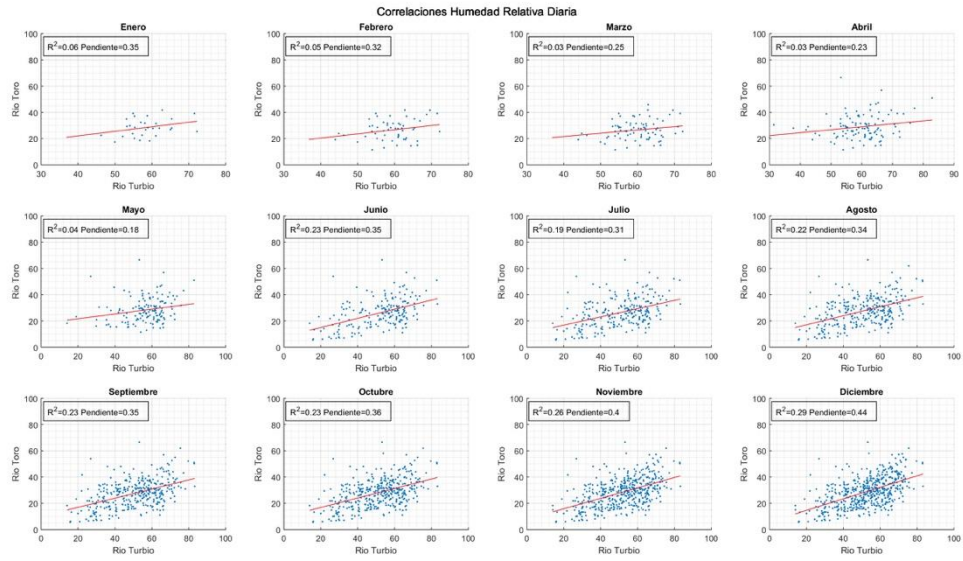
**Figura C.29: Correlaciones Humedad relativa entre Rivadavia y Pisco Elqui.**



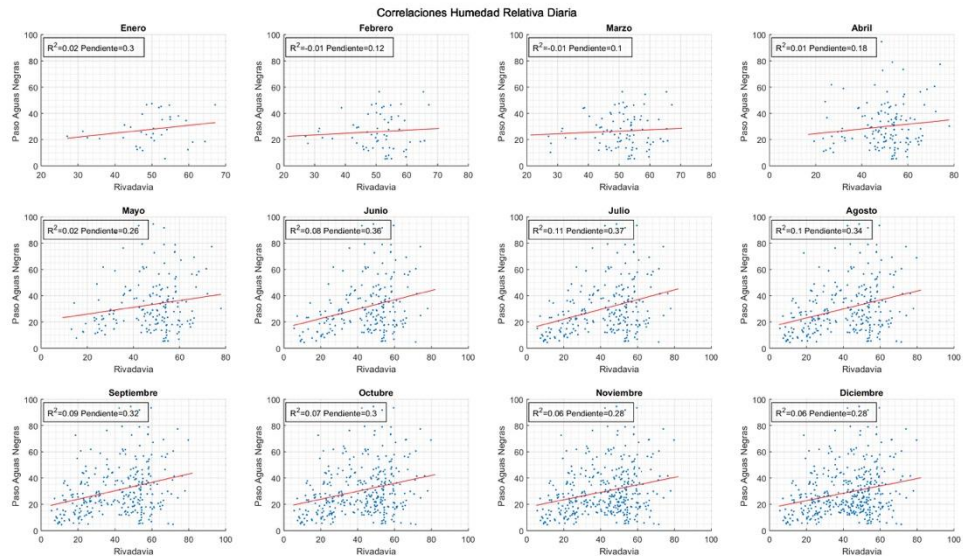
**Figura C.30: Correlaciones Humedad relativa entre Rio Claro y Rio Toro.**



**Figura C.31: Correlaciones Humedad relativa entre Rio Claro y Rio Turbio.**

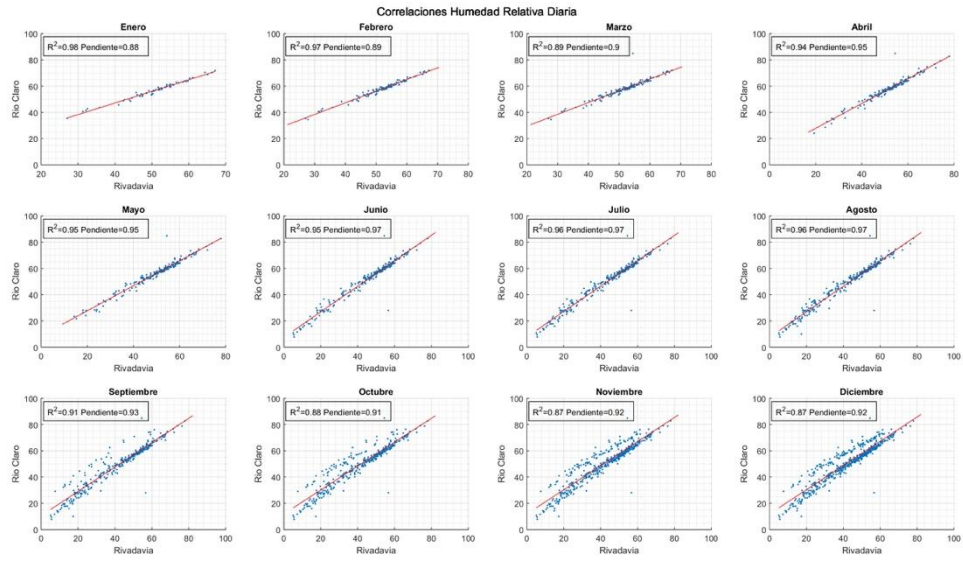


**Figura C.32: Correlaciones Humedad relativa entre Rio Toro y Rio Turbio.**

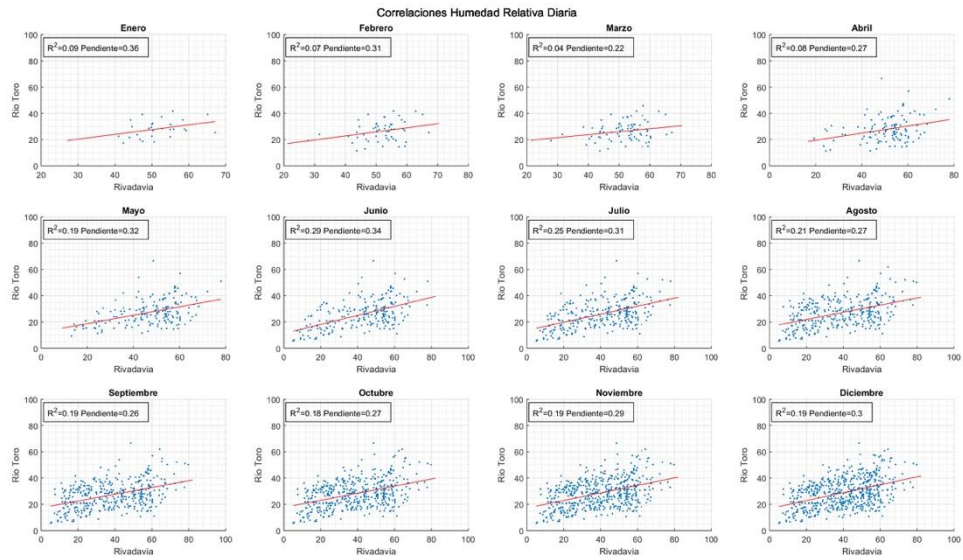


**Figura C.33: Correlaciones Humedad relativa entre Rivadavia y Paso Aguas Negras.**

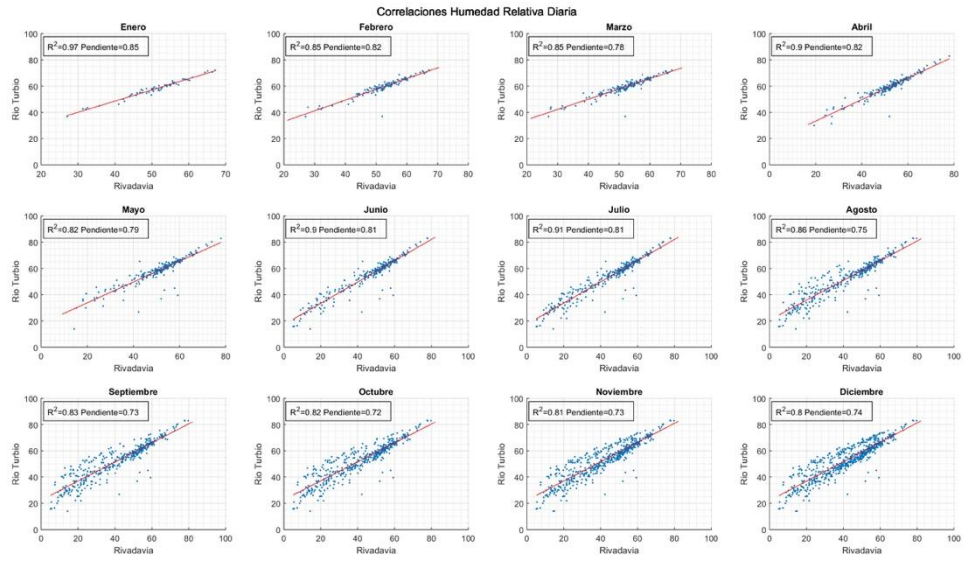




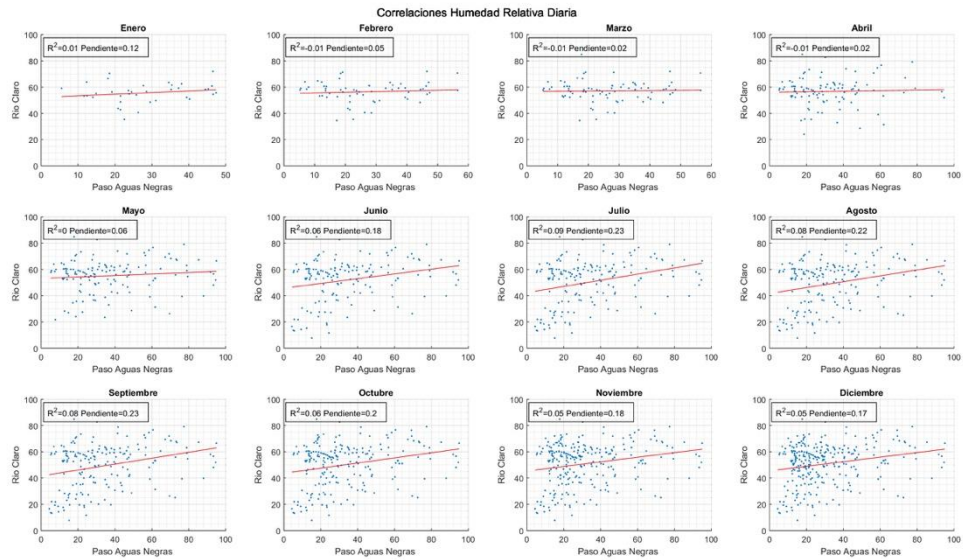
**Figura C.34: Correlaciones Humedad relativa entre Rio Claro y Rivadavia.**



**Figura C.35: Correlaciones Humedad relativa entre Rio Toro y Rivadavia.**

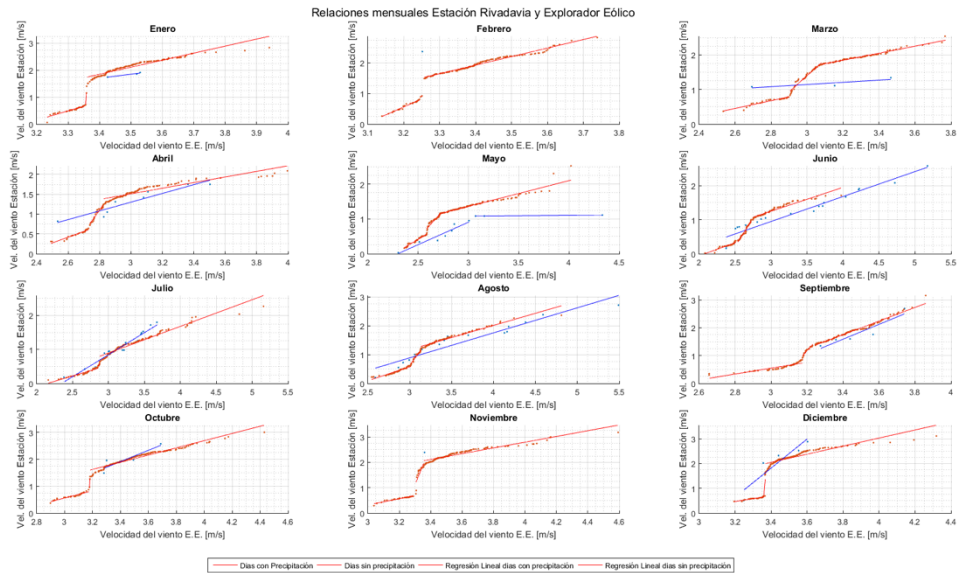


**Figura C.36: Correlaciones Humedad relativa entre Rio Turbio y Rivadavia.**

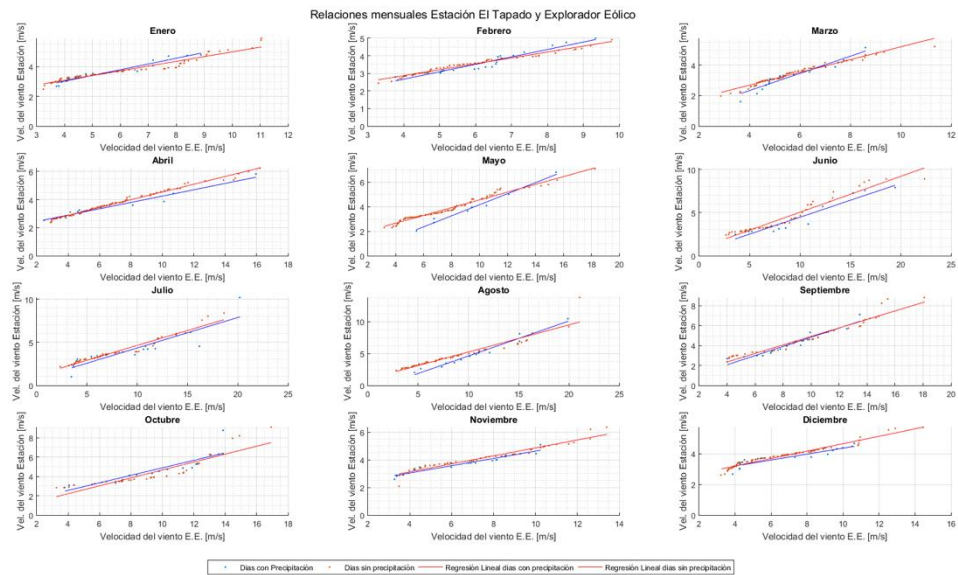


**Figura C.37: Correlaciones Humedad relativa entre Rio Claro y Paso Aguas Negras.**

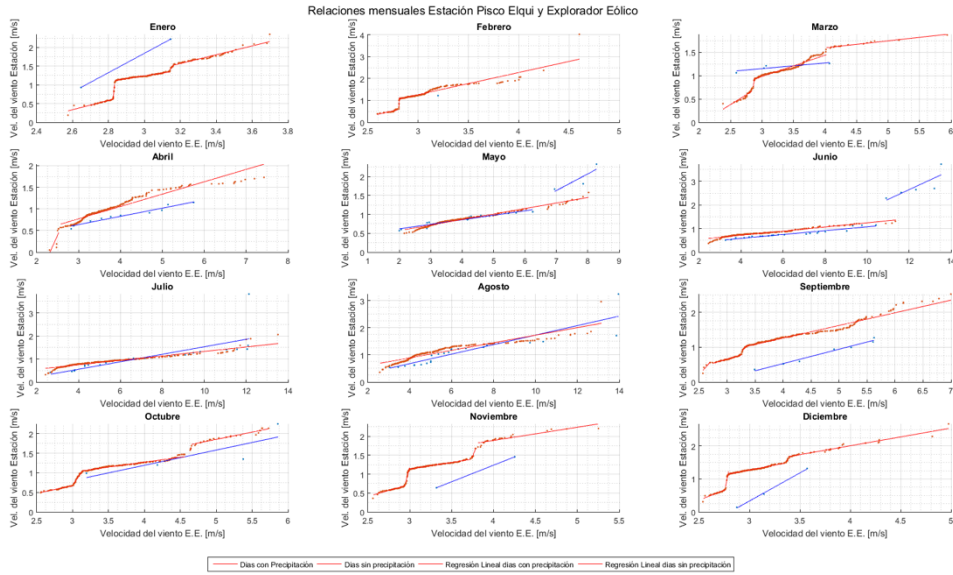
# Anexo D



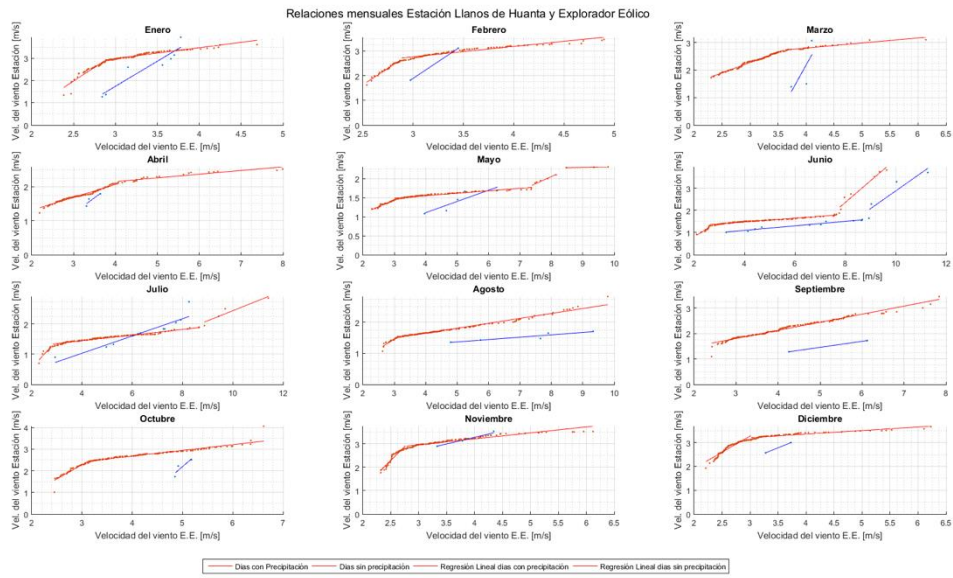
**Figura D.38: Relación estación Rivadavia y Explorador Eólico.**



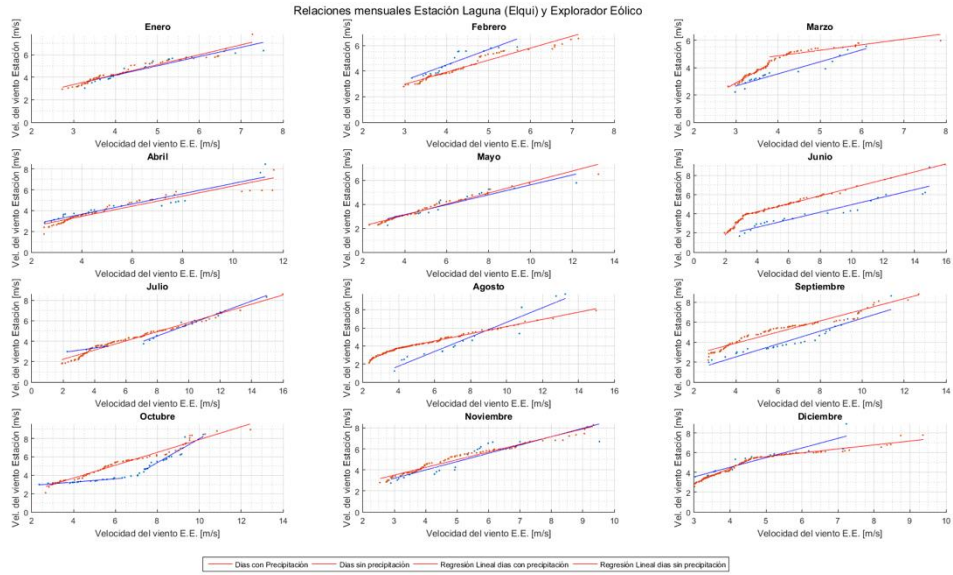
**Figura D.39: Relación estación El Tapado y Explorador Eólico.**



**Figura D.40: Relación estación Pisco Elqui y Explorador Eólico.**



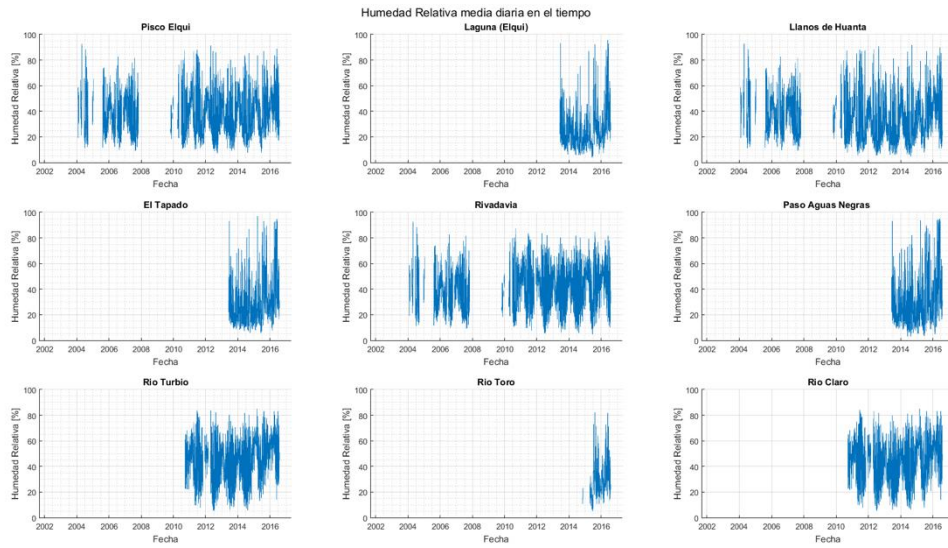
**Figura D.41: Relación estación Llanos de Huanta y Explorador Eólico.**



**Figura D.42: Relación estación Laguna (Elqui) y Explorador Eólico.**

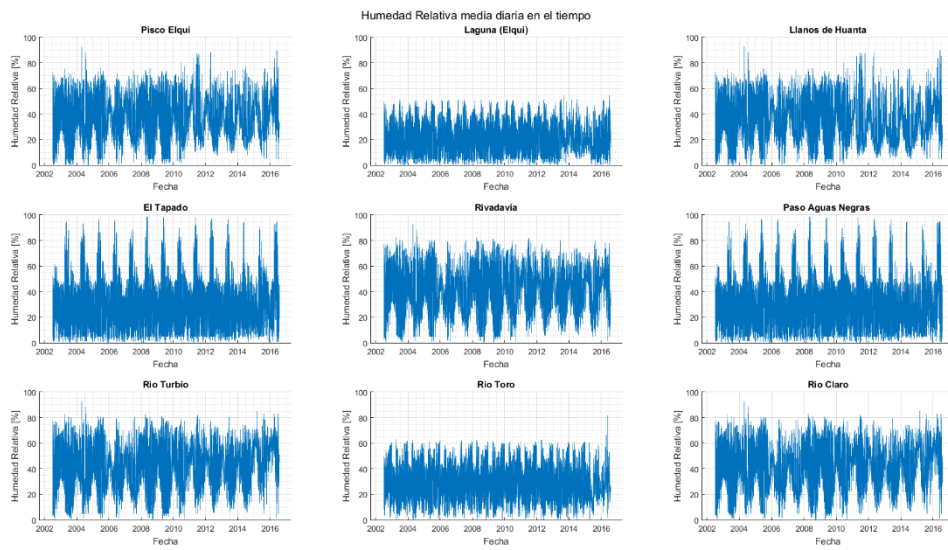
# Anexo E

Relleno con primer criterio:



**Figura E.43: Humedad Relativa media posterior al Relleno 1.**

Relleno con segundo criterio:



**Figura E.44: Humedad relativa media posterior al Relleno 2.**

## Anexo F

La metodología de relleno para las imágenes satelitales MODIS se presenta a continuación.

1. **Utilización de ambos satélites:** Para los valores de temperatura máxima se asigna el valor máximo entre los LST MOD y LST MYD, y en el caso de que solo un satélite tenga medición, se asigna este valor. Se realiza de manera análoga para los valores de temperatura mínima. Este criterio no corresponde a un relleno de por sí, sino que a una combinación de ambos satélites para obtener información en el espacio.
2. **Promedio Espacial:** Se definen los pixeles de primera cercanía a los que se encuentran en contacto directo del pixel faltante, es decir, pixeles B, D, F, H de la Figura F.45 y los que se encuentran en contacto en las esquinas, serán llamados pixeles de segunda cercanía, es decir, pixeles A, C, G, I. Al tratarse de pixeles de 500 mts, desde el centro a centro de un pixel de primera cercanía, estos se encuentran a dicha distancia, de centro a centro, pero los de segunda cercanía se encuentran a 707,1 mts de, por lo que se considera que dichos pixeles deben tener menor influencia en el pixel a rellenar.

A	B	C
D		F
G	H	I

Figura F.45: Representación de imagen MODIS.

Al pixel sin información se le asigna el promedio de los pixeles circundantes distintos de null si, al menos, existen 2 pixeles de primera cercanía válidos. El valor final será calculado mediante el método del inverso de la distancia ponderada, donde los pixeles de segunda cercanía ponderan menos, debido a que están más lejos del pixel a rellenar, según la Ecuación (F.1).

$$P_{i,j} = \frac{\sum_{i=0}^n (H_{i,j,n} \cdot \frac{1}{x_i} + R_{i,j,n} \cdot \frac{1}{y_i})}{\sum_{i=0}^m \frac{1}{x_i} + \frac{1}{y_i}} \quad (F.1)$$

Donde,

$P_{i,j}$ : Temperatura del pixel a calcular [°].

$H_{i,j,n}$ : Temperatura del pixel de primera cercanía (min dos pixeles) [°].

$R_{i,j,t}$ : Temperatura del pixel de segunda cercanía [°].

$x_i$ : Distancia del pixel con información al que se quiere rellenar (1km para primera cercanía) [km].

$y_i$ : Distancia del pixel con información al que se quiere rellenar ( $1/\sqrt{2}$  para los de segunda cercanía) [km].

Es importante notar que se agrega el condicional de que, si algún pixel es null o cero, la distancia de éste no se considera para la sumatoria del denominador. Esto se realiza mediante el condicionamiento de dichas variables en la programación en el software Matlab R2015a.

3. **Promedio Temporal:** Se calcula el promedio del pixel del día anterior y el del día siguiente y se le asigna dicho valor al pixel con el valor null o cero, de solo existir información en un día (anterior o posterior) se considera ese valor como relleno y si, finalmente no existe información en ninguno de los dos días bajo análisis el pixel no se rellena.
4. **Pixeles cercanos:** Con el fin de no rellenar los pixeles vacíos con los rellenos en alguno de los dos criterios anteriores, se rellena el pixel faltante con el promedio de los pixeles cercanos, ponderados por el inverso de la distancia ponderado, de la misma manera que el punto 2, pero sin la restricción de tener mínimo dos valores. Se utiliza la matriz generada después del primer criterio, sin considerar los criterios 2 y 3 (para evitar rellenar con valores ya rellenos). De no existir un pixel con información vecino se rellena con los pixeles con información más cercano de primera cercanía.

A	B	C	D
	1		G
H	2	3	I
	K		

Figura F.46: Matriz a rellenar.

A	B	C	D
E	1	F	G
H	2	3	I
J	K	L	M

Figura F.47: Matriz posterior al relleno.



5. La Figura F.46 corresponde a la matriz a rellenar, posterior al relleno 2 y 3, donde hay que rellenar los puntos del 1 al 3. La Figura F.47 corresponde a la matriz posterior al relleno 1 pero anterior a los rellenos 2 y 3, es decir, la matriz disponible para rellenar. Los pixeles E, F, J, L y M fueron rellenados por los criterios 2 y 3, debido a esto, no están en la matriz de la F.45. La forma de operar según el último criterio será la siguiente:
- **Punto 1:** Se buscan los pixeles de primera cercanía en la matriz de la F:46, los pixeles B, H, I y K son los de primera cercanía sin rellenar y los pixeles A, C y H son los de segunda cercanía contiguos, por lo que rellena con el promedio ponderado por la distancia de estos.
  - **Punto 2:** Se buscan los pixeles de primera cercanía en la matriz de la F.46., los pixeles B, H, I y K son los de primera cercanía sin rellenar más cercanos por lo que rellena con el promedio ponderado por la distancia de estos y como no hay de segunda cercanía contiguos estos no se utilizan.
  - **Punto 3:** Se buscan los pixeles de primera cercanía en la matriz de F.46., los pixeles C, H e I son los de primera cercanía sin rellenar y los pixeles K y G son los de segunda cercanía contiguos, por lo que rellena con el promedio ponderado por la distancia de estos.