



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**VALIDACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL EN LA CUENCA ÑIREHUAO
MANIHUALES, PATAGONIA CHILENA USANDO PRODUCTOS SATELITALES
MODIS Y MEDIDAS IN SITU.**

SEBASTIÁN IGNACIO AHUMADA EGAÑA

**Santiago, Chile
2022**



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**VALIDACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL EN LA CUENCA ÑIREHUAO
MANIHUALES, PATAGONIA CHILENA USANDO PRODUCTOS SATELITALES
MODIS Y MEDIDAS IN SITU.**

**VALIDATION OF ACTUAL EVAPOTRANSPIRATION IN ÑIREHUAO
MAÑIHUALES BASIN, CHILEAN PATAGONIA USING MODIS SATELLITE
PRODUCTS AND IN SITU DATA**

SEBASTIÁN IGNACIO AHUMADA EGAÑA

**Santiago, Chile
2022**



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

**VALIDACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL EN LA CUENCA ÑIREHUAO
MANIHUALES, PATAGONIA CHILENA USANDO PRODUCTOS SATELITALES
MODIS Y MEDIDAS IN SITU.**

Memoria para optar al título
Profesional de Ingeniero en Recursos Naturales Renovables

SEBASTIÁN IGNACIO AHUMADA EGAÑA

PROFESOR GUÍA

Sr. Cristian Mattar B.
Ingeniero en Recursos Naturales Renovables, M.Sc. Dr.

Calificaciones

7,0

PROFESOR EVALUADOR

Sr. Rodrigo Fuster G.
Ingeniero Agrónomo, M.Sc. Dr.

6,8

Sr. Gerardo Soto M.
Ingeniero Forestal, M.Sc. Dr.

6,3

Santiago, Chile
2022

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	6
RESUMEN	7
ABSTRACT	8
INTRODUCCIÓN	9
Objetivo general	11
Objetivos específicos.....	11
MATERIALES Y MÉTODO	12
Área de estudio.....	12
MATERIALES	13
Información meteorológica	13
Información satelital.....	14
METODOLOGÍA	15
Preprocesamiento inputs meteorológicos para SSEBop	15
Enfoque metodológico del modelamiento SSEBop	16
Validación con estación Eddy Covariance	20
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	23
Estimación de la ETr a través del modelo SSEBop.....	23
Validación con estación Eddy Covariance.....	26
CONCLUSIONES	29
APÉNDICES Y ANEXO	30
BIBLIOGRAFÍA	32

Esta memoria se la dedicó a mi familia, amigos y al arte. Sin ellos me hubieran faltado fuerzas...

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer profundamente estos meses de aprendizajes y desafíos. Realmente me llevaron a un punto donde tuve que luchar con todas mis inseguridades. Y por lo mismo, no puedo estar más agradecido de todas las conversaciones que compartí con mis amigos y familia. De todo el amor que recibí y pude dar. De todo esos desamores y amores que no fueron impedimento para seguir.

Como no, voy a mencionar honrosamente a todas esas personas que son parte de mi camino. Primero empezaré con mi familia, mi madre Ana, mi tía Lucy, mi abueli Luisa, mi padre Rubén, mis hermanes Katy, Aldo, David y Mateo. Les agradezco su amor y energías positivas, soy muy afortunado de tenerlos.

Como no agradecer, a mi gran amigo Lucas que fue parte indispensable de este proceso, para mí, él es un maestro y un muy buen amigo, tuvo una paciencia de oro para todas mis dudas (y para eso sí que hay que tener paciencia, cuando se es muy existencialista). Por lo demás, no faltaron las risas, ni sus juntas para compartir y olvidarse de vez en cuando de la vida universitaria. Como no mencionar a Timi con sus locuras, que con cada llamada telefónica lograba distraerme de todo ese estrés acumulado, nada mejor que filosofar de la vida. O todos esos momentos compartidos con Dido; ese reencuentro con Bars; las salidas de avistamiento de aves con Pendra, uno de los mejores terrenos que he tenido. Cada uno de esos momentos me llenaron de energía y cariño para seguir y contagiar de alegría al resto.

Por supuesto, agradecer infinitamente a Cristian que ha sido un excelente profesor guía, con una paciencia indiscutible y una disposición admirable, sabiendo que tiene como mil tesisas a la vez (bueno, 5 aprox.). Muchas gracias por acogerme y recordarme constantemente que soy capaz y que la vida profesional es lo más parecido a bailar, a sacar los mejores pasos para lucir ese conocimiento y hacerlo un espectáculo para el disfrute del que aprende y del que enseña.

Por lo mismo ¿Qué sería de mí si no tuviera al baile de mi lado? Qué sería si no existiera toda esta bella comunidad de los bailes Swing (no swinger), rebosante de arte y alegría. Qué sería de mí sin todos esos bailes compartidos con mi gran amiga Vane, con mis buenos amigos Sofi y Rami. También está María y Dani que los extraño tanto como lo lejos que se fueron, ya nos bailaremos.

Realmente no me imagino terminando mi carrera para convertirme en un aburrido ingeniero que abandona las cosas que ama por el trabajo, sino, justamente lo contrario, convertirme en alguien que pueda aferrarse a esas cosas para seguir creciendo como profesional, artista y persona.

Gracias de corazón familia y amigos, les amo y ya quiero celebrar con ustedes.

RESUMEN

Las proyecciones de cambio climático muestran como en zonas que se creen de alta disponibilidad hídrica, como la Patagonia en el sur de Chile, también se ven afectadas por el aumento de las temperaturas y la disminución de las precipitaciones, lo que también se puede ver reflejado en el aumento de la evapotranspiración real (ETr). Es por ello, que el presente trabajo busca validar un modelo de estimación de ETr “Operational Simplified Surface Energy Balance” (SSEBop), el cual nunca ha sido estudiado en la zona patagónica. Para ello, se utilizó información satelital del sensor MODIS junto con información meteorológica del reanálisis de ERA5, para luego validar las estimaciones con mediciones in situ obtenidas de la estación Ñirehuao ubicada en la cuenca Ñirehuao Mañihuales. Los resultados vislumbran que SSEBop logra captar la estacionalidad de la ETr y también su sensibilidad a los cambios de temperatura de la superficie (LST). Sin embargo, la validación con la estación resultó con una baja correspondencia lineal del 8% (R²) y un error de 1.67 mm/día (RMSE). De este modo, el producto no logra ser un modelo efectivo de ETr, al menos, para el periodo de verano. De todas formas, este resultado es importante para enseñar las características y falencias del modelo SSEBop. Además, se vuelve indispensable invertir en el monitoreo de ETr para mejorar la disponibilidad de datos que permitan validar productos satelitales como SSEBop para periodos de tiempo más largos, de modo que quede en evidencia sus limitaciones y precisión al estimar ETr. Finalmente, este trabajo revela que el modelo SSEBop no posee buen desempeño en estimar ETr para el periodo de verano en la cuenca, no obstante, es una herramienta que requiere ser validada en otras épocas de año, para así tener en cuenta su pertinencia al momento de ser utilizada para el manejo y gestión del recurso hídrico, que se encuentra en un inminente agotamiento en la Patagonia.

Palabras clave: Evapotranspiración real; Patagonia; Validación; MODIS; SSEBop.

ABSTRACT

Climate change projections have shown how areas that are believed to have high water resources availability, such as Patagonia in southern Chile, are also affected by increased temperatures and decreased rainfall, which can also be reflected in the increase of actual evapotranspiration (AET). For this reason, this work attempts to validate the estimation of AET using the model Operational Simplified Surface Energy Balance (SSEBop), which has never been studied in the Patagonian zone before. This is achieved using satellite data from MODIS sensor, meteorological information from ERA5 reanalysis and in situ measurements obtained from Ñirehuao station located in the Ñirehuao Mañihuales basin, which are used to validate the model. The results suggest that SSEBop manages to capture the seasonality of AET and also its sensitivity to changes of land surface temperature (LST). However, the validation with the station resulted in a low linear correspondence of 8% (R^2) and an error about 1.67 mm/día (RMSE). Thus, the product turns out to be a non-effective model, at least, for the summer period. However, this result is important to indicate the characteristics and limitations of SSEBop model. In addition, it is essential to invest in ETr monitoring in order to improve the availability of data that allows validating satellite products, such as SSEBop, for longer periods of time that allow to know its limitations and accuracy when estimating ETr. Finally, this research reveals that SSEBop model does not have a good performance in estimating ETr for the summer period in the basin, however, it is a tool that needs to be validated at other times of the year, in order to have clear knowledge of its applicability when be used for the management of water resources, which is in imminent depletion in Patagonia.

Key words: Actual Evapotranspiration; Patagonia; Validation; MODIS; SSEBop.

INTRODUCCIÓN

Las proyecciones de cambio climático, muestran que la disminución de las precipitaciones y el aumento de la temperatura en la Tierra tendrán consecuencias irreversibles a mediados de este siglo. Así, un aumento promedio de más de 1,5°C en la temperatura media global agravará los eventos climáticos extremos (como inundaciones y sequías), afectando directamente la calidad de vida de la población humana y a los ecosistemas (Malhi et al., 2020).

En Chile, ya es posible evidenciar el efecto que ha tenido, pues, desde 2010 el país ha vivido la sequía más prolongada de su historia, llamada por su magnitud “mega sequía”, en donde la zona central ha sido la más afectada (Santibañez, 2016). Sin embargo, en zonas subantárticas como la zona sur de Chile, la sequía también ha afectado los regímenes climáticos, a pesar de ser considerada una zona hiper húmeda con alta disponibilidad hídrica (Olivera- Guerra et al., 2022). En cuanto a lo anteriormente mencionado, la patagonia chilena presenta registros que han mostrado cómo las precipitaciones y caudales han disminuido a lo largo de las últimas décadas, siendo el verano del año 2016 uno de los más afectados (Aguayo et al., 2019; Garreaud, 2018). Incluso, estudios demuestran como en la cuenca del río Aysén el aumento de la temperatura del aire y la temperatura de la superficie han afectado las tasas evaporativas de la cuenca principalmente durante otoño-invierno, de forma paralela, año tras año (Olivera- Guerra et al., 2022). Este fenómeno también ha producido una disminución significativa en la cantidad de cobertura de nieve observada en la zona, específicamente entre el año 2010 y 2016, afectando directamente la disponibilidad hídrica en uno de los mayores reservorios de agua en Chile (Jacques-Coper et al., 2015; Pérez, Mattar y Fuster, 2018). Asimismo, ante estas variaciones climáticas, los bosques templados de la Patagonia, han disminuido la tasa de crecimiento radial y altura de los fustes, ha aumentado la mortalidad y disminuido la reproducción de plántulas, además de aumentar potencialidad de ocurrencia de incendios forestales (Álvarez, Veblen, Christie, González-Reyes, 2015; Daniels and Veblen, 2004; Suárez et al, 2004; Rodríguez-Catón, Villalba, Srur y Luckman, 2015). De acuerdo con Esquivel et al. (2019), el tipo, estado de sucesión y composición de los bosques se condice con la magnitud y variación estacional de la demanda hídrica y productividad primaria de las coberturas vegetacionales, lo que puede ser estudiado a través de la evapotranspiración real.

La evapotranspiración real (ET_r) equivale al vapor de agua efectivo liberado desde las superficies terrestres, lo que combina la evaporación directa de agua en los poros del suelo junto con la evaporación del agua interceptada por la vegetación y la transpiración de las plantas (Hoekstra et al., 2021). Este último proceso es un proceso fundamental para las plantas, ya que, para llevar a cabo los procesos fisiológicos de regulación de temperatura, transporte de nutrientes y fotosíntesis, estas deben liberar agua a través de sus estomas para luego recuperar lo utilizado absorbiendo agua con sus raíces desde el suelo (Katul et al., 2012). Es por ello, que las tasas evapotranspirativas representan las necesidades hídricas de las superficies terrestres y varían según el tipo de cobertura vegetal (Ruiz y Uribe, 2019). Asimismo, variables meteorológicas como la humedad relativa, la humedad del suelo,

velocidad y dirección del viento, la radiación y la temperatura afectan directamente el comportamiento de la ETr (Katul et al, 2012; Yiang et al., 2009). Es por todo esto que la magnitud de esta variable es una importante salida en el balance hídrico de una cuenca y, por tanto, es necesaria para la planificación eficiente del recurso agua en el manejo de bosques, plantaciones forestales y cultivos (Li et al., 2009; Senay et al., 2013).

Esta variable puede ser medida directamente a través de lisímetros, estaciones Eddy Covariance, Bowen ratio del flujo de calor latente, entre otros (Palutikof, Goodess y Guo, 1994; Bayona y Romero, 2016; Yuan et al., 2010). Sin embargo, y a pesar de su precisión, estas mediciones son escasas, de alto costo y con una baja representación espacial, no obstante, son útiles para tomar registros in situ y validar información modelada (McCaul et al., 2016; Wang et al., 2015). Por otro lado, las metodologías basadas en el balance energético (SEB) permiten estimar ETr a través de la relación de radiación neta, calor sensible y calor latente en la superficie de la Tierra, esta última variable está directamente relacionada a la ETr (Liou y Kart, 2014). Estos modelos han demostrado tener un buen desempeño en la estimación de ETr en cultivos y ecosistemas terrestres, y pueden ser de una, dos y de múltiples capas. Las de una capa son ampliamente utilizadas, como por ejemplo el “Simplified Surface Energy Balance” (SSEB) y su versión más reciente, el “Operational Simplified Surface Energy Balance” (SSEBop) que, de acuerdo, a un estudio realizado por Moletto-Lobos et al. (2020), es el modelo de estimación que mejor se ajusta a las características climatológicas de la zona centro sur de Chile.

Para resolver el problema de la representación espacial de ETr, la información satelital resulta esencial como insumo para estos modelos, ya que facilita data de la superficie de la Tierra y de la atmósfera, lo que al ser procesada facilita parámetros climáticos a diferentes escalas espaciales y temporales (Yang et al., 2013). De igual manera, es utilizada para mejorar significativamente los reanálisis meteorológicos ampliamente usados en estudios de cambio climático (Hersbach, Bell, Berrisford y Hirahara, 2020). Esta información se puede obtener de diferentes satélites/sensores como las misiones de Sentinel, Landsat y MODIS (Justice et al. 1998; Pahlevan et al., 2019). Este último, el “Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer” (MODIS), es un sensor lanzado en la misión de los satélites TERRA Y AQUA en 1999 y tiene disponible múltiples productos a diferentes escalas espaciales y temporales. Por lo mismo, los productos satelitales de MODIS permiten realizar investigaciones en zonas donde existen pocos registros históricos, o bien escasa información meteorológica (Jiménez-Muñoz et al., 2013; Olivera- Guerra et al., 2022). Además, tiene una alta correlación con mediciones de flujos de agua, lo que favorece las estimaciones de ETr (Cristiano et al., 2016). No obstante, a pesar de haber demostrado tener buen desempeño en su uso y aplicación, esta información no está libre de sesgos (Justice et al. 1998; Yang et al, 2013). Por consiguiente, los métodos de estimación que utilizan datos satelitales requieren de un proceso de validación con mediciones reales in situ, para que, al momento de ser utilizado en la toma de decisión, esté considerada su consistencia y limitaciones (Jovanovic e Israel, 2012; Moletto-Lobos et al.,2020, Yang et al., 2013; Flores et al., 2021).

Es por ello, que este trabajo busca simular y validar estimaciones de ETr realizadas por el modelo SSEBop, utilizando reanálisis meteorológicos y productos MODIS. Este modelo aún

no ha sido validado para zonas hiper húmedas como la Patagonia chilena, sin embargo, se presume que pueda tener buen desempeño. Para corroborar esto, a través de una estación Eddy covariance ubicada en la cuenca de los ríos Ñirehuao Mañihuales se busca validar la representatividad de la información modelada para así generar data concisa, de calidad y confiable para promover la gestión eficiente de los recursos hídricos en la Patagonia chilena.

Objetivo general

Validar la ETr en la cuenca de los ríos Ñirehuao Mañihuales mediante teledetección utilizando productos MODIS e información meteorológica.

Objetivos específicos

- 1) Estimar la evapotranspiración real (ETr) en el área de estudio utilizando el modelo SSEBop.
- 2) Evaluar los resultados con una estación Eddy Covariance localizada en el área de estudio.

MATERIALES Y MÉTODO

Área de estudio

El área de estudio corresponde a la subcuenca río Ñirehuao Mañihuales, ubicada en la parte alta de la cuenca río Aysén, región de Aysén. Se localiza en dentro de la porción patagónica occidental del continente, limitando con Argentina al este y extendiéndose hasta la confluencia con río Aysén hacia el oeste, con una superficie aproximada de 4231,57 km².

Específicamente se encuentra entre 44°89' - 45°46' latitud sur y 71°32' - 72°70' longitud oeste (Figura 1). En general se caracteriza por tener un clima frío oceánico de bajas temperaturas, con abundantes precipitaciones, fuertes vientos y mucha humedad. Aunque, debido al efecto de los Andes patagónicos, se produce un clima de estepa fría, donde las precipitaciones tienden a disminuir respecto de la porción oceánica. El régimen de la cuenca es de tipo pluvio- nival, lo que genera crecidas los meses de agosto y octubre debido a las precipitaciones y deshielos primaverales respectivamente. Las precipitaciones alcanzan aproximadamente los 621 mm anuales y la temperatura media anual es de 9,38°C. En cuanto a la escorrentía superficial, se registra en promedio 1383 mm/año en río Mañihuales antes de la junta con río Simpson. El suelo es de origen sedimentario, de textura arenosa franca a muy arenosa, con bajos niveles de fertilidad y baja retención de humedad. (Dirección General de Aguas, 2004; González, González y Saavedra, 2009; Vargas, De la Fuente y Arumí, 2012).

En cuanto a sus coberturas vegetacionales, según la clasificación de Gajardo la zona se inserta en la región del bosque andino patagónico, bosque siempre verde teniendo como principales representante especies del género *Nothofagus*, además de turberas y zonas más áridas de estepa patagónica (DGA, 2004). En cuanto a la las formaciones vegetacionales de Luebert y Pliscoff (2017) en relación con el área total de la cuenca, la zona presenta bosque templado caducifolio de *Nothofagus pumilio* (32,29 %), bosque templado siempreverde de *Nothofagus betuloides* (13,93%), estepas y pastizales (14%), herbazal de altitud (20,5%), matorral caducifolio de *Nothofagus antarctica* (18%), con una reducida cantidad de suelo desnudo (0,1%) y asentamientos humanos (<0,1%). Dentro de las áreas protegidas por la SNASPE la cuenca tiene la reserva natural Mañihuales con un área aproximada de 3586 ha (Cruz et al., 2001). Dentro de las principales actividades económicas que se desarrollan en la región destacan la actividad agrícola, turística, extracción de leña de especies nativas y forestales de pino. Asimismo, los principales riesgos ecológicos sobre la región son la erosión hídrica ante crecidas por eventos extremos y también incendios forestales (DGA, 2004).

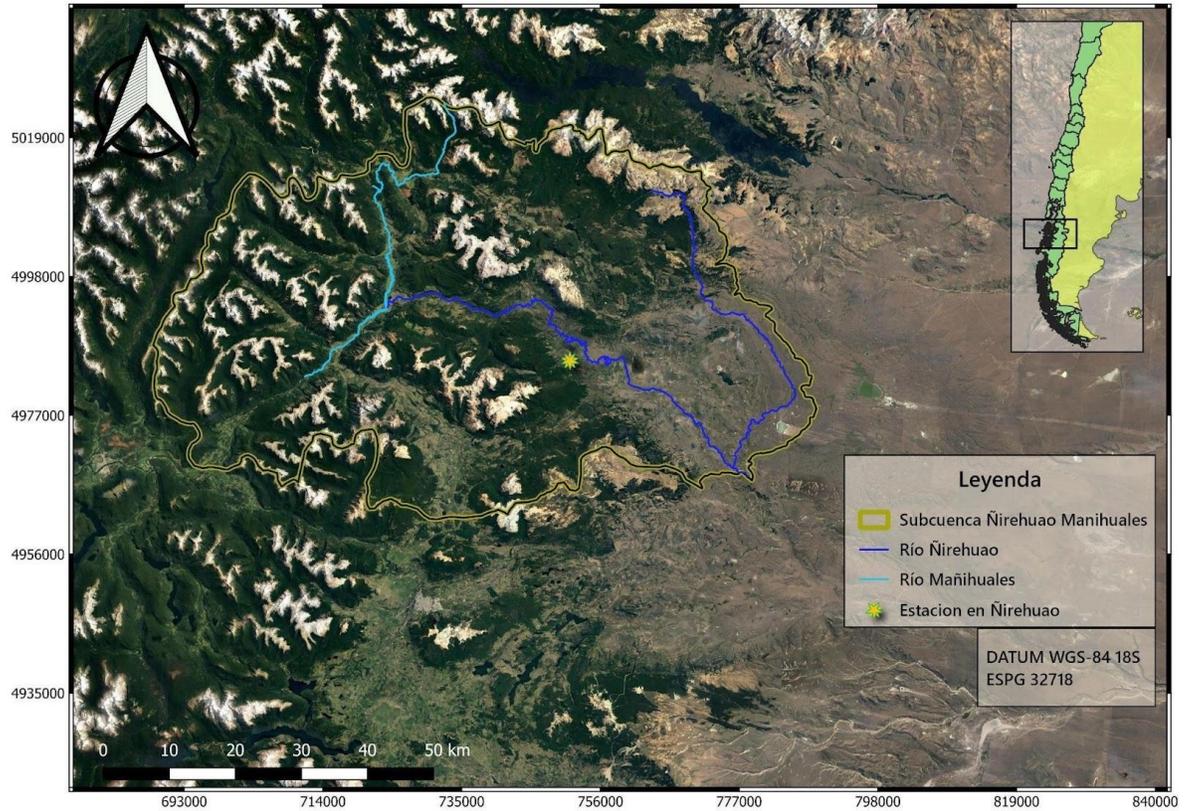


Figura 1. Área de estudio, cuenca de los ríos Ñirehuao Mañihuales

MATERIALES

En esta memoria se requirieron datos remotos e información meteorológica de diferentes resoluciones espacio-temporales que fueron obtenidos en la base de datos disponible en Google Earth Engine (GEE). A continuación, se detallan los datos utilizados según la naturaleza de su información.

Información meteorológica

ERA5

ERA5 es la versión más actualizada del reanálisis climático hecho por Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), de Copernicus Climate Change Service. Aquí se pueden obtener diversas bandas con información climática a 30 km de resolución espacial y a diferentes resoluciones temporales generadas desde enero de 1981 a nivel mundial y con cielo despejado (Hersbach, Bell, Berrisford y Hirahara, 2020). En este caso se utilizó el ERA5-Land Hourly - ECMWF Climate Reanalysis, donde se extrajo la información a nivel horaria de la temperatura del aire, radiación superficial neta de onda corta y radiación superficial neta de onda larga.

Información satelital

Producto MODIS: MOD11A1

Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) lanzado en en la misión de los satélites TERRA Y AQUA en 1999, es un sensor que posee un radiómetro avanzado de alta resolución que agrega bandas de infrarrojo lejano, lo que resulta en siete bandas disponibles a diferentes escalas espaciales (250m, 500m y 1 km), además incluye canales espectrales para remover el efecto de las nubes y atmósfera en las observaciones. (Justice et al. 1998) Este posee una gran variedad de productos satelitales, en este caso para tener valores de temperatura de la superficie de la Tierra (Ts, y LST en sus siglas en inglés) a escala diaria se utilizó uno de los productos grillados de temperatura de la superficie, MODIS LST, específicamente MOD11A1 (Wan, 2013). Este producto está disponible en las bases de datos de GEE a 1km de resolución espacial desde el 24 de febrero del año 2000. Para las operaciones descritas a continuación las bandas que se utilizaron fueron las relacionadas a Ts, hora y día del paso del satélite y una máscara de calidad.

STRM

Para obtener información sobre la elevación de la Tierra se consultó la información del satélite de Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Este radar de tipo activo obtiene información sobre la reflectividad de la Tierra, generando modelos digitales de elevación (DEM) que permiten diferenciar las características de relieve de la superficie. Las imágenes están disponibles desde febrero del año 2000 a una resolución espacial de 90 m. Slater et al. (2006) destaca que esta información ya cubre aproximadamente el 80 % de la superficie de la Tierra teniendo casi una representación universal, que además es consistente con la topografía de la Tierra, lo que la vuelve confiable para diversas aplicaciones y disciplinas.

Datos in situ

Para obtener información de ETr in situ a escala diaria se utilizó la información meteorológica obtenida desde la estación Eddy Covariance Ñirehuao ubicada en -45,241353 latitud sur y -71,796942 longitud oeste, inserta en coberturas tipo praderas en la cuenca de los ríos Ñirehuao- Mañihuales. Esta posee un periodo disponible de información desde diciembre de 2019 a febrero de 2020.

Esta estación Eddy Covariance a diferencia de otras, está compuesta por un sensor IRGASON, el cual mezcla un analizador de gas infrarrojo (IRGA) y un anemómetro sónico 3D (SON) dentro de un mismo sensor. La ventaja de tener ambos instrumentos en uno solo radica en que las mediciones generan registros de mejor calidad producto de medir en el mismo volumen de gas, de modo que la medición se produce en sincronía bajo las mismas condiciones aerodinámicas. En el caso contrario, donde los instrumentos se encuentran por separado, estas estimaciones pierden precisión. Específicamente, el sensor IRGASON mide simultáneamente cada media hora las densidades absolutas de CO₂ y vapor de agua, la

temperatura del aire, la presión barométrica, la dirección y velocidad del viento tridimensional y la temperatura sónica del aire. Todo lo anterior permite calcular el flujo de calor sensible y calor latente de la superficie (Campbell Scientific, s.f.; Bayona y Romero, 2016). Es por ello que de acuerdo Figuerola, Toledo y Sancho (2018) las mediciones Eddy covariance resultan una forma precisa para la estimación de los flujos de masa y energía, lo que permite procesar información in situ para la obtención de variables como la ETr de una superficie.

El procesamiento de esta información se describe más adelante.

METODOLOGÍA

Para el cumplimiento del primer objetivo específico, se realizaron estimaciones de ETr a escala diaria a 500 m de resolución espacial utilizando el modelo SSEBop y como inputs información del reanálisis ERA5 y MODIS, MOD11A1.

Para el cumplimiento del segundo objetivo se validaron las estimaciones obtenidas de ETr con información in situ de una estación Eddy Covariance.

Dado que el proceso de validación se ajusta a la disponibilidad de información de medidas in situ de calor latente de vaporización (LE) medido por la estación, el periodo de validación se realizó sólo desde diciembre de 2019 hasta febrero de 2020, época de verano.

Preprocesamiento inputs meteorológicos para SSEBop

A través de GEE, todas las imágenes utilizadas de ERA5, MOD11A1 Y SRTM se remuestrearon a una resolución espacial de 500 m, utilizando una interpolación bicúbica.

Radiación neta total (Rn)

Para el cálculo de la radiación neta total de la superficie (Rn) se procesaron los datos de radiación de ERA5 según la ecuación 1 (Senay et al., 2013).

$$R_n = Rn_s - Rn_l$$

ecuación 1.

Donde,

Rn_s = Radiación neta de onda corta [J/m²].

Rn_l = Radiación neta de onda larga [J/m²].

Temperatura de la superficie de la Tierra (Ts)

Los datos de Ts deben ser de la misma hora que los datos de ERA5, por lo que se utilizó la banda de hora del paso del satélite de MOD11A1 para identificar las imágenes de ERA5 correspondientes a dicha hora. Además, los píxeles de cada imagen de MOD11A1 serán filtrados mediante una máscara de calidad disponible en el mismo producto utilizado.

Evapotranspiración de referencia (ETo)

La ETo corresponde a la ET que deriva la demanda evaporativa de la atmósfera asumiendo que las coberturas son uniformes y no poseen estrés hídrico, es por ello que la ETo solo depende de factores climáticos (Palutikof et al, 1994). Para el cálculo de ETo se aplicará la ecuación 2 de Penman Monthieh desarrollada por Allen et al. (2006) en el estudio número 56 de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO56, por su sigla en inglés) utilizando como insumos la data climática de ERA5.

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G_0) + \gamma * \frac{900}{(T_a + 273,16)} * V(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34V)}$$

ecuación 2.

Donde,

ETo = Evapotranspiración de referencia [mm/día].

R_n = Radiación neta [MJ/m²día].

G_0 = Flujo de calor del suelo (~0) [MJ/m²día].

e_s = Presión de vapor de saturación [kPa].

e_a = Presión de vapor real [kPa].

Δ = Pendiente de la curva de presión de vapor [kPa/ °C].

γ = Constante psicrométrica [kPa/ °C].

T_a = Temperatura del aire media diaria [°C].

V = Velocidad del viento a 2 metros de altura [m/s].

Enfoque metodológico del modelamiento SSEBop

De acuerdo a lo definido por Senay et al. (2013) el modelo SSEBop es un método de estimación a escala diaria de ETr basado en el balance energético de la tierra que tiene como principal insumo la temperatura de la superficie. Este modelo es de una capa, lo que significa que no distingue entre la evaporación del suelo y la transpiración de la vegetación, por tanto, la superficie de la tierra es considerada una superficie homogénea, de tal forma que resistencia aerodinámica entre la superficie y la atmósfera es solo una (Jia, 2004). Así,

SSEBop define previamente conjuntos límites referenciales llamados “hot/dry” y “cold/wet” para cada píxel, los cuales pueden ser estimados en función de la temperatura del aire (T_a) y la radiación neta de la superficie (R_n) obtenida a través de datos satelitales en condiciones de cielo despejado. Debido que estos puntos se definen a nivel de píxel, el modelo permite captar mejor la variabilidad espacial de los procesos evapotranspirativos en comparación a su versión anterior “Simplified Surface Energy Balance” (SSEB) y otros modelos basados en el balance energético como, por ejemplo, METRIC Y SEBAL. La principal diferencia radica en que estos modelos asignan límites referenciales de acuerdo a regiones hidroclimáticas uniformes y no a nivel de píxel.

De esta manera, para estimar la evapotranspiración real se requieren como principales insumos la temperatura de superficie de la tierra (T_s , K), la temperatura del aire (T_a , K) y la evapotranspiración potencial (ET_o , mm).

A continuación, en la ecuación 3 se expresa la relación de estas variables para estimar la evapotranspiración real (ET_r).

$$ET_r = ET_o ET_f * K$$

ecuación 3.

Donde,

ET_r = Evapotranspiración real [mm/d].

ET_o = Evapotranspiración de referencia [mm/d].

ET_f = Fracción evaporativa [-].

K = Coeficiente de maximización de ET_o en superficies vegetales aerodinámicamente rugosas [-].

Basado en Moletto-Lobos et al. (2020), $K=1$ se utiliza de forma constante, representando demandas hídricas iguales coberturas de praderas.

Fracción evaporativa (ET_f)

La fracción evaporativa (ET_f) se obtiene en función de los diferenciales de temperatura a nivel de píxel para cada imagen en un mismo período de tiempo (ver ecuación 4). Este valor equivale al efecto de la cobertura del suelo sobre la ET_o representado por los límites de temperatura hot/dry y cold/wet que definen un balance energético y masa (Senay et al., 2013).

$$ET_f = \frac{(T_{hot} - T_s)}{dT} = \frac{(T_{hot} - T_s)}{(T_{hot} - T_{cold})}$$

ecuación 4.

Donde,

T_s = Temperatura de la superficie de la tierra para un píxel dado [K].

T_{hot} = Temperatura del aire idealizada en el límite “hot/dry” para un píxel dado [K].

T_{cold} = Temperatura del aire idealizada en el límite “cold/wet” para un píxel dado [K].

dT = Diferencial de temperatura entre T_h y T_c para un píxel dado [K].

Los valores negativos de ET_f equivalen al límite mínimo que es igual a cero, mientras que su límite máximo es 1 (Senay et al., 2013).

Los valores de T_{cold} se determinan de acuerdo a una fracción de la temperatura del aire según como se señala en la ecuación 5.

$$T_{cold} = c * T_a$$

ecuación 5.

Donde,

c = Coeficiente de corrección [0,933].

T_a = Temperatura del aire [K].

El factor “ c ” corresponde a un promedio anual de T_s y T_a para todos los píxeles de NDVI con valores mayores o iguales a 0,8. Sin embargo, de acuerdo a lo descrito por Senay et al. (2013) para coberturas bien irrigadas y totalmente evapotranspirantes (bajo porcentaje de suelo desnudo o urbano). Este valor se mantiene prácticamente constante en torno a la media de 0,933, por lo que tiene consistencia a nivel espacial y temporal.

Respecto a dT , es igual a la diferencia entre T_{hot} y T_{cold} . Aunque también se puede expresar T_{hot} en función de dT y T_{cold} , tal como se expresa en la ecuación 6.

$$dT = T_{hot} - T_{cold}$$

$$T_{hot} = dT + T_{cold}$$

ecuación 6.

Sin embargo, el dT también puede ser expresado en función de la radiación neta de la superficie (R_n) de la Tierra junto con factores meteorológicos que pueden variar espacialmente (ver ecuación 7).

$$dT = R_n * rah/pa * Cp$$

ecuación 7.

Donde,

Rn = Radiación solar neta en condiciones de cielo despejado [J/m²s].

rah = Resistencia aerodinámica de transferencia de calor [110 s/m].

pa = Densidad del aire [kg/m³].

Cp = Calor específico del aire [1,013KJ/kg K].

Para que tenga sentido físico, los valores negativos de dT se limitan a 1, ya que los valores mínimos de dT durante el invierno rara vez son menores a 2 K (Senay et al, 2013). Para obtener Rn en segundos se realiza la conversión a los conjuntos de datos horarios de Rn de ER5. Por otro lado, rah para una superficie hipotéticamente desnuda y seca toma el valor de 110 s/m (Senay et al., 2016 citando a Senay et al., 2013). pa se estimó utilizando la ecuación 8, que tiene como inputs la presión y temperatura del aire (Allen et al., 2006).

$$pa = 3,486 * P / T_{kv}$$

ecuación 8.

Donde,

P= Presión del aire [kPa].

Tkv = Temperatura virtual para igual la presión de aire seco con aire húmedo [K].

Para obtener Tkv se utiliza la ecuación 9.

$$Tkv = 1,01 * T$$

ecuación 9.

Donde,

T= Temperatura del aire a escala diaria [K].

Por otro lado, para el cálculo de la presión del aire se utilizaron los valores de elevación obtenidos desde el modelo DEM obtenido de la misión SRTM, esto permitió espacializar los valores de variable de la densidad del aire (pa) según la ecuación 10.

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

ecuación 10.

Donde,

Z = elevación en [m].

El valor de 101,3 equivale a la presión del mar en kPa a 20°C.

Validación con estación Eddy Covariance

Estación Eddy Covariance IRGASON

Para obtener valores de la Etr real in situ, se procesaron los datos disponibles en la estación Eddy Covariance IRGASON de Ñirehuao. Se obtuvo primero el flujo de calor latente (λE) en base a la humedad específica y la velocidad de viento producidos en la Capa Superficial Atmosférica (ASL), la cual que representa un horizonte homogéneo para estas variables, de modo que se puede establecer la relación descrita en la ecuación 11, basada en la teoría biofísica de similaridad de Monín-Obukhov (Monin y Obukhov, 1954).

$$\lambda E = \lambda p u * \frac{k(q - q_z)}{\ln\left(\frac{z - d_0}{z_{om}}\right) - \psi v}$$

ecuación 11.

Donde,

$\lambda p u$ = Calor latente de vaporización [J/kg].

q = Humedad específica del aire cerca de la superficie [kg/kg].

q_z = Humedad específica del aire a la altura z .

v = Función de corrección de la estabilidad para el transporte de calor latente [-].

z = Altura de ASL [m].

d_0 = Altura de la cobertura sobre la superficie [m].

z_{om} = Altura de la rugosidad para la transferencia del *momentum* [m].

Una vez obtenido λE (Watts/m²), se puede obtener la ETr dividiendo por el calor latente de vaporización del agua (λ) que equivale a $22,60 \cdot 10^3$ kJ/kg. Luego se transformó a mm/día el factor de conversión descrito en según FAO (Allen et al., 2006).

Por otro lado, para poder comparar el área del píxel del modelo SSEBop con la medición de ETr de la estación Ñirehuao, se ponderó según la ecuación 12 con el "footprint climatology" de la estación, la cual es una agregación promedio de una serie de "footprints" calculados a través del tiempo. Un "footprint" describe el área de influencia en las mediciones de los flujos turbulentos, como los de calor latente y sensible, los cuales varían según las condiciones atmosféricas. Por ello, operar con un "footprint" permite interpretar de mejor manera las mediciones de los flujos. Este también funciona para ajustar y ponderar lo estimado por el píxel del modelo de flujos. Por último, los procesos metodológicos para el cálculo del "footprint" se describen en la propuesta de Kljun, N et al. (2015) que, además incluye un código de libre acceso para su cálculo

$$ETr_p = \text{píxel } i_{Fp} * \text{píxel } i_M * a$$

ecuación 12.

Donde,

ETr_p = Evapotranspiración real ponderada [mm/día].

píxel i_{FP} = Valor de ponderación del en el píxel i del “footprint” [m⁻²].

píxel i_M = Valor de ETr en el píxel i del modelo [mm/día].

a = Área del píxel según la resolución espacial del “footprint” [m²].

Validación

Finalmente, para validar los datos de ETr se compararon a través de una correlación lineal las estimaciones de lo modelado por SSEBop con información in situ de Etr, obtenida del procesamiento de los datos medidos por la estación Eddy Covariance Ñirehuao.

Asimismo, se utilizaron los siguientes estadígrafos para evaluar el producto:

Sesgo (bias) y desviación estándar (σ), que indican la exactitud y la precisión del modelo, respectivamente. Luego se calculó el Error Cuadrado Medio (RMSE), que indica el error relativo medio. Y por último el Coeficiente de Determinación (R²) que determina el grado de linealidad de los datos medidos comparados con los valores por estación. A continuación, se detallan las ecuaciones 13, 14 y 15 para su determinación.

$$bias = \frac{\sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - \theta_i)}{n}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - \theta_i)^2}{n - 1}}$$

ecuación 13

Donde,

\hat{y}_i = Valor estimado.

y_i = Valor observado

n = Número de observaciones

$$RMSE = \sqrt{bias^2 + \sigma^2}$$

ecuación 14.

Donde,

$bias$ = Valor medio de los valores residuales.

σ = Desviación estándar de los valores residuales.

$$R^2 = \frac{SCR}{SCT} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \underline{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \underline{y}_i)^2}$$

ecuación 15.

Donde,

SCR = Suma de cuadrados de la regresión.

SCT = suma total de errores.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan los principales resultados del presente trabajo, comenzando con las imágenes de ETr generadas por el modelo SSEBop y finalizando con la validación de estos resultados.

Estimación de la ETr a través del modelo SSEBop

Para poder observar las estimaciones de ETr del modelo SSEBop en el espacio, se muestra una comparación estacional entre las imágenes de ETr promedio (mm/día) durante la época de invierno 2019 y verano 2020 en la cuenca de Ñirehuao Mañihuales. Así, en la figura 2 podemos contrastar evidentemente las diferencias entre las épocas de invierno 2019 y verano 2020 en la cuenca, donde, en invierno, el rango de valores por píxel va en torno a los 0 a 0,08 mm/día mientras que, en verano, se produce un considerable aumento con valores entre 0 a 1,7 mm/día. Los valores igual a cero en verano se deben a la falta de disponibilidad de imágenes de LST de MOD11A1, esto se debe a que este producto solo contiene imágenes con cielo despejado (Wan, 2013).

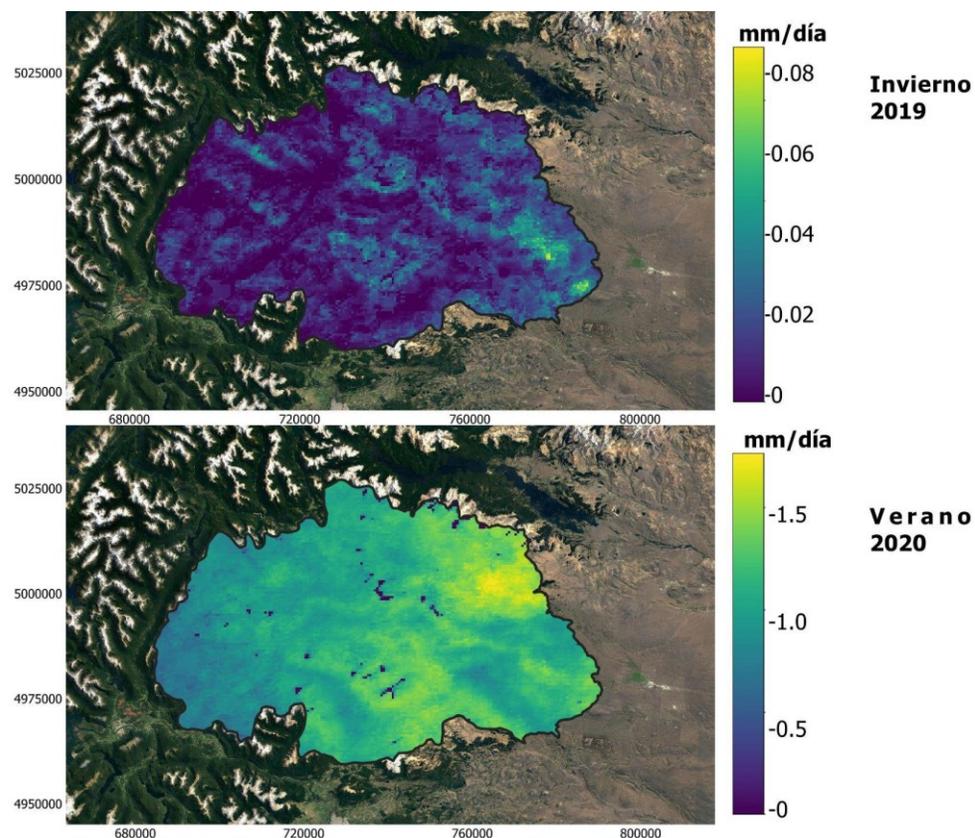


Figura 2. Evapotranspiración real promedio [mm/día] estimada por el modelo SSEBop durante invierno de 2019 (junio-septiembre) y verano de 2020 (diciembre-marzo) en la cuenca Ñirehuao Mañihuales.

En cuanto a lo anterior, y para profundizar acerca de la estacionalidad de la ETr modelada por SSEBop, la figura 3 muestra una serie temporal de 10 años de datos de ETr estimados en el píxel el cual contiene a la estación Ñirehuao. Aquí se puede observar cómo los valores máximos de ETr se producen en verano y los mínimos en invierno. Esto se condice con el comportamiento estacional de la ETr (Cristiano et al., 2016)

Por lo demás, las estimaciones de SSEBop generado con la presente metodología (donde $K=1$), son particularmente sensibles a los valores que tome la temperatura de la superficie (LST), ya que es la principal fuente de información para determinar la fracción evaporativa (ETf), la cual es determinante en las estimaciones de producto SSEBop. De esta forma, ETf permite que la estacionalidad de LST de MODIS y de SSEBop se correlacionen de acuerdo a un balance energético y de masa (Senay et al., 2013). Sin embargo, y por lo mismo, la disponibilidad de información diaria de ETr de SSEBop se encuentra restringida por la disponibilidad de información de LST de MODIS, ya que MODIS LST solo entrega valores de temperatura de la superficie bajo condiciones de cielo despejado, situación que es relativamente baja en zonas australes (Wan, 2013). Es por ello que, sólo existen estimaciones diarias de ETr para los días donde hubo cielo despejado en el píxel de la estación.

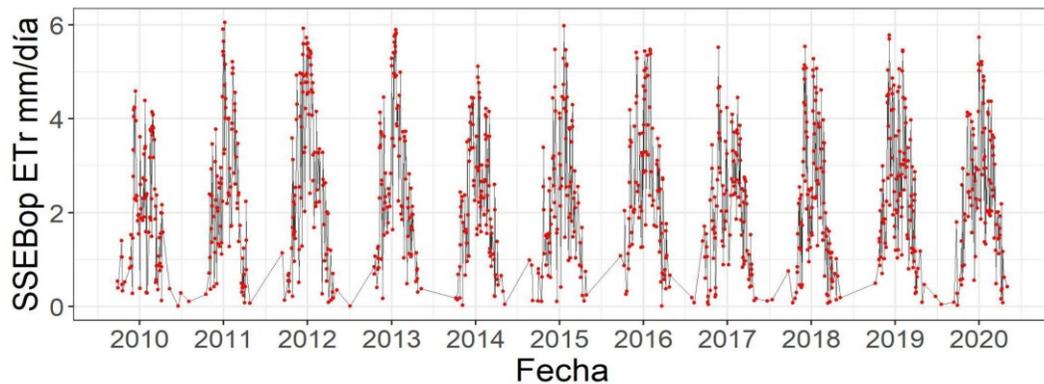


Figura 3. Serie de tiempo de ETr estimado por SSEBop en el píxel de intersección con la ubicación de la estación Ñirehuao desde 2010 hasta 2020.

Por otro lado, en la serie de tiempo (ver figura 3) se puede ver como desde el año 2011 los valores máximos evapotranspirativos son más altos que en 2010, lo que coincide con un estudio realizado por Pérez, Mattar y Fuster (2018), donde desde 2010 se registró un aumento significativo en los regímenes de temperatura y radiación, en las zonas patagónicas lo que, también explica la disminución de nieve en la zona.

De esta forma, para profundizar en la sensibilidad de SSEBop ante los cambios de LST, se muestra una comparación para un mismo periodo de verano, pero diferentes años, siendo estos la segunda semana de febrero de 2019 y 2020 (ver figura 4), donde específicamente, la segunda semana de febrero de 2020 se detectaron temperaturas 10°C mayores a la media para ese mismo periodo de tiempo (ver anexo A).

En general, se observaron en febrero de 2020 como los valores más bajos (tonalidades moradas) disminuyen respecto de febrero de 2019. En particular en febrero de 2020, los píxeles en parte alta de la cuenca (este-oeste) presentaron un aumento en los valores ETr, ya que aumenta la tonalidad celeste verde. Además, para ese mismo año, hay zonas donde los píxeles alcanzan tonalidades amarillas, por lo que, estos representan los valores de ETr promedio máximos de esa semana. Por otro lado, los valores cero (tonalidad morada) de febrero de 2020 se asocian a la falta de información de MODIS LST para ese periodo de tiempo.

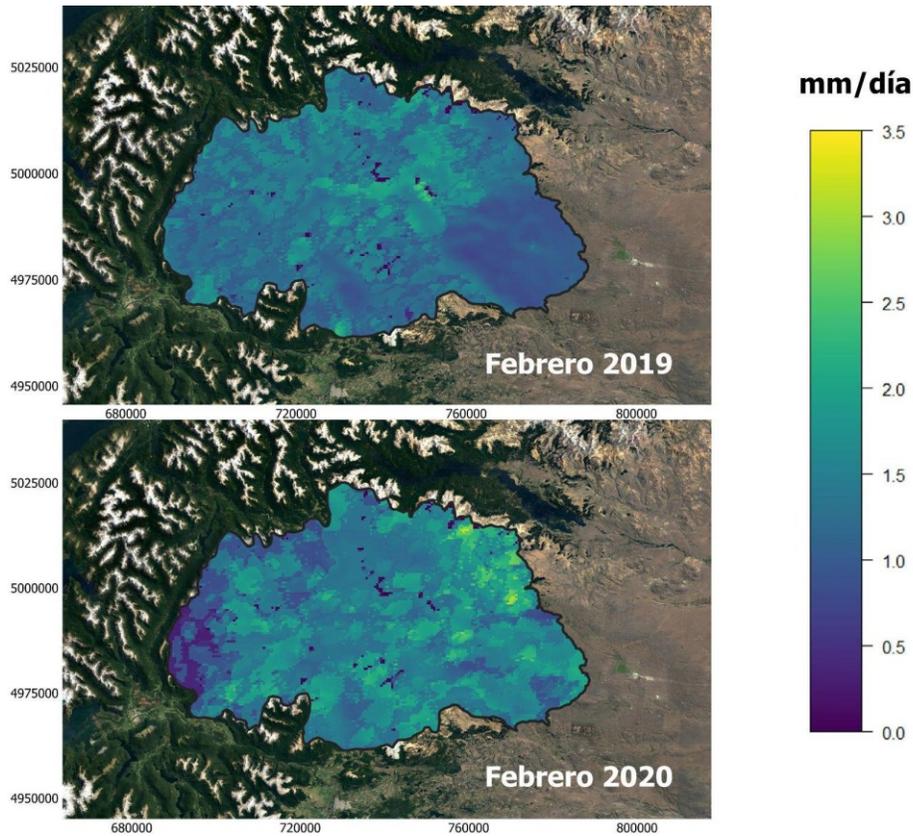


Figura 4. Imágenes con valores promedio de ETr mm/día, construidas por el modelo SSEBop en la cuenca Ñirehuao Mañihuales durante segunda semana para febrero de 2019 y febrero de 2020.

Para poder hacer más evidente esta comparación, en la figura 5 se graficó la frecuencia de los valores promedios de ETr que toman los píxeles dentro de la cuenca Ñirehuao Mañihuales para estos dos periodos de tiempo.

Se puede observar como una mayor cantidad de píxeles tomaron valores de ETr de mayor magnitud durante la segunda de febrero de 2020, donde el máximo fue de 3,2 mm/día, a

diferencia de febrero que fue de 2,4 mm/día. Sin embargo, no se puede determinar, a priori, si es significativa esta diferencia.

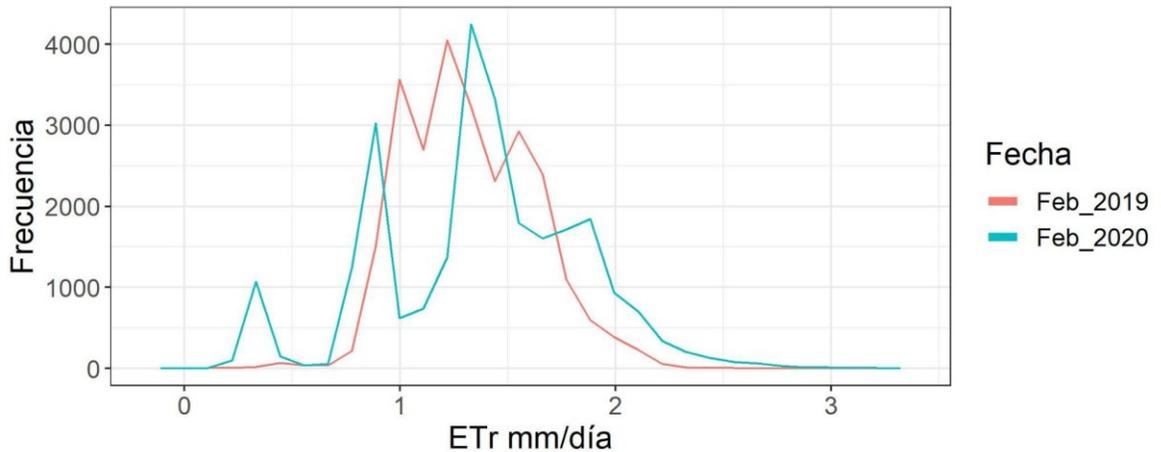


Figura 5. Histograma hecho a base de las imágenes promedio de ETr mm/día construidas por el modelo SSEBop durante segunda semana para febrero de 2019 y febrero de 2020.

Validación con estación Eddy Covariance

Una vez obtenido el “footprint” de la estación Ñirehuao (ver apéndice A), se realizó la ponderación con los píxeles del modelo SSEBop. La figura 6 muestra la serie y el análisis estadístico que contiene las estimaciones de ETr del modelo SSEBop ponderadas por el “footprint” y comparado con las agregaciones diarias de ETr obtenidas desde la estación Ñirehuao. En esta comparación se puede observar cómo SSEBop tiene una respuesta similar a lo mostrado por MODIS LST en los meses de alta demanda hídrica como diciembre y enero. En este periodo se evidenció una ola de calor cada vez más frecuentes en la Patagonia (Jacques-Coper et al., 2015) con un rápido enfriamiento en los meses posteriores (mediados de febrero - marzo).

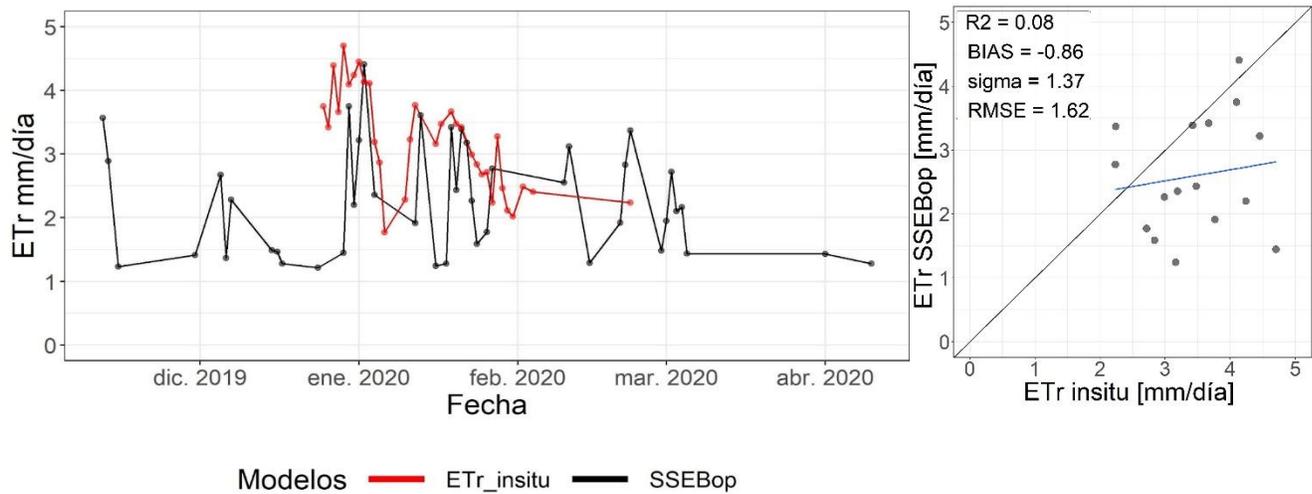


Figura 6. Series de tiempo y gráfico de dispersión del modelo SSEBop comparado con las estimaciones de ETr in situ de la estación Ñirehuao.

En cuanto a la validación, las estimaciones diarias de SSEBop durante el período de validación, estas mantuvieron un error relativamente bajo en torno a los 1,62 mm/día (RMSE) y una precisión en torno a los 0.86 mm/día (bias), pudiendo explicar en un 8% (R2) la varianza de las mediciones in situ, lo que se entiende como una baja correspondencia lineal. Por otro lado, las estimaciones de SSEBop tienden a subestimar respecto a las mediciones in situ.

Por otra parte, el periodo de tiempo disponible para validar está limitado mayormente a los meses de enero y febrero, de modo que no es posible validar, ni concluir la calidad del modelo en otro periodo del año que no sea ese rango de fechas. Es por ello que, la resolución temporal de las mediciones de estación no es lo suficientemente extensa para evaluar la estacionalidad en comparación a SSEBop, ni tampoco se consiguieron la cantidad suficiente de puntos de comparación para tener un grupo muestral que permita mejorar la representatividad de la comparación de las varianzas (R2). De este modo, y bajo la metodología aplicada, el modelo al compararlo con lo medido en la estación no posee capacidad predictiva para ETr en el periodo utilizado, no obstante entrega estimaciones con reducido error

Por otro lado, para mejorar las estimaciones del modelo SSEBop puede ser útil realizar un estudio complementario que permita incluir el efecto de la vegetación sobre los flujos de ETr en la cuenca. Para esto y utilizando esta misma metodología, sería necesario estudiar el comportamiento del coeficiente de maximización de ETo (K) tanto en el espacio como en el tiempo según el comportamiento de las coberturas vegetales a lo largo de los años.

El trabajo desarrollado en esta memoria es de gran utilidad para corroborar la representatividad de SSEBop en zonas patagónicas, en específico en la cuenca Ñirehuao

Mañihuales. Estas zonas, a pesar de aparentar abundante disponibilidad hídrica, han sido afectada por las variaciones climáticas a través del y la cual, anteriormente no había sido validado un modelo de ETr (Pérez, Mattar y Fuster, 2018; Olivera- Guerra et al., 2022). Así, el modelo SSEBop requiere de más estudios que permitan obtener el alcance de su representatividad, validando con otras zonas de la Patagonia. Finalmente, cabe destacar como las estimaciones realizadas por SSEBop pueden ser indispensable para el monitoreo de la ETr en tiempo real que facilite información confiable para la toma de decisiones, la gestión y manejo del recurso hídrico en Chile y la Patagonia (Moletto-Lobos et al.,2020; Flores et al., 2021).

CONCLUSIONES

En esta memoria se generó un modelo grillado de ETr a nivel diario de 500 m de resolución espacial en la cuenca Ñirehuao Mañihuales en la Patagonia chilena. Este tuvo como principales entradas datos remotos e información meteorológica de reanálisis climático a nivel diario, para luego ser validado con observaciones in situ disponibles para la zona en el período de verano 2020.

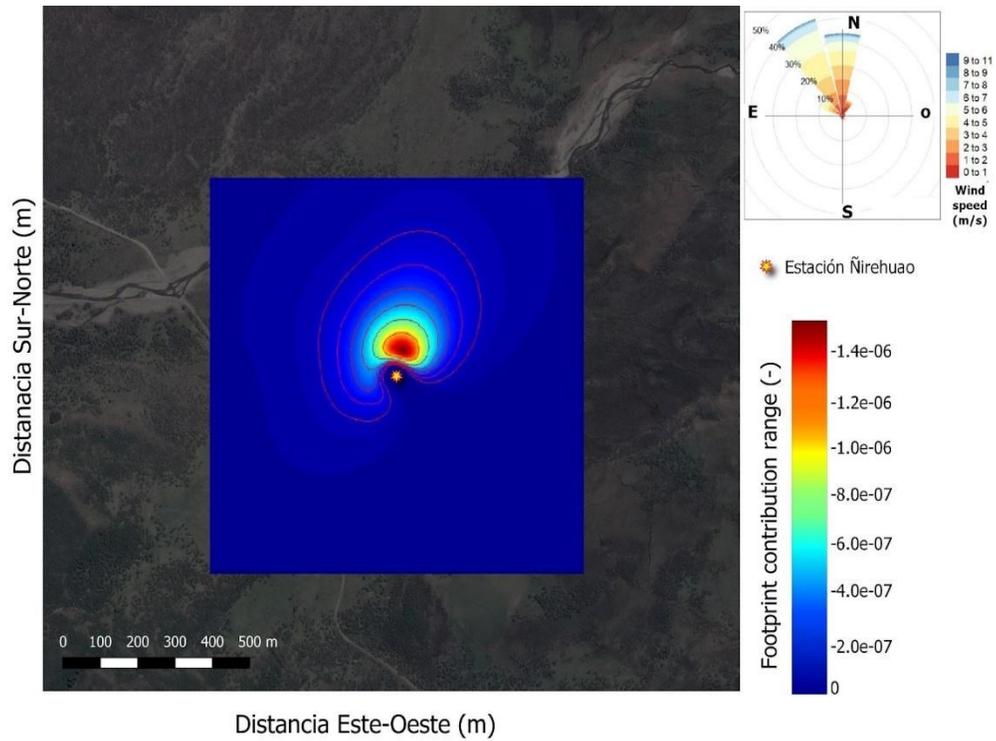
El modelo logró estimar ETr en la zona patagónica de Ñirehuao Mañihuales, pudiendo distinguir la estacionalidad de la ETr a través del tiempo y su variación respecto de cambios en la temperatura de la superficie, captando procesos que generan cambios en los regímenes de temperatura como las olas de calor. Esta última variable fue una de las principales limitantes para la obtención de imágenes de ETr continuas en el espacio y tiempo, debido a la dificultad para conseguir imágenes con cielo despejado en las zonas patagónicas donde es recurrente la presencia de nubes.

En cuanto a la validación, se concluyó que el modelo no es efectivo simulando la ETr en la temporada de verano 2020 (diciembre a febrero) para la cuenca Ñirehuao Mañihuales. Por otro lado, los registros in situ no lograron ser lo suficientemente extensos temporalmente para generar una comparación con mayor densidad muestral, por lo que, el proceso de validación se vio fuertemente afectado en su representatividad. No obstante, estos resultados entregan antecedentes para el estudio de la evapotranspiración real en las cuencas de la Patagonia, donde anteriormente no se han desarrollado ni validado métodos de estimación similares de ETr. Por lo mismo, este trabajo contribuyó con información clave sobre la calidad del producto SSEBop y su desempeño en el área de estudio.

Finalmente, para facilitar la validación de modelos de ETr se requiere invertir en estaciones y equipos de medición de flujos de manera que se tengan disponibles registros concisos y continuos en el tiempo de ETr. Esto último, con el fin de facilitar investigaciones que se dediquen a validar modelos de estimación de ETr como SSEBop en otras épocas del año y en otros sectores de la Patagonia. Para así, disponer de herramientas técnicas que favorezcan una gestión eficiente del recurso hídrico, sobre todo en una zona donde se está produciendo un inminente agotamiento en la disponibilidad del agua tanto por el cambio climático como por el uso antrópico.

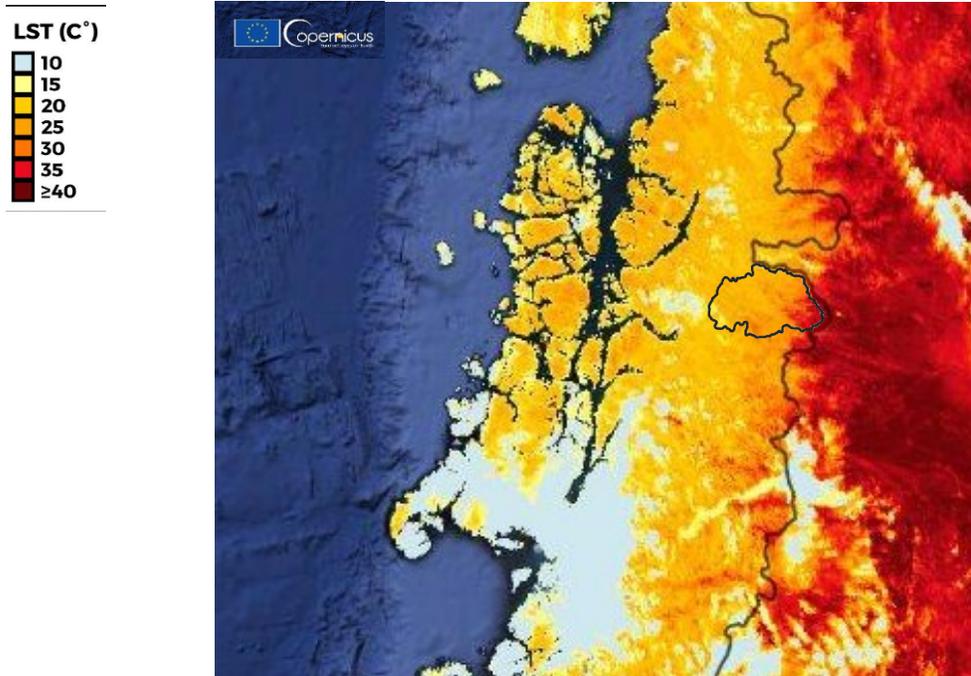
APÉNDICES Y ANEXO

Apéndice A. “Footprint climatology” para la estación Ñirehuao desde diciembre 2019 a febrero 2020.



Basado en Kljun et al. (2015).

Anexo A. Imagen de temperatura de la superficie (LST) tomada por la misión de Copernicus, Sentinel-3 para el 10 de febrero de 2020, junto con una imagen superpuesta de la cuenca Ñirehuao Mañihuales.



Fuente: European Union, Copernicus Sentinel-2 imagery (2021).

BIBLIOGRAFÍA

- Aguayo, R., León-Muñoz, J., Vargas-Baecheler, J. et al. (2019). The glass half-empty: climate change drives lower freshwater input in the coastal system of the Chilean Northern Patagonia. *Climatic Change* 155, 417–435. doi:10.1007/s10584-019-02495-6.
- Allen R.; L. Pereira; D. Raes; M. Smith. (2006). Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos del agua de los cultivos. Estudio FAO de Riego y Drenaje. ISSN 254-5293p.
- Álvarez, C., Veblen, T., Christie, D., & González-Reyes, Á. (2015). Relationships between climate variability and radial growth of *Nothofagus pumilio* near altitudinal treeline in the Andes of neorthern Patagonia, Chile. *Forest Ecology and Management*, 342, 112-121. doi: 10.1016/j.foreco.2015.01.018.
- Bayona C. y Romero H. (2016). Establecimiento del sistema Eddy Covariance en el cultivo de palma de aceite para cuantificar el rendimiento como sumidero de CO₂. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/340846647_Establecimiento_del_sistema_Eddy_Covariance_en_el_cultivo_de_palma_de_aceite_para_cuantificar_el_rendimiento_como_sumidero_de_CO2.
- Campbell Scientific, Inc. (s.f.). Intruccion Manual, EASYFLUX DL CR3000OP For CR3000 and Open-Path Eddy-Covariance System Revision: 3/18.
- Copernicus. (2021). Patagonia Heatwave, Argentina, Chile. European Union, Copernicus Sentinel-2 imagery. Obtenido de <https://www.copernicus.eu/en/media/image-day-gallery/patagonia-heatwave-argentina-chile>.
- Cristiano, P. M., Pereyra, D. A., Bucci, S. J., Madanes, N., Scholz, F. G., & Goldstein, G. (2016). Remote sensing and ground-based measurements of evapotranspiration in an extreme cold Patagonian Desert. *Hydrological Processes*, 30(24), 4449–4461. doi:10.1002/hyp.10934.
- Cruz P., Solís R., Díaz S., Rojas., Ramos F. (2001). Síntesis del Plan de ordenación Reserva Nacional Mañihuales. Plan de Ordenación Forestal. Primera versión para la ordenación del área de plantaciones. Corporación Nacional Forestal (CONAF).

Obtenido de
https://www.academia.edu/1903702/S%C3%ADntesis_del_Plan_de_Ordenaci%C3%B3n_Reserva_Nacional_Ma%C3%B1ihuales.

Daniels, L.D., Veblen, T.T. (2004). Spatiotemporal influences of climate on altitudinal treeline in northern Patagonia. *Ecology* 85, 1284–1296. <http://dx.doi.org/10.1890/03-0092>.

Dirección General de Aguas. (2004). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivo de calidad: Cuenca río Aysén. Cade-Idepe. Obtenido de <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/12/Aysen.pdf>.

Esquivel, J., Pauchard, A., & Saldaña A. (2019). Efecto de la diversidad funcional sobre la tasa de evapotranspiración: un análisis anual de tres bosques templados chilenos. *Gayana Botanica*, 76(2), 156-167. doi:10.4067/S0717-66432019000200156.

Figueroa P., Toledo E. y Sancho A. (2018). Measurement of turbulent flows on olive trees and buffelgrass using eddy covariance method. Obtenido en https://www.researchgate.net/publication/327749178_Measurement_of_turbulent_flows_on_olive_trees_and_buffelgrass_using_eddy_covariance_method.

Flores, N., Rodríguez, R., Yépez, S., Osoro, V., Rau, P., Rivera, D., & Balocchi, F. (2021). Comparison of Three Daily Rainfall-Runoff Hydrological Models Using Four Evapotranspiration Models in Four Small Forested Watersheds with Different Land Cover in South-Central Chile. *Water*, 13(22), 3191. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/w13223191>.

Garreaud RD. (2018) Record-breaking climate anomalies lead to severe drought and environmental disruption in western Patagonia in 2016. *Clim Res* 74:217-229. <https://doi.org/10.3354/cr01505>.

González, L., González, A., Saavedra, C. (2009). Caracterización hidrogeológica de los recursos hídricos en la Cuenca del Río Mañihuales, Región Aysén, mediante trazadores isotópicos e hidroquímicos. Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Concepción, Casilla 160-C, Concepción, Chile. Obtenido de https://biblioserver.sernageomin.cl/opac/DataFiles/12993_v1_S1_012.pdf.

Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S. (2020). The ERA5 reanalysis. The ERA5 global reanalysis. *QJR Meteorol Soc.* 2020; 146:1999–2049. DOI:10.1002/qj.3803.

- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2021). Manual de evaluación de la huella hídrica. Establecimiento del estándar mundial. (A. Valdés de Anca, Trad.) Madrid, España: AENOR Internacional, S.A.U. Obtenido de https://waterfootprint.org/media/downloads/Water_Footprint_Assessment_Manual_Spanish.pdf.
- Jia L. (2004). Modeling heat exchanges at the land-atmosphere interface using multiangular thermal infrared measurements. Ph.D. Dissertation, Wageningen University, The Netherlands. 227pp.
- Jiménez-Muñoz, J.C., Sobrino, J.a., Mattar, C., Malhi, Y. (2013). Spatial and temporal patterns of the recent warming of the Amazon Forest. *J. Geophys. Res. Atmos.* 118 (11), 5204–5215. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50456>.
- Jovanovic, N., & Israel, S. (2012). Critical Review of Methods for the Estimation of Actual Evapotranspiration in Hydrological Models. *Evapotranspiration - Remote Sensing and Modeling*. doi:10.5772/21279.
- Justice C. O.; E. Vermote; J. R. G. Townshend; R. Defries; D. P. Roy; D. K. Hall et al. (1998). The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4), 1228–1249.
- Katul, G., Oren, R., Manzoni, S., Higgins, C., & Parlange, M. (2012). Evapotranspiration: A process driving mass transport and energy exchange in the soil-plant-atmosphere-climate system. *Reviews of Geophysics*, 50(3). doi:10.1029/2011RG000366.
- Kljun, N., Calanca, P., Rotach, M. W., & Schmid, H. P. (2015). A simple two-dimensional parameterisation for Flux Footprint Prediction (FFP). *Geoscientific Model Development*, 8(11), 3695–3713. doi:10.5194/gmd-8-3695-2015.
- Li, Z.-L., Tang, R., Wan, Z., Bi, Y., Zhou, C., Tang, B., ... Zhang, X. (2009). A Review of Current Methodologies for Regional Evapotranspiration Estimation from Remotely Sensed Data. *Sensors*, 9(5), 3801–3853. doi:10.3390/s90503801.
- Liou, Y.-A., & Kar, S. (2014). Evapotranspiration Estimation with Remote Sensing and Various Surface Energy Balance Algorithms—A Review. *Energies*, 7(5), 2821–2849. doi:10.3390/en7052821.

- Luebert F. y Pliscoff P. (2017). Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile. Editorial Universitaria.
- Malhi, Y., Franklin, J., Seddon, N., Solan, M., Turner, M., Field, C., & Knowlton, N. (2020). Climate change and ecosystems: threats, opportunities and solutions. *Philosophical transactions of the royal society*, 375.doi.org/10.1098/rstb.2019.0104.
- McCaul, M., Barland, J., Cleary, J., Cahalane, C., McCarthy, T., y Diamond, D. (2016). Combining Remote Temperature Sensing with in-Situ Sensing to Track Marine/Freshwater Mixing Dynamics. *Sensors*, 16(9), 1402. doi:10.3390/s16091402.
- Moletto-Lobos, I., Mattar C. y Barichivich J. (2020). Performance of Satellite-Based Evapotranspiration Models in Temperate Pastures of Southern Chile. *Water* 12, volumen (12). doi:12123587. Recuperado de <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/12/3587>.
- Monin A y A. Obukhov. 1954. Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. *Tr. Akad. Nauk SSSR Geophys. Inst.* 24(151): 163 – 187.
- Olivera-Guerra, L., Quintanilla, M., Moletto-Lobos, I., Pichuante, E., Zamorano-Elgueta, C., & Mattar, C. (2022). Water dynamics over a Western Patagonian watershed: Land surface changes and human factors. *Science of The Total Environment*, 804, 150221. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150221
- Pahlevan, N., Chittimalli, S. K., Balasubramanian, S. V., & Vellucci, V. (2019). Sentinel-2/Landsat-8 product consistency and implications for monitoring aquatic systems. *Remote Sensing of Environment*, 220, 19–29. doi: 10.1016/j.rse.2018.10.027.
- Palutikof J., Goodess C. y Guo X. (1994). Climate change, potential evapotranspiration and moisture availability in the mediterranean basin. *International Journal of climatology*. volumen (14). 853-859. Obtenido de https://www.academia.edu/55886778/Climate_change_potential_evapotranspiration_and_moisture_availability_in_the_mediterranean_basin.
- Pérez, T., Mattar, C., & Fuster, R. (2018). Decrease in Snow Cover over the Aysén River Catchment in Patagonia, Chile. *Water*, 10(5), 619. doi:10.3390/w10050619.

- Rodríguez-Catón, M., Villalba, R., Srur, A. M., & Luckman, B. (2015). Long-term trends in radial growth associated with *Nothofagus pumilio* forest decline in Patagonia: Integrating local- into regional-scale patterns. *Forest Ecology and Management*, 339, 44–56. doi: 10.1016/j.foreco.2014.12.004.
- Santibañez, F. (2016). Cambio climático y recursos hídricos en Chile: La transición hacia la gestión del agua en los nuevos escenarios climáticos de Chile. Ministerio de agricultura, oficina de Estudios y Políticas Agrarias. Obtenido de https://www.opia.cl/601/articles-91835_archivo_01.pdf.
- Senay, G. B., Bohms, S., Singh, R. K., Gowda, P. H., Velpuri, N. M., Alemu, H., & Verdin, J. P. (2013). Operational Evapotranspiration Mapping Using Remote Sensing and Weather Datasets: A New Parameterization for the SSEB Approach. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 49(3), 577–591. doi:10.1111/jawr.12057.
- Senay, G. B., Friedrichs, M., Singh, R. K., & Velpuri, N. M. (2016). Evaluating Landsat 8 evapotranspiration for water use mapping in the Colorado River Basin. *Remote Sensing of Environment*, 185, 171–185. doi: 10.1016/j.rse.2015.12.043.
- Senay, G. B. (2018). Satellite Psychrometric Formulation of the Operational Simplified Surface Energy Balance (SSEBop) Model for Quantifying and Mapping Evapotranspiration. *Applied Engineering in Agriculture*, 34(3), 555–566. doi:10.13031/aea.12614.
- Slater, J. A., Garvey, G., Johnston, C., Haase, J., Heady, B., Kroenung, G., & Little, J. (2006). The SRTM Data “Finishing” Process and Products. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72(3), 237–247. doi:10.14358/pers.72.3.237.
- Suarez, M.L., Ghermandi, L., Kitzberger, T. (2004). Factors predisposing episodic drought-induced tree mortality in *Nothofagus* – site, climatic sensitivity and growth trends. *J. Ecol.* 92, 954–966.
- Uribe, H. y Ruiz R. (2019). Riego y evapotranspiración. En INIA. Boletín INIA N° 415 Descripción y uso de la Red Agrometeorológica INIA. (56-61). Chile. Obtenido de <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/123456789/6836/Bolet%C3%ADn%20INIA%20N%C2%B0%20415?sequence=1&isAllowed=y>.

- Urrutia-Jalabert, R., Barichivich, J., Rozas, V., Lara, A., Rojas, Y., Bahamondez, C., . . . Cuq, E. (2021). Climate response and drought resilience of *Nothofagus obliqua* secondary forests across a latitudinal gradient in south-central Chile. *Forest Ecology and Management*, 485. doi: 10.1016/j.foreco.2021.118962.
- Vargas, J., De la Fuente, L. y Arumí, J.L. (2012). Balance hídrico mensual de una cuenca Patagónica de Chile: aplicación de un modelo parsimonioso. *Obras y Proyectos* 12, 32-41. Obtenido de <https://scielo.conicyt.cl/pdf/oyp/n12/art03.pdf>.
- Wan Z. (2013). Collection-6 MODIS Land Surface Temperature Products Users' Guide. ERI, University of California, Santa Barbara. Obtenido de https://lpdaac.usgs.gov/documents/118/MOD11_User_Guide_V6.pdf.
- Wang, S., Pan, M., Mu, Q., Shi, X., Mao, J., Brümmer, C., . . . Black, T. A. (2015). Comparing Evapotranspiration from Eddy Covariance Measurements, Water Budgets, Remote Sensing, and Land Surface Models over Canada, *Journal of Hydrometeorology*, 16(4), 1540–1560. doi:10.1175/jhm-d-14-0189.1.
- Yang, Y., Su, H., Zhang, R., Wu, J., & Qi, J. (2013). A New Evapotranspiration Model Accounting for Advection and Its Validation during SMEX02. *Advances in Meteorology*, 2013, 1–13. doi:10.1155/2013/389568.