

## RESULTADOS OBTENIDOS:

Describe los resultados obtenidos de su investigación haciendo referencia a los objetivos originales y/o previamente modificados de su propuesta.

**La extensión máxima de esta sección es de 5 páginas (letra tamaño 10, Arial o Verdana).**

### **Specific Objective 1: Downscaling of weather variables from Reanalysis data**

Por medio de distintos métodos de estimación como modelos lineales (Mezghani & Hingray, 2009), se creó una amplia base de datos climática de las variables temperatura mínima, máxima y montos precipitación de modo de comprender el comportamiento de la evapotranspiración y entender su comportamiento, por ejemplo, en distintos escenarios de cambio global. No obstante, se ha reportado que el uso de datos reanalizados puede tender a subestimar ciertas variables como temperatura (Wright *et al.*, 2009) en ambientes de clima árido, y que la información que entregan puede tener un alto grado de desviación con datos medidos en terreno en zonas geográficas puntuales (Cavazos & Hewitson, 2005)

De esta forma se consiguieron datos de un total 92 estaciones meteorológicas distribuidas en tres regiones: Metropolitana (75), de Valparaíso (10) y del Libertador Bernardo O'Higgins (7) (Anexos, tabla 1), que abarcan un periodo máximo comprendido entre enero de 1950 y diciembre de 2012 a escala diaria, y que se ubican principalmente en el área central de la cuenca del Maipo (Ubicada entre las latitudes -32°55' y -34°15' Sur en una extensión de 15,157 km<sup>2</sup>) y rodeándola en el caso de las estaciones que no se encuentran en la Cuenca de Maipo

Se utilizaron los datos descargados del proyecto NCEP/NCAR, que abarca desde 1948 hasta hoy en día, y que es administrado por la División de Ciencias Físicas del Laboratorio de Investigación de Sistemas Terrestres (ESRL) que depende de la Administración Nacional Atmosférica y Oceánica (NOAA) del gobierno Estadounidense. Fueron escogidos tres niveles (Superficie, 2-10 metros de altura y 500 milibares de presión en altitud) para descargar 14 variables accesorias provenientes de al menos uno de ellos.

Para el caso de precipitación, se agregaron dos variables de Reanalysis asociadas a precipitación (*Precipitation rate* y *Precipitable water surface*) y se utilizó la estación Quinta Normal como referencia para los días en que precipita. La serie se transformó a valores binarios 0-1 cuando no llovía u ocurría precipitación respectivamente. El mismo stepwise bidireccional se utilizó para estimar los días de lluvia pero ahora en un modelo Generalizado (GLM) con función de enlace Logit. Los montos de precipitación fueron estimados a partir de la estación de referencia mediante una regresión simple considerando los datos de Reanalysis asociados a precipitación. El modelo puede resumirse de la siguiente forma:

$$\hat{\mu}_{i,j}^* = \text{stepwise} \left( \beta_0 + \beta_j + \sum_{h=1}^{14} \beta_h X_{hij} + \beta_{hj} X_{hij} + e_{i,j} \right)$$
$$\text{logit}(\hat{\mu}_{i,j}) = \log_e \left( \frac{\hat{\mu}_{i,j}}{1 - \hat{\mu}_{i,j}} \right) = \text{stepwise}$$

Para cada día  $i$  en el mes  $j$ . Para el caso de precipitación:

Con las series de temperatura y precipitación reconstruidas se estimó la evapotranspiración potencial a nivel de estación mediante el método de Hargreaves modificado (Droogers & Allen, 2001), el cual incluye valores de Radiación extraterrestre promedio diaria (RA), los que fueron estimados a partir de la Latitud.

$$ET_0 = 0.0013 * (0.408 * RA) * (T_{avg} + 17) * (TD - 0.0123 * P)^{0.76}$$

Donde  $T_{avg}$  es la temperatura media en  $^{\circ}C$ ,  $TD$  la oscilación térmica en  $^{\circ}C$  y  $P$  el monto de precipitación en mm.

Relacionado con el relleno de series de temperatura y precipitación y análisis de tendencia a partir de índices de sequía, se presentó mediante modalidad de poster, el siguiente trabajo:

Meza, F. & Morales-Moraga, D. Detecting droughts trends with expanded meteorological records based on Reanalysis data. (Poster). AGU Fall Meeting, San Francisco, CA. USA.9 - 13 December. 2012.

Además, asociado a la obtención de índices de sequía y Aridez mediante la metodología de relleno y expansión de series meteorológicas se presentaron en formato oral los siguientes trabajos:

Morales-Moraga, D. & Meza, F. Presenting a novel methodology for estimating climatic indicators using Reanalysis data at the Maipo basin, Central Chile. (Oral presentation). 65<sup>o</sup> Congreso de la Sociedad Agronómica de Chile, Santiago, Chile. 27 – 29 Octubre. 2014.

Morales-Moraga, D. & Meza, F. Analyzing drought periods with expanded meteorological data based on NCEP/NCAR Reanalysis products in the Maipo Basin, Central Chile. (Oral presentation). International Drought Expert Symposium “Coping with Droughts”, Santiago, Chile. 19-21 November. 2014.

Finalmente se envió el manuscrito “Spatio-temporal estimation of climatic variables using Reanalysis data. Case study from the Maipo basin” de los autores Morales, Meza, Miranda y Gironás al Journal of Hydrology.

## **Specific Objective 2: Spatial Interpolation**

El modelo propuesto es una aproximación estadística que busca representar valores de un atributo puntual (temperatura, precipitación) en lugares en donde no existen mediciones. Para esto, se calibra un modelo que considera una distribución espacial suficiente de puntos que representan a las estaciones meteorológicas en el espacio de estudio, de modo de cuantificar y caracterizar todas las magnitudes topográficas presentes en aquel espacio (elevación sobre el nivel del mar, orientación, pendientes, etc.).

Dentro de los modelos de interpolación existen aproximaciones denominadas geoestadísticas, las cuales buscan una correlación espacial del atributo a modelar en un punto con el mismo atributo en un vecindario de puntos predefinido. Las técnicas de interpolación más conocidas dentro de este tipo son dos: Inverso de la Distancia (IDW) el cual utiliza la distancia euclídea como medida de ponderación para dar un mayor peso a aquellos puntos que se encuentran más cercanos, disminuyendo este peso a medida que se incrementa la distancia. El segundo método corresponde a Kriging, el cual utiliza como peso la variabilidad que existe entre los puntos cercanos asumiendo que mientras más cerca estén los puntos esta variabilidad será mínima, y viceversa.

Pese a que estos métodos generan resultados aceptables, no consideran el efecto de la geografía, topología y accidentes geográficos, de modo que los resultados que entregan sólo son una abstracción de lo que ocurriría si sólo la distancia que separa los puntos tuviese una influencia completa en las zonas en donde no existe información.

Por otra parte, los modelos topoclimáticos, como método utilizado en este estudio, intentan representar aquellas variables que los modelos anteriormente descritos no consideran. Para esto, se busca la relación lineal entre los puntos que contienen el atributo a modelar y ciertas covariables que actúan como predictores. No obstante, se necesita una gran cantidad de puntos dependiendo de las dimensiones del área de estudio.

Se utilizaron 14 covariables espaciales como predictores que ingresan como puntajes de componentes principales en modelos lineales mixtos optimizados a partir de regresiones por pasos

(*stepwise*) mediante el método *backward*.

Evaluado el modelo de prueba se procedió agrupar el set de imágenes que poseen variables que oscilan en el tiempo (NDVI, EVI, Radiación, Viento y Temperatura superficial) para el periodo 2001-2012, de modo de generar un mapa representativo de la zona de estudio en las variables estudiadas (Anexos 1; Figuras 1 y 2). Esta espacialización a su vez permite reconocer patrones geográficos que se implican en las variables estimadas, como el efecto de la cordillera de la costa y el gradiente latitudinal.

### **Specific Objective 3: Effective Precipitation**

Con los datos de precipitación ya obtenidos. Fue posible comenzar con el desarrollo de la metodología para estimar precipitación efectiva. Este valor es un balance hídrico entre las entradas por precipitación menos las salidas debidas a escorrentía y drenaje (son considerar evapotranspiración). Dado esto, el objetivo se divido en calcular escorrentía y drenaje por separado.

El valor de escorrentía fue obtenido por curva número (USDA, 1986) dada la clase de uso de suelo en donde cada estación se encuentra. El valor de la curva número permite estimar el potencial de máxima retención del suelo antes de que la escorrentía comience a ocurrir. Los usos de suelo en donde cada estación se encuentra fueron obtenidos desde el algoritmo MODIS LCT3, asignándosele a cada una de las 10 estaciones los siguientes valores de curva número:

Se generaron vectores para el periodo 1950-2012 a nivel diario con los valores de precipitación efectiva, los cuales fueron agregados a nivel mensual para correlacionarlos con el valor agregado de tres meses de las anomalías SST en la zona 3,4. Estas correlaciones mostraron que los mayores valores de correlación significativos ocurrieron durante el mes de Agosto para todas las estaciones. En el mes de marzo hubo la mayor frecuencia de estaciones con valores de correlación negativa. Esto indica que los patrones de oscilación de las precipitaciones efectivamente poseen un comportamiento estacional el cual presenta mayor asociación en los meses de invierno (Anexo 1 Tabla 1).

Los datos de precipitación efectiva calculados se utilizaron posteriormente en la obtención de la huella verde.

### **Specific Objective 4: Models for crop water stress index and real evapotranspiration**

Para lograr el objetivo 4, se desarrollaron las siguientes etapas de trabajo: a) generación de una serie de datos espectrales de alta resolución espacial y temporal por medio de fusión de imágenes, b) cálculo de índice de vegetación de diferencias normalizada (NDVI) para la serie de datos obtenidas y c) validación de los datos obtenidos por medio de análisis espacial. A continuación se detalla cada uno de ellos

*Generación de serie de datos espectrales.* Primero se llevó a cabo un procedimiento de fusión de imágenes que permitió aumentar la resolución temporal de series de datos provenientes de sensores de resolución espacial media (Landsat) por medio de la combinación espectral con imágenes provenientes de sensores de alta resolución temporal y baja espacial (MODIS).

Para lograr esto, se implementó el algoritmo de fusión de imágenes STARFM (Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model), el cual predice la reflectancia diaria de una superficie a partir de la combinación de uno o varios pares de imágenes Landsat y MODIS adquiridas en la misma fecha y una o más escenas del sensor MODIS de la fecha de predicción (Gao *et al.*, 2006) (Anexo 1 Figura 3). Este algoritmo fue desarrollado y liberado por la administración aeronáutica y espacial de los Estados Unidos (NASA) dentro del proyecto LEDAPS (Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive Processing System).

Para llevar a cabo el proceso de predicción se necesitaron pasos previos de calibración espectral, corrección geométrica, ortorectificación y generación de mosaicos, con el objeto de conseguir un producto de similares características que permitiera el cálculo de índices de vegetación. Para esto se utilizó el algoritmo AROP (Automated Registration and Orthorectification Package) (Gao *et al.*, 2009).

De este proceso se obtuvo una serie de imágenes de resolución espacial media (30x30 m) y temporal alta (diaria) que cubre el período 22 de Septiembre 2013 – 29 de Abril 2014, lo que corresponde a 220 días.

*Cálculo de Índice de Vegetación (NDVI).* El índice de vegetación de diferencias normalizada corresponde a una combinación espectral de las bandas rojo (0,6 – 0,7  $\mu$ ) e infra-rojo (0,7-1  $\mu$ ) del espectro electro magnético (ecuación 1).

$$NDVI_{i,j} = \frac{\rho_{IR_{i,j}} - \rho_{R_{i,j}}}{\rho_{IR_{i,j}} + \rho_{R_{i,j}}}$$

Donde  $NDVI_{i,j}$  corresponde al índice de vegetación para el pixel  $i,j$ ;  $\rho_{IR_{i,j}}$  es la reflectividad en la longitud de ondas infraroja en la ubicación  $i,j$  y  $\rho_{R_{i,j}}$  corresponde a la reflectividad en la longitud de onda del rojo en la misma ubicación. Este índice al ser normalizado toma valores entre -1 y 1.

Para calcular el NDVI sobre la serie de 2020 imágenes se desarrolló un programa en lenguaje Python que permitió hacer este proceso de forma automática (Anexo 2).

*Validación de datos.* De manera de evaluar la eficiencia de las proyecciones de datos satelitales realizadas por medio de la fusión de imágenes vía el programa STARTFM se llevó a cabo una validación de datos usando un enfoque basado en la heterogeneidad espacial (Anexo 3)

Para esto, primero se realizó un análisis estadístico exploratorio sobre el NDVI donde se compararon las métricas (mínimo y máximo, mediana, media, primer y tercer cuantil y la desviación estándar), tanto de las imágenes originales y aquellas proyectadas (Goovaerts 1997). Segundo, se realizó un análisis de la estructura espacial para las mismas imágenes de manera de comparar la heterogeneidad de la serie de datos a diferentes escalas espaciales, utilizando distancias de 90, 180 y 270 m (Miranda y Condal 2003).

Para el análisis espacial se utilizó un modelo de semivarianza el cual se obtuvo por medio de la construcción de variogramas de acuerdo a la ecuación siguiente (ecuación 2)

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N [z(x_i) - z(x_i + h)]^2$$

Donde,  $z(x_i)$  y  $z(x_i+h)$  son los valores del NDVI en las localidades  $x_i$  e  $x_i+h$  y  $N$  el número de pares.

Estos tres valores fueron modelados matemáticamente por medio del ajuste de modelos que relacionan la distancia  $h$  con la semivarianza, siendo el más común el esférico (Anexo 1 Figura 4).

Los resultados muestran que al observar la escala (distancia) a la cual la variabilidad edl NDVI es máxima (rango  $A_0$ ), es posible indicar que las proyecciones de las imágenes realizadas por STARTFM en época de verano presenta igual escala de variación, en contraste a lo que ocurre en los periodos de primavera y otoño. Por otra parte, para la variabilidad espacial (sill  $C_0 + C$ ), se observa que la semivarianza es siempre mayor en las imágenes proyectadas respecto a las originales, diferencia que disminuye al pasar de una escala de mayor detalle (90 m) a una general (270 m). A la escala de más detalle, este efecto es más notorio en la época de primavera.

Se destacan estos resultados dado que al no ser la diferencia en heterogeneidad espacial sistemática en el tiempo no es posible aplicar un factor de corrección espacial único para el NDVI basado en la semivarianza. Gavaert *et al.* (2015) encontraron que las proyecciones realizadas por STARTFM presentaban menor certeza para la banda infra roja en relación a la banda roja, lo cual puede afectar las estimaciones obtenidas a partir de ellas. Finalmente, este resultado se debe tener en consideración al momento de desarrollar un modelo de estimación de la evapotranspiración basado en valores de NDVI diarios obtenidos de imágenes proyectadas.

Fruto de este trabajo se logró la publicación:

Bustos, E., Meza, F.J. 2014. A method to estimate maximum and minimum air temperature using MODIS surface temperature and vegetation data: Application to the Maipo basin, Chile. *Theoretical and Applied Climatology*.

Para la parte de terreno, durante Agosto de 2013, fueron instalados dos equipos completos de *Eddy covariance* para la estimación de flujos energéticos, vapor de agua y CO<sub>2</sub>, sobre una viña con producción comercial de 60 Hectáreas, ubicada en Pirque en la Cuenca del Rio Maipo. Los datos están siendo colectados sobre dos variedades de uvas distintas, Cabernet Sauvignon y Chardonnay.

Con ello se pretende estimar los flujos energéticos, CO<sub>2</sub> y agua, de un ecosistema agrícola, bajo riego.

Gracias a las estaciones de medición instaladas en Pirque se han logrado describir el balance energético del lugar, lo que permite caracterizar los flujos energéticos de ese ecosistema

En este proyecto, junto con las mediciones hechas por la estación *eddy covariance*, se han hecho mediciones continuas del contenido de agua en el suelo a dos profundidades distintas, la conductancia estomática y potencial hídrico de las plantas y se ha calculado en, base a datos medidos en el lugar, el déficit de presión de vapor. Además se han hecho mediciones del Índice de área foliar, en base al coeficiente de extinción de la luz ( $k$ ), dentro de la canopia (Lopez-Lozano, 2009). Para las mediciones del potencial hídrico de la planta, se ha ocupado la metodología propuesta por Scholander (1962) para la medición de potencial de hoja con una bomba de presión, la cual fue adquirida a principios de temporada (Agosto, 2013).

Gracias a las mediciones hechas la temporada anterior (2013-2014), de forma continua, con las estaciones de *Eddy covariance* y mediciones de contenido de agua en el suelo, se ha propuesto una nueva metodología para la estimación de evapotranspiración real

$$ET = ET_0 \times \left(1 - e^{-B \theta / \theta_{fc}}\right)$$

En base a estas investigaciones se presentó el poster: "Recent micrometeorological studies of sensible heat flux in vineyards using Surface Renewal Analysis in Pirque, Santiago de Chile" en

el Seminario "Towards Sustainable Agriculture: Advances and Challenges in key areas for Chile and California" realizada en la Pontificia Universidad Católica de Chile durante Junio del 2014.

Tosoni, D. & Meza, F. Recent micrometeorological studies of sensible heat flux in vineyards using Surface Renewal Analysis in Pirque, Santiago de Chile". (Poster). Towards Sustainable Agriculture: Advances and Challenges in key areas for Chile and California, Santiago, Chile. 24 - 25 Junio. 2014.

#### **Specific Objective 5: Calculation of Water footprints**

Con las series meteorológicas rellenas, Se calculó la Huella hídrica de las estaciones meteorológicas aplicando el modelo simple de conductancia y asumiendo un sistema de riego tradicional.

Para estos efectos se construyó un modelo de balance hídrico simple que permitiera estimar la frecuencia y lámina de riego a aplicar.

#### **Specific Objective 6: Influence of Climate Variability and Climate Change**

Se realizó un análisis preliminar de la influencia de la variabilidad climática sobre las huellas azul y verde, asimismo se analizó la tendencia de la serie reconstruida.

Se observa una pendiente pequeña e inconsistente de modo que no es concluyente el efecto de de mayores temperatura o menores precipitaciones en la huella hídrica en las últimas 5 décadas. (Anexo 1 Tabla 2)\_