



**UNIVERSIDAD DE LA FRONTERA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN OBRAS CIVILES**

"Monitoreo operacional de las anomalías de humedad de suelo para Chile continental"

Rocío Scarlett Muñoz Neira

2025



**UNIVERSIDAD DE LA FRONTERA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN OBRAS CIVILES**

**"Monitoreo operacional de las anomalías de humedad de suelo para Chile
continental"**

**TRABAJO PARA OPTAR AL TÍTULO
DE INGENIERO CIVIL**

Profesor Guía: Dr. Mauricio Zambrano Bigiarini

Profesor Co-Guía: MSc. Rodrigo Marinao Rivas

Rocío Scarlett Muñoz Neira

2025

**Monitoreo operacional de las anomalías de humedad de suelo para Chile
continental**

ROCÍO SCARLETT MUÑOZ NEIRA

COMISIÓN EVALUADORA

Dr. MAURICIO ZAMBRANO BIGIARINI

Profesor guía

MSc. RODRIGO MARINAO RIVAS

Profesor co-guía

Dr. OSCAR BAEZ VILLANUEVA

Académico Evaluador

Dr. MAURICIO GALLEGUILLOS TORRES

Académico Evaluador

Calificación trabajo escrito:

Calificación examen:

Calificación final:

Agradecimientos

Llegar hasta este momento ha sido un camino lleno de aprendizajes, desafíos y crecimiento personal. Este proyecto no solo refleja mi esfuerzo individual, sino también el invaluable apoyo de muchas personas que me acompañaron de diversas formas, y a quienes les expreso mi más profundo agradecimiento.

En primer lugar, quiero agradecer sinceramente a mi profesor guía, Mauricio Zambrano, por su compromiso, tiempo dedicado y por la confianza depositada en mí para llevar adelante este trabajo. De igual manera, agradezco profundamente a Oscar, quien estuvo dispuesto a brindarme su ayuda cuando lo necesité, y a Rodrigo, mi co-guía, por acompañarme durante este proceso, siendo pieza clave para concretar mi actividad de titulación.

Mis agradecimientos se extienden al equipo del Observatorio de Recursos Hídricos, Kimünko, especialmente a mis compañeros de escritorio Héctor y Marfa, cuya compañía, apoyo y motivación hicieron mucho más llevadera mi estancia.

A mi madre Roxana y a mi hermano Matías, gracias por estar incondicionalmente a mi lado en cada etapa de mi vida, especialmente durante este último desafío. Su apoyo constante, amor y comprensión han sido fundamentales para alcanzar esta meta.

Asimismo, agradezco a todos mis amigos por su apoyo, risas compartidas y valiosos recuerdos. En especial, a Mauricio, Joaquín, Nicole, Esteban y Nicolás por su constante presencia y ánimo incondicional. A Yas y Fer, por ser pilares esenciales en mi vida, por sostenerme en momentos difíciles y regalarme siempre una sonrisa cuando más la necesitaba.

Gracias a Dios por ser mi fortaleza y compañero en cada paso de mi vida.

Finalmente, quisiera dedicar un momento especial para mí, por no rendirme, por la constancia, esfuerzo y sacrificio a lo largo de mi vida; por perseverar frente a las adversidades, las noches sin dormir, las lágrimas y el cansancio. No ha sido un camino fácil, pero este trabajo representa con claridad mi fortaleza y dedicación. Hoy, con orgullo y felicidad, puedo decir, lo logré.

Datos grillados y financiamiento

Se agradece a las instituciones que proveen acceso abierto a los conjuntos de datos utilizados en esta investigación. En particular, al Copernicus Climate Change Service (C3S) por los productos ERA5 y ERA5-Land, disponibles a través del Climate Data Store. Este trabajo contiene información modificada del Servicio de Cambio Climático de Copernicus (2025); ni la Comisión Europea ni el ECMWF son responsables del uso que pueda hacerse de dicha información.

También se agradece al NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC) por el acceso a los datos del modelo GLDAS Noah, y al NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center (NSIDC DAAC) por la disponibilidad del producto SMAP L4 Soil Moisture (versión 8). La disponibilidad y libre acceso a estos conjuntos de datos ha sido fundamental para el desarrollo de este trabajo.

Asimismo, se agradece el financiamiento otorgado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) a través de los proyectos:

ANID PCI NSFC190018: "Management of global change impacts on hydrological extremes by coupling remote sensing data and an interdisciplinary modelling approach".

ANID Fondecyt Regular 1212071: "The catchment's memory: understanding how hydrological extremes are modulated by antecedent soil moisture conditions in a warmer climate".

Resumen

La creciente importancia de la humedad del suelo, especialmente en las capas superficial (SSM; 0-10 cm) y de raíces (RZSM; 0-100 cm), radica en su influencia directa sobre la vegetación, los procesos hidrológicos y la ocurrencia de fenómenos climáticos extremos como sequías prolongadas y eventos intensos de precipitación. En Chile, país caracterizado por un marcado gradiente climático latitudinal, resulta especialmente relevante evaluar y monitorear continuamente estas condiciones. Considerando esta necesidad, el presente trabajo tiene como objetivo general el desarrollo de una plataforma web operativa para el monitoreo en tiempo casi real de la humedad de suelo y sus anomalías en Chile continental.

Los productos grillados de humedad de suelo a utilizar en la plataforma web fueron seleccionados en base a la disponibilidad histórica de datos, la cobertura espacio-temporal de los mismos, y la frecuencia de actualización en los servidores de origen. De esta forma, se seleccionaron cuatro productos grillados operacionales que entregan datos volumétricos de humedad del suelo tanto para la zona superficial (0-10 cm) como para distintas profundidades de la zona de raíces (0-100 cm): ERA5 (0,25°, horario, 6 días de latencia), ERA5-Land (0,1°, horario, 6 días de latencia), GLDAS-Noah (0,25°, tri-horario, 4 meses de latencia) y SMAP-L4 (9 km, tri-horario, 2,5 días de latencia). Además, se implementó el cálculo de dos índices estandarizados de humedad de suelo: i) Standardized Soil Moisture Index (SSMI, índice paramétrico basado en la distribución gamma), y ii) Empirical Standardized Soil Moisture Index (ESSMI, índice no paramétrico calculado mediante "Kernel density estimation"). Ambos índices se calcularon con frecuencia diaria y escalas temporales de 1, 3, 6, 12 y 24 meses de agregación temporal.

En primer lugar se implementó un sistema automatizado de descarga de datos volumétricos de humedad del suelo, el cual consulta en los servidores externos correspondientes a cada uno de los productos seleccionados el último dato disponible, para luego proceder a la descarga, pre-procesamiento y almacenamiento en un servidor interno del Observatorio de Recursos Hídricos del Departamento de Ingeniería en Obras Civiles (<https://kutama.ufro.cl>). Posteriormente, los valores volumétricos de humedad de suelo y las anomalías diarias calculadas para distintas escalas temporales fueron visualizadas mediante una plataforma web, la cual fue desarrollada en el ambiente estadístico R utilizando el paquete Shiny.

Los resultados obtenidos para los valores medios anuales de humedad de suelo para el período 2015-2023 reflejan claramente el gradiente climático latitudinal chileno, con valores más altos hacia el sur ($0,30\text{-}0,75\text{ m}^3/\text{m}^3$) y menores hacia el norte ($0,00\text{-}0,20\text{ m}^3/\text{m}^3$). Por otra parte, se observaron diferencias importantes entre los productos evaluados, siendo ERA5 y ERA5-Land los que reportaron consistentemente mayores valores volumétricos de humedad del suelo en comparación con GLDAS-Noah y SMAP-L4.

Finalmente, la utilidad de los datos proporcionados por la plataforma web desarrollada se evaluó utilizando dos casos de estudio, el primero relacionado a un evento de precipitación intenso y el otro a un evento prolongado de sequía. El evento intenso de precipitación, ocurrido en la Cuenca del Río Claro en la región del Maule en agosto de 2023, registró una precipitación acumulada de 791,35 [mm] en 5 días, evidenciando un incremento importante en la humedad del suelo durante el evento, especialmente en la zona de radicular. Este aumento de humedad del suelo precedió al aumento de caudal en el punto de salida de la cuenca por varias horas. Por otro lado, los dos índices de anomalía de humedad de suelo (SSMI y ESSMI), calculados para la Cuenca del Río Petorca en Longotoma, lograron capturar adecuadamente la persistencia de las anomalías negativas que caracterizaron un evento de sequía prolongada que inició en 2010 y finalizó en 2023.

En base a los resultados obtenidos, los valores volumétricos de humedad de suelo son recomendados para monitoreo de eventos de rápida respuesta entre precipitación-humedad-caudal, como eventos de precipitación intensa. En sequías se recomienda utilizar los índices estandarizados SSMI y ESSMI a escala de 3, 6 y 12 meses para analizar la evolución de la sequía a través del suelo.

Finalmente, los valores de humedad y los índices estandarizados diarios para escalas de 1, 3, 6, 12 y 24 meses están disponibles en la plataforma web **Pülliko** (<https://hzambran.shinyapps.io/Pulliko/>), actualizada automáticamente cada día. Esta plataforma web constituye una herramienta innovadora para el monitoreo operacional y continuo de la humedad del suelo y sus anomalías, y será un apoyo clave para investigadores, público general y actores del ámbito hídrico, agrícola y ambiental.

Índice de contenidos

	Página
Agradecimientos	I
Datos grillados y financiamiento	III
Resumen	IV
Índice de tablas	IX
Índice de figuras	X
1. Introducción	1
1.1. Rol de la humedad del suelo	2
1.2. Índices de humedad de suelo	4
1.3. Monitoreo de la humedad de suelo en Chile	6
1.4. Objetivos	7
1.4.1. Objetivo general	7
1.4.2. Objetivos específicos	7
2. Antecedentes generales	8
2.1. Clima de Chile continental	9
2.2. Anomalías de humedad de suelo en Chile continental	10
3. Metodología	12
3.1. Zona de estudio	13
3.2. Casos de estudio	16
3.3. Productos grillados de humedad de suelo	16
3.3.1. ERA5	18
3.3.2. SMAP-L4	19
3.3.3. ERA5-Land	19
3.3.4. GLDAS-Noah	20
3.4. Zonas de suelo	21
3.5. Descarga y procesamiento de datos grillados	22
3.6. Valores volumétricos de humedad de suelo	24
3.7. Índices estandarizados de humedad de suelo	25

3.7.1.	SSMI (índice paramétrico)	30
3.7.2.	ESSMI (índice no paramétrico)	31
3.8.	Clasificación de anomalías de humedad de suelo	32
3.9.	Desarrollo de plataforma web	33
4.	Resultados y discusión	35
4.1.	Valores volumétricos de humedad de suelo	36
4.1.1.	Zona superficial (SSM; 0-10 [cm])	36
4.1.2.	Zona de raíces (RZSM; 0-100 [cm])	38
4.2.	Índices estandarizados de humedad de suelo	40
4.2.1.	Zona superficial (SSM; 0-10 [cm])	40
4.2.2.	Zona de raíces (RZSM; 0-100 [cm])	42
4.3.	Casos de estudio	44
4.3.1.	Respuesta de la humedad del suelo en un evento de precipitación intenso	45
4.3.2.	Monitoreo de las anomalías de humedad del suelo ante eventos de sequía	46
4.4.	Plataforma web: Pülliko	50
4.5.	Discusión	51
5.	Conclusiones	54
	Bibliografía	58
A.	Anexos	77
A.1.	Producto CLSoilMaps	78
A.2.	Productos grillados de humedad de suelo	80
A.2.1.	ERA5	80
A.2.2.	SMAP-L4	81
A.2.3.	ERA5-Land	82
A.2.4.	GLDAS-Noah	83
A.3.	Procedimiento de cálculo del índice paramétrico	84
A.3.1.	Recopilación de datos:	84
A.3.2.	Estimación de la distribución gamma:	84
A.3.3.	Cálculo del valor estandarizado:	84
A.4.	Procedimiento de cálculo del índice no paramétrico	85
A.4.1.	Estimación de KDE con núcleo gaussiano	85
A.4.2.	Selección del Ancho de Banda: Método de Sheather and Jones (1991)	85
A.5.	Valores volumétricos de SSM y RZSM promedio (2000-2023) de GLDAS- Noah, ERA5 y ERA5-Land en Chile continental	87
A.6.	Evento (horario) de precipitación intensa en Cuenca del Río Claro en San Carlos	89
A.7.	Evento (mensual) de sequía en Cuenca del Río Petorca en Longotoma . .	90
A.7.1.	Antecedentes generales	90

A.7.2. Índice estandarizado de humedad de suelo en SSM (2010-2023) .	92
--	----

Índice de tablas

	Página
3.1. Productos grillados de humedad de suelo utilizados en este trabajo. . . .	18
3.2. Clasificación de los valores de SSMI y ESSMI, basado en Agnew (2000). .	33

Índice de figuras

	Página
3.1. Chile Continental. a) Elevación, b) precipitación acumulada anual promedio para el período 1981-2023, datos de ERA5-Land, c) clasificación climática Koppen-Geiger para período 1991-2020 (Beck et al., 2023), d) textura del suelo para la profundidad de 0-5 [cm] (Dinamarca et al., 2023), e) índice de aridez anual promedio para el período 1970-2000 (Trabucco and Zomer, 2019; Zomer et al., 2022).	15
3.2. Representación gráfica de las capas de humedad de suelo consideradas en este trabajo: zona superficial (SSM) y zona de raíces (RZSM).	22
3.3. Esquema del proceso automatizado de descarga diaria de datos NRT desde los servidores de ECMWF, mediante una rutina programada en terminal remota.	23
3.4. Estructura de carpetas y archivos de datos de humedad de suelo.	24
3.5. Esquema metodológico del cálculo de los índices estandarizados.	27
3.6. Opciones de consulta en la plataforma web.	34
4.1. Promedios anuales del SSM en Chile continental para el período 2015-2023, según cuatro productos grillados: GLDAS-Noah, ERA5, ERA5-Land y SMAP-L4.	37
4.2. Promedio diario de RZSM para el período 2015-2023 en Chile continental, estimada a partir de los productos grillados: GLDAS-Noah, ERA5, ERA5-Land y SMAP-L4.	39
4.3. SSMI-12 y ESSMI-12 para los años 2002, 2014, 2015 y 2020 en la SSM de Chile continental. Se muestran los resultados para los productos GLDAS-Noah, ERA5 y ERA5-Land.	41

4.4.	SSMI-12 y ESSMI-12 en la RZSM para los años 2002, 2014, 2015 y 2020, calculados a partir de los productos GLDAS-Noah, ERA5 y ERA5-Land.	43
4.5.	Precipitación (ERA5) vs SSM y RZSM para evento de agosto 2023 en la cuenca de Río Claro en San Carlos.	46
4.6.	SSMI en RZSM para el día 1 del mes a distintas escalas temporales para el período 2010-2023.	47
4.7.	Valores volumétricos promedio de humedad del suelo m^3/m^3 para la SSM y la RZSM en el período 2010-2023.	49
4.8.	Interfaz plataforma web. Se visualizan los valores volumétricos de RZSM para Chile continental con producto grillado de ERA5-Land para el día 06/11/2004 con escala temporal de 1 mes.	50
A.1.	Punto de marchitez permanente (0-200) cm.	78
A.2.	Capacidad de campo (0-200) cm.	79
A.3.	Valores volumétricos de SM promedio del período 2000-2023 de SSM para los productos grillados: GLDAS-Noah, ERA5 y ERA5-Land.	87
A.4.	Valores volumétricos de humedad de suelo promedio del período 2000-2023 de la RZSM para los productos grillados: GLDAS-Noah, ERA5 y ERA5-Land.	88
A.5.	Caudal, precipitación y humedad de suelo (SSM y RZSM) en la cuenca Río Claro en San Carlos.	89
A.6.	Precipitación anual en la Cuenca de Río Petorca para período 1960-2021 (Fuente: https://chi2.ufro.cl/Petorca/).	90
A.7.	Climograma de la Cuenca del Río Petorca en Longotoma. Elaborado a partir de los datos CR2METv2.5 (Fuente: https://chi2.ufro.cl/Petorca/).	91
A.8.	SSMI en SSM para el día 01 de cada mes en la cuenca del Río Petorca en Longotoma.	92

CAPÍTULO 1

Introducción

1.1. Rol de la humedad del suelo

La humedad del suelo actúa como un nexo entre la atmósfera, el suelo y la vegetación dentro del ciclo hidrológico, regulando procesos hidrológicos, ecológicos y meteorológicos. Además, la distribución espacio-temporal de la humedad del suelo resulta clave en la dinámica de intercambio de masa y energía entre la superficie terrestre y la atmósfera (Islam and Engman, 1996; Brocca et al., 2009; Han et al., 2021). En este sentido, la medición de humedad del suelo a distintas escalas temporales y profundidades (Teuling et al., 2006; Núñez Ibarra, 2024) se vuelve fundamental para comprender fenómenos extremos como inundaciones, olas de calor y frío, así como precipitaciones intensas y sequías prolongadas, cuya frecuencia e intensidad se espera que aumenten debido al cambio climático (Winn et al., 2011). En Chile, estos fenómenos no han sido ajenos, destacando la sequía prolongada que afecta a la zona centro-sur del país desde el año 2010, así como eventos de inundación en la misma región (Contreras and Escarriaza, 2020).

Se ha demostrado la existencia de un vínculo entre la humedad del suelo y las precipitaciones, lo que revela un proceso de retroalimentación suelo-atmósfera (Zheng et al., 2023). En particular, se ha observado que las anomalías en la humedad del suelo pueden influir en los patrones de precipitación, lo cual ha sido respaldado tanto por datos recopilados (e.g., Bolin, 1959; Ruiz-Barradas and Nigam, 2006; Dirmeyer et al., 2006; Zhang et al., 2008b; Mei and Wang, 2011, 2012) como por modelos numéricos (e.g., Guo et al., 2006; Kim and Hong, 2007; Koster et al., 2006, 2004; Seneviratne et al., 2006; Zhang et al., 2008a; Jaeger and Seneviratne, 2011; Leung et al., 2011; Zhang et al., 2011). La mayoría de estos estudios evidencian una retroalimentación positiva entre la humedad del suelo y la precipitación; es decir, si el suelo presenta condiciones más secas (o más húmedas), esto conlleva a la disminución (o aumento) de la precipitación, reforzando las anomalías iniciales de humedad del suelo (Liu et al., 2013). Sin embargo, algunos estudios reportan una retroalimentación negativa, la cual depende principalmente de la distribución espacial de las diferentes regiones (Yang et al., 2018; Graf et al., 2021; Abbott and Cronin, 2023).

Uno de los fenómenos hidrológicos más sensibles a las condiciones de humedad del suelo son las **inundaciones repentinas** (*flash floods*) (Massari et al., 2014, 2015; Brocca et al., 2017; Zheng et al., 2023; Ortenzi et al., 2025), sobre las cuales Staudinger et al.

(2025) enfatiza la importancia de la humedad antecedente del suelo en la escala espacial e intensidad de las inundaciones resultantes. Estos eventos se relacionan directamente con la intensidad de la tormenta y con la capacidad de infiltración del suelo, la cual depende del nivel de humedad existente. Cuando el suelo se encuentra saturado, la infiltración disminuye de manera importante, generando una mayor escorrentía superficial en eventos de tormenta intensa (Posner et al., 2014; Grillakis et al., 2016). En otras palabras, la humedad del suelo es uno de los elementos clave para determinar si una tormenta específica provocará o no una inundación repentina (Massari et al., 2014; Brocca et al., 2017; Ortenzi et al., 2025), debido a la dependencia no lineal entre la precipitación y la escorrentía (Zehe and Blöschl, 2004; Hlavcova et al., 2005; Komma et al., 2007; Vivoni et al., 2007). Entre los factores que influyen en las condiciones de humedad del suelo, y por ende en el riesgo de inundaciones repentinas, se incluyen el uso de la tierra, la vegetación y las características del suelo (e.g., granulometría, estructura interna y composición química) (Quadros and Zimmer, 2018; Wasko and Nathan, 2019; Furtak and Wolińska, 2023).

En el otro extremo, la **sequía de humedad del suelo** (o también llamada sequía agrícola) es un período sostenido y espacialmente extenso en el que la disponibilidad de agua en el suelo (principalmente en la zona de raíces) se encuentra por debajo de sus niveles promedio (Europea, 2007; Van Loon, 2015; Tallaksen and Van Lanen, 2023). Este des-balance es el resultado del equilibrio entre el déficit de precipitación y los procesos de evaporación, transpiración de la vegetación, escorrentía hacia ríos y lagos, y drenaje hacia el subsuelo (Zambrano et al., 2017; Berg and Sheffield, 2018). Estos efectos se manifiestan gradualmente en la humedad del suelo y, posteriormente, en el caudal de los ríos, los niveles de lagos y las aguas subterráneas. Lo anterior impacta negativamente los recursos hídricos, los ecosistemas forestales y la producción agrícola (Vicente-Serrano et al., 2010; Trenberth et al., 2014; FAO, 2019; IPCC, 2022).

En este sentido, Chile central (32°S-37°S) inició una “megasequía” en 2010, la cual se caracterizó por una disminución de las precipitaciones medias anuales de hasta un 40 % y un aumento en la temperatura media anual del aire (Garreaud et al., 2017, 2020; Shaw et al., 2021).

1.2. Índices de humedad de suelo

Para el monitoreo y la evaluación de la sequía de humedad del suelo se utilizan índices de sequía, los cuales proporcionan una medida de las condiciones de humedad actuales respecto a un período de referencia, capturando eficazmente las variaciones espacio-temporales de la humedad del suelo (Palagiri and Pal, 2024). Entre los más tradicionales se encuentran: Crop Moisture Index (CMI; Palmer, 1968), Soil Moisture Deficit Index (SMDI; Narasimhan and Srinivasan, 2005), Soil Moisture Index (SMI; Sridhar et al., 2008) y Soil Water Deficit Index (SWDI; Martínez-Fernández et al., 2015). Además, Svoboda et al. (2012) explican que el Standardized Precipitation Index (SPI; McKee et al., 1993) puede utilizarse para monitorear las condiciones de sequía de humedad del suelo para escalas temporales de 3, 6 y 12 meses (Ariyanto et al., 2020).

En la última década, se han desarrollado índices más integradores que combinan múltiples tipos de datos, como vegetación, temperatura y radiación, con el objetivo de representar con mayor precisión las condiciones de sequía. Ejemplos de ello son: Temperature-Vegetation-Soil Moisture Drought Index (TVMDI; Amani et al., 2017), Temperature-Vegetation Precipitation Dryness Index (TVPDI; Wei et al., 2020), Temperature-Vegetation-Shortwave Infrared Reflectance Dryness Index (TVSDI; Xu et al., 2022) y Temperature-SIF-Water Balance Dryness Index (TSWDI; Liu et al., 2023).

A pesar de la abundancia de enfoques, muchos de estos índices presentan limitaciones en su aplicabilidad a datos observados de humedad del suelo. A continuación, se discute brevemente cómo se comparan entre sí los distintos índices comúnmente utilizadas:

1. *Soil Moisture Index* (SMI; Sridhar et al., 2008): Calcula la anomalía de humedad relativa con respecto al punto de marchitez permanente (PWP) y la capacidad de campo (FC), expresando la anomalía del estado hídrico en una escala que va desde -5 (sequía extrema) hasta 0 (condición normal). Utiliza datos diarios de humedad del suelo y parámetros edáficos locales. Su principal ventaja es la simplicidad de cálculo y la sensibilidad para identificar déficit hídrico. Sin embargo, su diseño impide detectar condiciones húmedas (valores positivos). Este mismo índice es propuesto por Grillakis (2019), con la particularidad que SMI es basado en tele-detección, y depende de la calidad de las observaciones remotas y la necesidad de parámetros edáficos calibrados.

2. *Standardized Soil Moisture Index* (SSMI; Sheffield et al., 2004): Estima desviaciones estandarizadas mediante el ajuste de una distribución gamma a datos observados diarios de humedad del suelo, sin requerir información auxiliar. Es sensible a eventos extremos, pero su desempeño depende de una adecuada estimación de los parámetros estadísticos de una función de densidad de probabilidad.

Con el mismo nombre denomina Xu et al. (2018) el índice SSI, el cual involucra la media y la desviación estándar de los datos de NLDAS, para cada día de SMAP. Este índice busca explicar cuántas desviaciones estándar se desvía la humedad del suelo de la humedad media histórica del suelo y, por lo tanto, identifica las sequías como valores atípicos estadísticos en la serie temporal. Ofrece una evaluación probabilística robusta, pero depende de la calidad de los datos modelados y sugiere calibración regional. Fusiona los datos de humedad del suelo satelitales únicamente de Soil Moisture Active Passive (SMAP; Entekhabi et al., 2014) con la salida del modelo Noah Land Surface Model (LSM), los datos de North American Land Data Assimilation System (NLDAS; Xia et al., 2015).

3. *Standardized Precipitation Index* (SPI; Sims et al., 2002): Derivado exclusivamente de series de precipitación acumulada, este índice identifica anomalías meteorológicas. Aunque se usa para inferir sequías del suelo a escala mensual, no evalúa directamente la humedad del suelo. Ariyanto et al. (2020) utiliza escalas temporales de 3, 6 y 12 meses para estimar humedad de suelo y U.S. Drought Monitor (<https://droughtmonitor.unl.edu/About/AbouttheData/DSCI.aspx>) utiliza escalas temporales de 1, 3, y 6 meses para identificar sequías de humedad de suelo.
4. *Empirical Standardized Soil Moisture Index* (ESSMI; Carrão et al., 2016): Evalúa probabilísticamente anomalías de humedad de suelo con base en distribuciones empíricas históricas. Calculado mediante acumulaciones móviles de humedad del suelo y estimación de densidad con Kernel Density Estimation (KDE). Su formulación atenúa la sensibilidad a eventos recientes, particularmente en escalas de tiempo cortas (Hobbins et al., 2016).

Por ello, en este estudio se seleccionaron dos índices ampliamente utilizados y que necesitan exclusivamente datos de humedad de suelo para ser calculados: Standardized Soil Moisture Index (SSMI; Sheffield et al., 2004) y Empirical Standardized Soil Moisture Index (ESSMI; Sheffield et al., 2004), considerando tanto su robustez metodológica como su aplicabilidad operativa.

1.3. Monitoreo de la humedad de suelo en Chile

El monitoreo de las condiciones de humedad del suelo en Chile es relativamente reciente, siendo abordado solo a partir de 2022. La Dirección Meteorológica de Chile posee un monitor de sequía mensual que involucra distintos índices (<https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/requerimiento/producto/RE1029>), como el Índice estandarizado de Precipitación (SPI; McKee et al., 1993), Índice estandarizado de Temperatura (STI; Rouse Jr et al., 1974), Índice estandarizado de Humedad del Suelo (SS-MI; Sheffield et al., 2004), Índice estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI; Vicente-Serrano et al., 2010) e Índice de Vegetación (SNDVI; Pettorelli et al., 2005). Además, la Pontificia Universidad Católica de Chile también cuenta con una plataforma de monitoreo de sequía (<https://iniciativasequia.uc.cl>) en la cual incluye indicadores de sequía como el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI; McKee et al., 1993), Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI; Vicente-Serrano et al., 2010) e Índice de Caudales Estandarizado (SSI; Vicente-Serrano et al., 2010).

Por otra parte, el Observatorio de Sequía para la Agricultura y la Biodiversidad de Chile de la Universidad Mayor, a través de su plataforma “ODES-Unidades” (<https://odes-chile.org/app/unidades>), también cuenta con una plataforma web que permite visualizar índices de sequía **mensual**, tales como: Índice Estandarizado de Precipitación (SPI; McKee et al., 1993), Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI; Vicente-Serrano et al., 2010), Índice de Demanda Evaporativa de Sequía (EDDI; Hobbins et al., 2004), Índice Estandarizado de la Humedad del Suelo a 1[m] de Profundidad Acumulada (zcSM; Hobbins et al., 2004), Anomalía Estandarizada de la Vegetación (zcNDVI; Hobbins et al., 2004) y el Índice Estandarizado de Agua Equivalente de Nieve (SWEI; Huning and AghaKouchak, 2020).

A partir de lo anterior, es posible concluir que actualmente no existe en Chile una plataforma de monitoreo que entregue información de humedad del suelo en tiempo real, dado que las plataformas disponibles presentan - en el mejor de los casos - una actualización mensual. Además, estas herramientas no proporcionan datos volumétricos de humedad del suelo derivados de múltiples fuentes (sistemas de asimilación y distintos modelos hidrológicos), ni tampoco ofrecen índices diarios para evaluar las anomalías de humedad del suelo. Esta limitación restringe significativamente la capacidad de rea-

lizar un seguimiento preciso y oportuno del estado de la humedad de suelo superficial y en la zona de raíces, dificultando un análisis robusto de eventos extremos tales como precipitaciones intensas o sequías repentinas (*flash droughts*).

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

- Desarrollar un prototipo de plataforma web que permita el monitoreo en tiempo (casi) real de humedad del suelo y sus anomalías para Chile continental.

1.4.2. Objetivos específicos

- **OE1:** Evaluar distintos productos grillados operacionales de humedad del suelo, para visualizar valores volumétricos de humedad de suelo m^3/m^3 y sus anomalías, tanto en la zona superficial como en la zona de raíces del suelo y seleccionar los índices estandarizados más adecuados para caracterizar anomalías.
- **OE2:** Crear una plataforma web que permita la visualización de los valores volumétricos de humedad de suelo y sus anomalías, utilizando los índices estandarizados diarios de humedad del suelo en Chile continental, permitiendo su consulta a escalas temporales de 1, 3, 6, 12 y 24 meses.
- **OE3:** Analizar los valores volumétricos de humedad de suelo y sus anomalías en dos casos de estudio, uno relacionado a evento de precipitaciones intensas y el otro representativo de un evento de sequía.

CAPÍTULO 2

Antecedentes generales

2.1. Clima de Chile continental

Chile presenta una notable diversidad climática a lo largo de su territorio. Según Beck et al. (2023) se han identificado 13 tipos de climas en el territorio continental chileno, para el período 1991-2020 con resolución de 0,1°. Esta variedad climática convierte al país en un territorio especialmente sensible a las anomalías en los patrones del ciclo hidrológico (e.g., su variabilidad climática y geográfica, dependencia de recursos hídricos limitados y estacionales, sensibilidad a fenómenos climáticos extremos), las cuales tienen efectos directos sobre las condiciones del suelo.

Las variaciones en la precipitación en Chile están influenciadas por la circulación general de la atmósfera, en particular por la ocurrencia del fenómeno El Niño–Southern Oscillation (ENSO; Daniels and Veblen, 2000; Montecinos and Aceituno, 2003; Campos and Rondanelli, 2023. Este fenómeno corresponde a una anomalía oceánica-atmosférica que afecta tanto las corrientes marinas en el sector del Pacífico Sur ecuatorial como el clima de Chile. Su manifestación está asociada a un debilitamiento de los vientos alisios y a cambios en el régimen térmico del océano, dando lugar a la ocurrencia de anomalías climáticas (Vargas et al., 2007; Montecinos and Gomez, 2010). En consecuencia, en Chile ENSO trae años más húmedos cuando prevalece el fenómeno de El Niño (fase cálida) y una mayor probabilidad de tener años más secos cuando prevalece el fenómeno de La Niña (fase fría), en Chile (Stöwhas Borghetti, 2017; Cai et al., 2020).

La relación entre ENSO, *Pacific Decadal Oscillation* (PDO; Davis, 1976; Mantua et al., 1997; Mantua and Hare, 2002; Newman et al., 2016) y *Southern Annular Mode* (SAM; Gillett et al., 2006; Fogt and Marshall, 2020) es clave para comprender la variabilidad hidrológica y climática en Chile. Estos fenómenos interactúan entre sí, regulando su efecto sobre el régimen de precipitaciones, caudales y disponibilidad hídrica (Vera et al., 2006; Garreaud et al., 2009).

La PDO, es una oscilación de largo plazo (20-30 años), que afecta la variabilidad climática en el Pacífico Norte e influye en los patrones de circulación atmosférica que se extienden hasta Sudamérica (Goodrich, 2007; Lou et al., 2019). La PDO modula los impactos del ENSO en los climas regionales, lo que es crucial para comprender los ciclos hidrológicos en Chile. La interacción entre el ENSO y la PDO dicta el momento y la intensidad de los eventos de precipitación, los que pueden provocar cambios impor-

tantes en la dinámica del suelo y las condiciones ecológicas en la zona central de Chile (Frugone et al., 2020). Por otro lado, la relación entre ENSO y SAM modula la distribución espacial de las precipitaciones. El SAM actúa en el hemisferio sur y afecta el desplazamiento de las corrientes de viento en las latitudes medias y altas (Fogt et al., 2011). Un SAM en su fase negativa, que desplaza las corrientes hacia el norte, puede aumentar las precipitaciones durante eventos de ENSO, intensificando las lluvias y el riesgo de inundaciones en Chile Central y Austral. En contraste, un SAM positivo, que desplaza las corrientes hacia el sur, puede atenuar las precipitaciones durante la fase fría del ENSO, agravando las condiciones de sequía en estas zonas del país (Clem and Fogt, 2013; Gong et al., 2013; Garreaud Salazar, 2018; Dätwyler et al., 2020).

2.2. Anomalías de humedad de suelo en Chile continental

Dentro de las anomalías climáticas que han afectado a Chile continental, se encuentra un período de sequía en la zona central del país, iniciado en la década de 2010. La llamada ‘megasequía’, caracterizada por un aumento en la temperatura media anual del aire de hasta 0.8°C, una reducción de hasta el 80 % de precipitaciones y un aumento en la demanda de evaporación de la atmósfera (Fuentealba et al., 2021; Baez-Villanueva et al., 2024). Esta megasequía trajo consigo una disminución sustancial de los recursos hídricos superficiales, la humedad del suelo y las aguas subterráneas, causando múltiples impactos ecológicos, sociales y económicos (Garreaud et al., 2017).

Según las proyecciones de cambio climático actualmente disponibles (Mardones and Garreaud, 2020; Almazroui et al., 2021; Salazar et al., 2024), se espera que Chile experimente un aumento en la frecuencia de las sequías debido al aumento de la temperatura en todo el país, así como también se espera una reducción de las precipitaciones en las zonas centro y sur (Magrin et al., 2014; Vicente-Serrano et al., 2022). Esta tendencia puede conducir a una intensificación de la aridez existente en el norte de Chile y su avance hacia el sur, aumentando el riesgo de escasez de agua en la zona central (Meza et al., 2010).

En el otro extremo, las inundaciones repentinas son generadas cuando en tormentas específicas, el volumen de las precipitaciones puede superar la capacidad de retención del suelo, en donde la magnitud del impacto depende de las condiciones actuales de la

cuenca, como el contenido previo de humedad del suelo. En cambio, cuando durante un evento de precipitación el suelo no ha superado la capacidad máxima de retención de agua, el suelo tiene la capacidad de infiltrar más agua de lluvia, lo que reduce la escorrentía superficial (Fahey and Payne, 2017; Soulsby et al., 2017; Bathurst et al., 2020, 2022). Para Chile, las inundaciones han sido uno de los desastres más frecuentes en los últimos años, causando más de 13.000 víctimas y 200 muertos en la última década (Bronfman et al., 2024).

Por lo tanto, la humedad del suelo regula la distribución de los flujos de masa y energía entre la tierra y la atmósfera (Brocca et al., 2009; Seneviratne et al., 2010; Bao et al., 2018). En particular, la humedad de suelo modula la distribución de la precipitación en infiltración, almacenamiento, evaporación y escorrentía (Brocca et al., 2009, 2017). Entonces, la humedad de suelo desempeña un papel crucial en la modelación de eventos precipitación-escorrentía, el monitoreo de sequías y la predicción numérica del clima. Una evaluación precisa de la humedad del suelo, tanto superficial (SSM; 0-5 [cm]) como de la zona de raíces (RZSM; 0-100 [cm]), a gran escala espacio-temporal y con una rápida actualización temporal, es importante para el país. Sin embargo, los datos *in situ* existentes de humedad del suelo presentan una cobertura espacial muy baja para permitir una adecuada caracterización de las variaciones espacio-temporales de la humedad del suelo (Deng et al., 2019; Núñez Ibarra, 2024).

CAPÍTULO 3

Metodología

3.1. Zona de estudio

Chile continental ($17,5^{\circ}$ - 56° S; 76° - 66° O), ubicado en el suroeste de América del Sur, abarca una extensión latitudinal de 4.270 [km] y una superficie de 756.096 [km²] (Dirección General de Aguas, 2020). Sus elevaciones varían desde el nivel del mar hasta los 6.893 [m s.n.m] en el Volcán Ojos del Salado (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2020). La extensa longitud territorial y su diversidad topográfica dan lugar a una gran variabilidad climática, influenciada por la presencia de la cordillera de los Andes al este y el océano Pacífico al oeste (Garreaud et al., 2017).

Esta diversidad geográfica también se refleja en la cobertura de suelo, desde desiertos áridos en el norte, valles agrícolas en la zona central, hasta bosques templados en el sur, y determina diferencias significativas en los patrones de precipitación y disponibilidad hídrica (Donoso Zegers et al., 1993; Vicuña et al., 2021). Las cuencas hidrográficas presentan comportamientos hidrológicos muy distintos según su ubicación (Corporación Nacional Forestal, 2021; López et al., 2021).

La variabilidad longitudinal de Chile queda expuesta en la Figura 3.1, donde se presentan la elevación (a), la precipitación acumulada media anual (b), la clasificación climática (c), la textura de suelos en los primeros 5 [cm] (d), y el Índice de Aridez (e).

A su vez, la precipitación acumulada anual (Figura 3.1b) muestra un fuerte gradiente latitudinal: en el Norte Grande, los valores son inferiores a 100 [mm/año], mientras que en sectores del extremo sur pueden superar los 5.000 [mm/año].

La textura del suelo, representada en la Figura 3.1d, proviene del producto CLSoil-Maps (Dinamarca et al., 2023), descrito en el Anexo A.1, y clasifica los suelos en función de la proporción de arena, limo y arcilla. En el Desierto de Atacama y en el sector denominado punta seca de los Andes centrales, los suelos franco-arenosos ('sandy loam', SaLo) son dominantes, pero los suelos francos ('loamy', Lo) son más frecuentes, especialmente en áreas alrededor de salares y humedales. En la zona central prevalecen suelos areno-arcillosos ('sandy clay', SaCl) y francos ('loamy', Lo). En la Cordillera de Los Andes, suelo SaLo y precordillera con suelo franco-arcilloso ('clay loam', ClLo) y franco-limoso ('silty loam', SiLo); mientras que en el sur se observan texturas más finas, con suelos como limoso franco-arcilloso ('silty clay loam', SiClLo) y SiLo. La zona

austral cambia completamente de textura, a suelos más gruesos como lo son franco-arenoso ('sandy loam', SaLo) y Lo.

El Índice de Aridez ($AI = P/PET$), presentado en la Figura 3.1e, refuerza este contraste climático. El norte se caracteriza por condiciones hiperáridas y áridas ($AI < 0,2$), la zona central por condiciones semiáridas a subhúmedas ($0,20 < AI < 0,65$) y el sur por un régimen húmedo a muy húmedo ($AI > 0,65$), reflejando el marcado gradiente climático longitudinal del país.

A continuación se resumen algunos antecedentes importantes sobre clima y precipitaciones en las tres zonas de Chile continental.

- **Zona norte:** Incluye las regiones de Arica y Parinacota hasta Coquimbo (17° - 30° S). Predomina un clima árido y desértico, con precipitaciones anuales inferiores a 50 [mm] en el Desierto de Atacama, considerado uno de los lugares más secos del mundo (Houston and Hartley, 2003). Las precipitaciones se concentran principalmente en eventos extremos asociados al invierno altiplánico (Garreaud et al., 2003).
- **Zona centro:** Desde Valparaíso hasta el Biobío (30° - 38° S), se presenta un clima mediterráneo, con estaciones bien marcadas y precipitaciones anuales que varían entre 300 y 800 [mm], concentradas en invierno (Montecinos and Aceituno, 2003). Esta región es especialmente sensible a eventos de sequía, como la megasequía iniciada en 2010, la cual redujo de manera importante la disponibilidad hídrica (Garreaud et al., 2017).
- **Zona sur:** Desde La Araucanía hasta la Región de Los Lagos (38° - 44° S), el clima es templado lluvioso, con precipitaciones anuales que superan los 2000 [mm] en algunas zonas cordilleranas (Viale and Garreaud, 2015). Más al sur, en la Patagonia, se presenta un clima frío con alta humedad y precipitaciones predominantemente nivales (Masiokas et al., 2020).

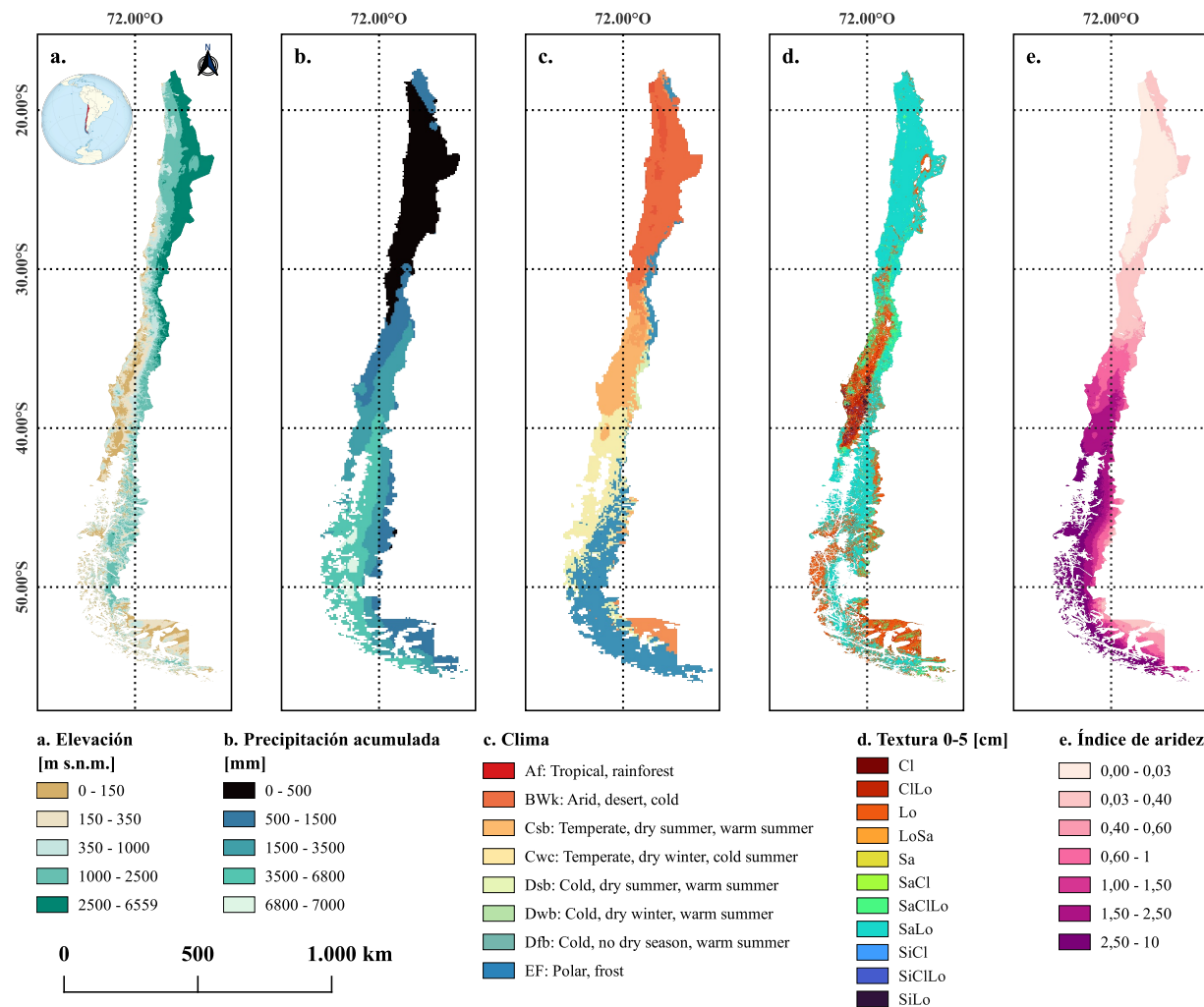


Figura 3.1: Chile Continental. a) Elevación, b) precipitación acumulada anual promedio para el período 1981-2023, datos de ERA5-Land, c) clasificación climática Köppen-Geiger para período 1991-2020 (Beck et al., 2023), d) textura del suelo para la profundidad de 0-5 [cm] (Dinamarca et al., 2023), e) índice de aridez anual promedio para el período 1970-2000 (Trabucco and Zomer, 2019; Zomer et al., 2022).

3.2. Casos de estudio

Para el análisis espacial de la humedad de suelo a escala nacional, se definieron dos casos de estudio, con el objetivo de describir su comportamiento ante situaciones hidrológicas extremas en distintas regiones del país; i) un evento de tormenta intensa y ii) un evento de sequía.

El primer caso de estudio corresponde a la Cuenca del Río Claro en San Carlos (Región del Maule), una región donde se ha registrado un aumento en la frecuencia de eventos de precipitación intensa asociados a sistemas frontales (Viale and Garreaud, 2015; Muñoz et al., 2020). El evento en cuestión inició el 18 de agosto de 2023 y tuvo una duración de 5 días. Para este caso de estudio se involucra el análisis de valores volumétricos de SSM/RZSM y de anomalías positivas de humedad de suelo relacionadas con excesos de agua en el perfil de suelo.

El segundo caso de estudio corresponde a un evento intenso de sequía que afectó a la Cuenca del Río Petorca en Longotoma (Región de Valparaíso). El objetivo de utilizar esta cuenca es analizar anomalías negativas de humedad de suelo (sequías) a través del cálculo de índices estandarizados. El período de años considerado para la evaluación de este caso de estudio es 2010-2023.

3.3. Productos grillados de humedad de suelo

En las últimas décadas, el avance de los sistemas de observación terrestre y la modelación numérica ha impulsado la generación de productos grillados de variables hidrológicas, como precipitación, evapotranspiración, contenido de agua en el suelo, caudal superficial, entre otras (Abatzoglou et al., 2018; Sujud and Jaafar, 2022; Gerdenier et al., 2023; Zhang et al., 2024; Miralles et al., 2025). Estos productos, generados a partir de reanálisis, modelos de superficie terrestre o datos satelitales, ofrecen una cobertura espacial continua y una alta resolución temporal, lo que permite superar las limitaciones de los registros in situ, especialmente en regiones con escaso número de estaciones. En particular, la humedad del suelo, puede ser estimada mediante estos productos con mayor consistencia y frecuencia que las mediciones tradicionales (e.g., Beck et al., 2021). Gracias a su cobertura global, los productos grillados se posicionan como una valiosa alternativa para el análisis espacial y temporal de la humedad del

suelo, permitiendo abordar problemáticas complejas como la detección de anomalías y el monitoreo de sequías. Los productos grillados de humedad del suelo han sido divididos en tres grandes categorías: productos solo satelitales, productos de re-análisis y productos de modelos sin asimilación.

Entre los productos de humedad de suelo basados en misiones satelitales destacan: Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 (AMSR2; Parinussa et al., 2015), Advanced Scatterometer (ASCAT; Wagner et al., 2013), Soil Moisture Active Passive (SMAP; Entekhabi et al., 2010) Enhanced Level 3 (SMAPL3E; Chan, 2016), Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS; Kerr et al., 2010) y European Space Agency's Climate Change Initiative for Soil Moisture (ESA CCI SM; Dorigo et al., 2017).

Luego, entre los productos de humedad de suelo que utilizan asimilación de datos, se encuentran: ERA5 (Hersbach et al., 2020), Global Land Evaporation Amsterdam Model (GLEAM; Miralles et al., 2025) y Soil Moisture Active and Passive Level-4 (SMAP-L4; Reichle et al., 2018).

Finalmente, dentro de los modelos sin asimilación directa de humedad del suelo destacan: ERA5-Land (Muñoz-Sabater et al., 2021), Global Land Data Assimilation System (GLDAS-Noah; Rodell et al., 2004) y Variable Infiltration Capacity Princeton Global Forcings (VIC-PGF; He et al., 2020).

En cuanto a la extensión espacial, los datos seleccionados debían abarcar la totalidad de Chile continental. Respecto a la extensión temporal, se estableció como criterio que los datos debían contar con un registro histórico de al menos 30 años, conforme a la recomendación de la World Meteorological Organization (1983). Sin embargo, excepcionalmente se aceptó la inclusión del producto GLDAS-Noah, que dispone de un registro de sólo 23 años, dada su relevancia para el cálculo de los índices estandarizados de humedad del suelo. Finalmente, se consideró que los productos seleccionados debían tener una latencia de actualización inferior a una semana y contar con la alta resolución espacial.

De esta forma y basado en estudios recientes (Núñez Ibarra, 2024; Zambrano-Bigiarini et al., 2025), se seleccionaron los productos del *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF): ERA5 (Hersbach et al., 2020) y ERA5-Land (Muñoz-Sabater et al.,

2021), así como los productos de la *National Aeronautics and Space Administration* NASA: GLDAS-Noah (Rodell et al., 2004) y SMAP-L4 (Reichle et al., 2017). La incorporación de SMAP-L4 se justifica por su utilidad para obtener valores volumétricos de SSM/RZSM. El detalle de cada modelo para los productos grillados de humedad de suelo se encuentra en el Anexo A.2.

La selección de los productos se basó en criterios que incluyen: acceso gratuito (datos de libre acceso), cobertura espacial, extensión temporal, latencia de actualización y profundidad del suelo representada. La Tabla 3.1 resume las principales características de los productos de humedad de suelo utilizados en este trabajo.

Tabla 3.1: Productos grillados de humedad de suelo utilizados en este trabajo.

Asimilación de datos	Producto	Resolución espacio-temporal	Período de datos	Profundidad de cada capa [cm]
Sí	ERA5	0,25°; horario	1940 - presente	0-7, 7-28, 28-100, 100-289
	SMAP-L4	9 km; tri-horario	2015 - presente	0-5, 0-100
No	ERA5-Land	0,1°; horario	1950 - presente	0-7, 7-28, 28-100, 100-289
	GLDAS-Noah	0,25°; tri-horario	2000 - presente	0-10, 10-40, 40-100, 100-200

3.3.1. ERA5

ERA5 es un producto grillado de reanálisis atmosférico desarrollado por el ECMWF, que proporciona datos diarios desde 1940 hasta el presente con una latencia de cinco días. La humedad del suelo es simulada mediante el modelo H-TESSEL, que integra condiciones atmosféricas cercanas a la superficie y utiliza la ecuación de Richards para modelar el flujo vertical de agua en cuatro capas del suelo. Este modelo considera propiedades edáficas y de cobertura terrestre a partir de bases de datos globales, y no contempla el flujo lateral entre celdas. Además, ERA5 mejora la representación del contenido hídrico ajustando variables como la temperatura y la humedad relativa a 2 metros mediante un análisis acoplado, lo que permite una estimación más precisa de

la humedad del suelo.

ERA5 posee una resolución de grilla de $0,25^\circ$, aproximado 25 [km] en el Ecuador. En el caso del contenido volumétrico de agua en el suelo, se discretiza la columna de suelo en cuatro capas de suelo: 0-7, 7-28, 28-100 y 100-289 [cm] en unidades de m^3/m^3 a nivel global. El sitio para la descarga de los datos del producto es: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels?tab=download>.

3.3.2. SMAP-L4

El producto SMAP-L4 de la NASA entrega estimaciones grilladas de humedad del suelo en la zona de raíces (0–100 cm) mediante la integración de observaciones satelitales de microondas superficiales con modelos numéricos dentro del sistema GEOS-5 LDAS. Utiliza el modelo CLSM forzado con datos meteorológicos del GEOS-5 para simular procesos terrestres, y aplica un filtro de Kalman de conjunto (EnKF) que actualiza las simulaciones cada tres horas incorporando datos como la temperatura de brillo de SMAP. Además, ajusta las precipitaciones con datos CPCU y GPCPv2.2, e incorpora información edáfica y de cobertura terrestre desde bases globales. Este enfoque permite transformar observaciones superficiales en estimaciones profundas y continuas, útiles para monitoreo climático, agrícola e hidrológico.

SMAP-L4 proporciona estimaciones globales, cada 3 horas, con una resolución espacial de 9 [km] para SSM (0-5 [cm]) y RZSM (0-100 [cm]), con una latencia media de 2,5 días desde marzo de 2015 hasta la actualidad. El sitio para descarga de los datos es: <https://nsidc.org/data/data-access-tool/SPL4SMAU/versions/8>.

3.3.3. ERA5-Land

ERA5-Land es un reanálisis climático especializado en la superficie terrestre, derivado de ERA5 pero con mayor resolución espacial y sin estar acoplado directamente al modelo atmosférico del ECMWF. Utiliza el modelo H-TESSEL para simular variables hidrológicas como la humedad del suelo y la escorrentía, forzado únicamente con campos meteorológicos bajos de ERA5. Al prescindir de la asimilación directa de datos atmosféricos, sus simulaciones pueden actualizarse más rápidamente, lo que lo convierte en un producto eficiente y detallado para el monitoreo de condiciones hidrológicas superficiales.

ERA5-Land es entregado en una resolución temporal horaria desde 1950 hasta la actualidad y con una resolución espacial de $0,1^\circ$, con una latencia de actualización de datos de 6 días. La columna de suelo de ERA5-Land se discretiza en las mismas cuatro capas de suelo que ERA5: 0-7, 7-28, 28-100 y 100-289 [cm] en unidades de m^3/m^3 a nivel global. El sitio para la descarga de los datos es: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-land?tab=download#manage-licences>.

3.3.4. GLDAS-Noah

GLDAS-Noah v2.1 es un producto generado por el sistema global de asimilación de datos terrestres GLDAS, diseñado para estimar estados y flujos de la superficie terrestre mediante modelos hidrológicos y datos observacionales. Aunque esta versión no incluye asimilación de datos, combina observaciones satelitales y terrestres con el modelo Noah desde el año 2000, ofreciendo información útil sobre la humedad del suelo. Sus productos se generan en dos flujos: uno temprano, con menor latencia (1,5 meses), y otro principal, que incorpora datos ajustados de precipitación con una latencia de hasta 4 meses. Esta estructura permite entregar datos operativos mientras se garantiza una versión corregida a posteriori.

La resolución temporal del producto es tri-horaria, con una resolución espacial de $0,25^\circ$. Además, considera cuatro capas de suelo; 0-10, 10-40, 40-100 y 100-200 [cm] en unidades de $[kg/m^2]$ a nivel global (Xing et al., 2021). Entonces como este producto mide la humedad del suelo en unidades de kilogramo por metro cuadrado de suelo en espesores variables es necesario realizar una transformación de unidades, de $[kg/m^2]$ a m^3/m^3 . La Ecuación 3.1 realiza esta conversión de unidades (Xu et al., 2018; Center, 2025).

$$\alpha = \frac{SM_n}{\rho * e_n} \quad (3.1)$$

Donde α representa el contenido volumétrico de agua en el suelo m^3/m^3 ; SM_n representa el valor original de la humedad del suelo $[kg/m^2]$; ρ es la densidad del agua, que se considera $1.000 [kg/m^3]$; y e_n es el espesor del estrato de suelo [m] donde se ha estimado el valor de la humedad de suelo SM_n .

El sitio de descarga de los datos es: https://hydro1.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/GLDAS/GLDAS_NOAH025_3H.2.1/.

3.4. Zonas de suelo

Cálculo de SSM

El espesor de la capa superficial de humedad del suelo (SSM) es diferente entre los productos grillados considerados. Esta zona superficial (SSM) se estimó en 0-5 [cm] para SMAP-L4, 0-7 [cm] para ERA5-Land y ERA5, y 0-10 [cm] para GLDAS-Noah. En la Figura 3.2 se visualiza que la profundidad considerada para SSM es 0 a 10 [cm], aun cuando hay productos que no tienen esa profundidad en su capa superficial.

Cálculo de RZSM

Debido a que el producto SMAP-L4 proporciona la humedad del suelo en la zona de raíces (RZSM) de 0 a 100 [cm], mientras que ERA5-Land, ERA5 y GLDAS-Noah proporcionan la RZSM en diferentes capas de suelo, la RZSM fue calculada en una única capa de suelo para todos los productos (0-100 [cm]). Por lo tanto, el RZSM se calcula utilizando un promedio ponderado por profundidad de las capas de humedad del suelo (Martínez-Fernández et al., 2015; González-Zamora et al., 2016; Gao et al., 2017; Xing et al., 2021), de la siguiente manera:

$$\theta_{RZSM} = \frac{1}{L_n} \sum_{i=1}^{i=n} \theta_i \cdot e_i \quad (3.2)$$

Donde θ_{RZSM} se refiere al RZSM de 0 a 100 [cm] m^3/m^3 , θ_i es la humedad volumétrica del suelo a la i -ésima capa de observación m^3/m^3 , L_n es el espesor de la capa $L_{i\text{-ésimo}}$ de suelo considerada para representar la RZSM, que es igual a 100 [cm], y e_i es el espesor de estrato de suelo [m] correspondiente a la humedad volumétrica θ_i .

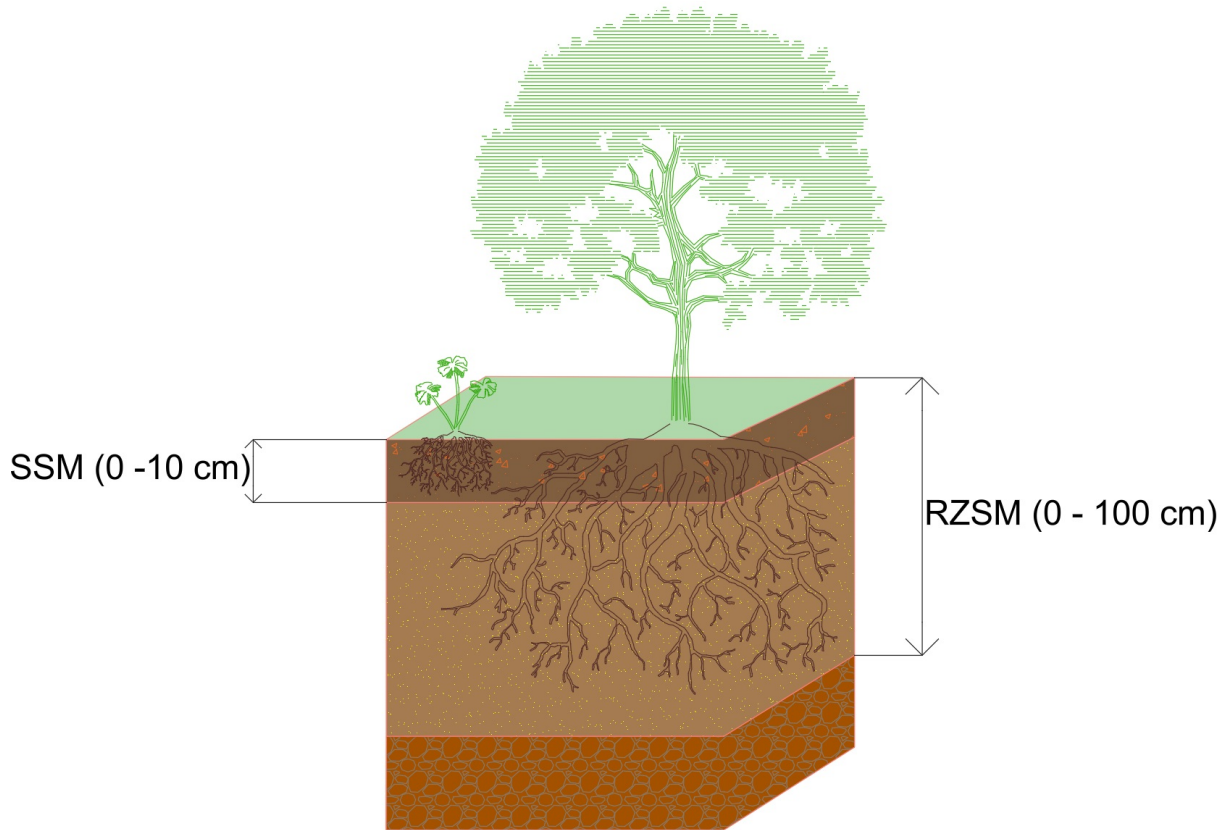


Figura 3.2: Representación gráfica de las capas de humedad de suelo consideradas en este trabajo: zona superficial (SSM) y zona de raíces (RZSM).

Para el caso de los productos grillados ERA5 y ERA5-Land, la RZSM se construyó a partir del contenido volumétrico de agua en el suelo de los estratos de: 0-7, 7-28 y 28-100 [cm]. En el caso de los datos provenientes de GLDAS-Noah, se construyó la RZSM a partir del contenido volumétrico de agua de los estratos de suelo de: 0-10, 10-40 y 60-100 [cm].

3.5. Descarga y procesamiento de datos grillados

Para la disponibilidad continua de datos actualizados de humedad del suelo casi en tiempo real (NRT), se implementó un sistema automatizado de consulta, descarga y procesamiento de archivos diarios de los productos grillados ERA5 y ERA5-Land, ambos proporcionados por el ECMWF a través del Climate Data Store (CDS, <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets>). En el caso de los productos GLDAS-Noah y SMAP-L4, provienen de NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC, <https://disc.gsfc.nasa.gov/>).

La tarea se ejecuta diariamente a una hora determinada mediante el sistema de gestión de tareas "systemd". Systemd es un sistema de inicio y gestión de servicios utilizado para programar tareas mediante unidades de tipo "timer", en servidores externos. Un "timer" define la frecuencia o el horario de ejecución de un servicio (.service), el cual contiene el comando o script a ejecutar.

Systemd evalúa si existen nuevos archivos disponibles en el servidor del CDS, y en caso afirmativo, realiza todo el flujo de descarga de los datos horarios o tri-horarios y su posterior agregación temporal a escala diaria. Los resultados se almacenan directamente en el servidor interno (<https://kutama.ufro.cl/>), el cual está habilitado como sistema de almacenamiento y consulta de archivos a través de un servidor web Apache (<https://mawunnrtdata.ufro.cl/data/sm/>), lo que permite integrarlo posteriormente a la plataforma de visualización desarrollada en Shiny (ver sección 3.9).

La Figura 3.3 muestra un esquema simplificado el proceso de automatización, desde la consulta inicial a CDS hasta el almacenamiento de los archivos procesados en el servidor interno (<https://kutama.ufro.cl/>).

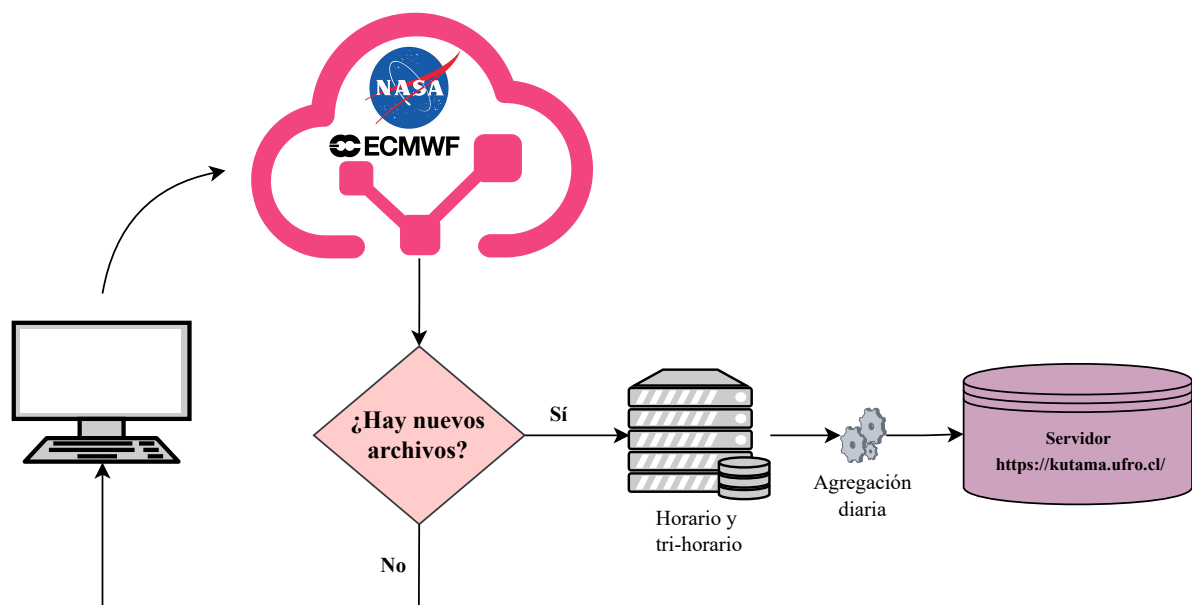


Figura 3.3: Esquema del proceso automatizado de descarga diaria de datos NRT desde los servidores de ECMWF, mediante una rutina programada en terminal remota.

Los archivos diarios generados a partir del procesamiento de los datos horarios y tri-

horarios se almacenan en el servidor interno (<https://kutama.ufro.cl/>) utilizando una estructura jerárquica de carpetas. Esta estructura sigue un orden lógico y uniforme, comenzando por la carpeta principal correspondiente al producto.

Dentro del servidor web Apache, los datos se encuentran en directorios que se dividen según la zona de humedad del suelo, distinguiéndose entre:

- **"VolumetricSW_SSM"** para la humedad del suelo superficial (SSM).
- **"VolumetricSW_RZSM"** para la humedad del suelo en la zona de raíces (RZSM).

Posteriormente, los archivos se agrupan en carpetas por año, comenzando desde 1981 hasta el presente. Dentro de cada año, se subdividen por mes, utilizando una codificación numérica: 01 para enero, 02 para febrero, hasta 12 para diciembre. Esta organización permite un acceso rápido e intuitivo a los datos, facilitando la consulta por parte del usuario.

La Figura 3.4 muestra gráficamente la estructura de carpetas utilizada para clasificar los archivos generados según producto, zona, año y mes.

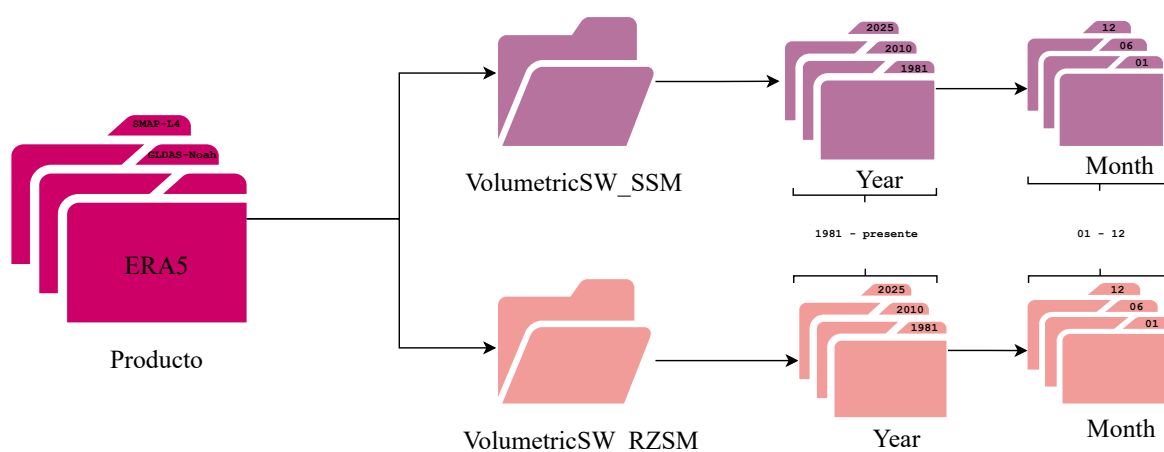


Figura 3.4: Estructura de carpetas y archivos de datos de humedad de suelo.

3.6. Valores volumétricos de humedad de suelo

Los valores volumétricos de SSM/RZSM están disponibles en la plataforma en la medida en que estén disponibles en sus servidores de origen. Los productos considerados para obtener los valores volumétricos son los cuatros productos grillados descritos en

la Sección 3.3.

El fin de obtener los valores volumétricos de SSM/RZSM para distintos productos a escala diaria es para analizar principalmente eventos de tormentas intensas (inundaciones), debido a que este tipo de evento extremo al tener una corta duración (menos de un mes), es necesario evaluar la humedad del suelo antes, durante y después del evento. Además, estos valores servirán de datos de entrada para el cálculo de índices estandarizados de anomalías de humedad de suelo.

3.7. Índices estandarizados de humedad de suelo

El monitoreo de la humedad del suelo es fundamental para evaluar la disponibilidad hídrica, la detección de sequías y el manejo de recursos agrícolas e hídricos. En este estudio, se han seleccionado dos índices estandarizados de humedad del suelo basados en datos observados:

- Índice Paramétrico (SSMI - *Standardized Soil Moisture Index*): Se basa en la distribución 'gamma' para modelar la humedad del suelo y transformar los valores de contenido volumétrico de agua en el suelo en anomalías estandarizadas (Palagiri and Pal, 2024).
- Índice No Paramétrico (ESSMI - *Empirical Standardized Soil Moisture Index*): Se calcula mediante el estimador de Kendall Gaussiano, lo que lo hace robusto ante distribuciones no normales (Carrão et al., 2016).

Ambos índices fueron seleccionados ya que responden a consideraciones metodológicas, operativas y de aplicabilidad directa sobre datos grillados disponibles para Chile continental. En este trabajo, los datos provienen de productos grillados (ERA5, ERA5-Land y GLDAS-Noah).

A diferencia de otros índices revisados, como el SMI de Sridhar et al. (2008), que requieren conocer el punto de marchitez permanente y la capacidad de campo del suelo, o el SPI de Sims et al. (2002), que se basa exclusivamente en precipitaciones y no representa directamente la humedad del suelo, los índices seleccionados se construyen íntegramente a partir de observaciones diarias de humedad del suelo. Esto permite un análisis más directo y representativo de las condiciones hidrológicas reales.

El SSI (Xu et al., 2018) y el SMI satelital (Grillakis, 2019) requieren datos combinados provenientes de sensores remotos, modelos hidrológicos y sistemas de asimilación, lo cual introduce incertidumbres asociadas a la calibración regional, resoluciones espaciales dispares y dependencia de múltiples fuentes. En contraste, el SSMI y el ESSMI se pueden calcular de forma consistente y reproducible a partir de una única fuente de datos, y permiten aplicar escalas de tiempo flexibles (diarias a multimensuales) sin requerimientos adicionales.

Además, el ESSMI, al ser un índice no paramétrico, permite representar mejor los percentiles locales sin imponer una distribución teórica, mientras que el SSMI, basado en ajuste gamma, ofrece alta representación a eventos extremos. Esto, los convierte en herramientas robustas, comparables espacial y temporalmente, y adecuadas para su integración en plataformas de monitoreo en tiempo real, como la desarrollada en este trabajo.

En este contexto, ambos índices se calculan siguiendo un flujo de trabajo estructurado, análogo al utilizado en el *Standardized Precipitation Index* (SPI), pero aplicado a la humedad del suelo en lugar de la precipitación (McKee et al., 1993).

Los índices estandarizados de humedad de suelo dependen de datos y parámetros calculados en el rango histórico (1981-2023), los que están almacenados en el servidor interno (<https://kutama.ufro.cl/>). SSMI y ESSMI están disponibles en la zona superficial (0-10 [cm]) y zona de raíces (0-100 [cm]) de humedad de suelo para cada set de datos disponibles (ERA5, ERA5-Land y GLDAS-Noah).

El producto grillado de SMAP-L4 solo es utilizado para visualizar los valores volumétricos de humedad de suelo, ya que el período de datos disponible es menor a 12 años, por lo que no se puede considerar para el cálculo de índices estandarizados.

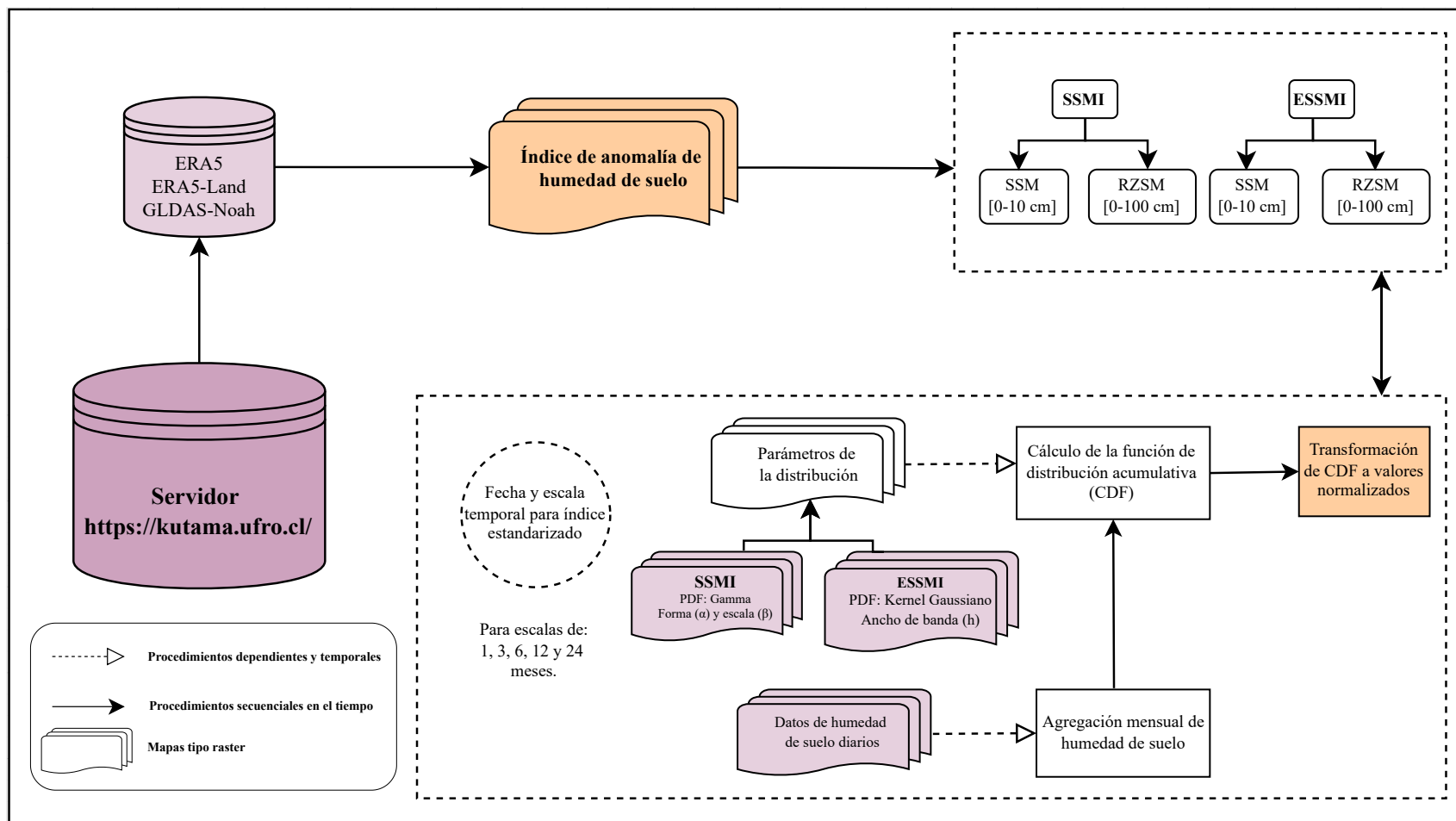


Figura 3.5: Esquema metodológico del cálculo de los índices estandarizados.

A partir de la Figura 3.5, se detallan los pasos para el cálculo del índice.

1. Definición de fecha y escalas temporales

Para calcular los índices a distintas escalas temporales ($n = 1, 3, 6, 12$ y 24 meses), es necesario definir períodos de acumulación de humedad del suelo. A partir de una fecha del período disponible (según el producto), en la cual se desea calcular el índice, se extraen los valores de humedad del suelo correspondientes a los últimos n meses, asegurando la continuidad temporal de los datos. La fecha escogida puede ser cualquier día del período disponible (1981-presente).

La escala temporal corresponde a un período de tiempo en meses, donde la fecha de entrada es el punto final del periodo, mientras que la fecha de inicio se determina restando la cantidad de días correspondiente a los meses seleccionados (aproximando cada mes a 30 días). Por ejemplo, para el día 12/08/2023 y una escala de 3 meses, el período de datos diarios que se considera es de 14/05/2023 a 12/08/2023.

2. Agregación de datos diarios de humedad del suelo

La consulta del índice depende de la fecha y escala temporal escogida para que los datos diarios de SSM/RZSM sean agregados (promediados) a un valor, los que son procesados en R (R Core Team, 2025). Los datos diarios provienen de productos grilla-dos con cobertura en Chile continental, los que incluyen ERA5, ERA5-Land y GLDAS-Noah. Estos datos contienen valores horarios y tri-horarios de humedad, con distintas resoluciones espacio-temporales (detallado en la Tabla 3.1).

3. Obtención de parámetros de cada índice

Los datos de SSM/RZSM son sometidos a un proceso de verificación de existencia de la serie temporal completa, para asegurar que no existan datos faltantes dentro del período de cálculo de cada índice.

De manera previa, para disminuir el tiempo de consulta en la plataforma web, durante el cálculo de los índices de humedad del suelo, es esencial estimar los parámetros de cada índice basados en la función de densidad de probabilidad (PDF) histórica (1981-

2023) de SSM/RZSM, para SSMI según la ecuación:

$$f(\theta; \alpha, \beta) = \frac{\theta^{\alpha-1} e^{-\theta/\beta}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \quad (3.3)$$

detallada en el Anexo A.3.

Y para ESSMI la ecuación:

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h}\right) \quad (3.4)$$

detallada en el Anexo A.4.

El procedimiento del cálculo de parámetros de cada índice consta de generar la PDF para cada día del año, a partir de datos diarios históricos promediados para una escala de tiempo (e.g. $n = 3$ meses). Los parámetros son almacenados en formato SpatRaster.

Un SpatRaster es una estructura de datos espacial en forma de grilla o matriz de celdas, donde cada celda tiene un valor asociado (e.g. humedad del suelo). Permite almacenar una o más capas, cada una con su propio conjunto de valores para cada celda.

Para el SSMI, se asume que la humedad sigue una distribución gamma (Palagiri and Pal, 2024), por lo que se estiman los parámetros de forma (α) con la ecuación A.2 y escala (β) con la ecuación A.3, almacenados en formato SpatRaster. Mientras que para el ESSMI (no paramétrico), se utiliza el Kernel Gaussiano calculado según la ecuación A.7, estimando el ancho de banda (h) de la distribución, mediante el método de Sheather and Jones (1991) y las acumulaciones diarias históricas de SSM/RZSM.

Lo anterior para que se construya la PDF específica correspondiente al índice de SSM/RZSM, según la fecha y escala temporal.

4. Cálculo de índices de humedad de suelo

Una vez obtenida la PDF y el valor promediado de SSM/RZSM para una fecha y escala seleccionada, este valor se evalúa dentro de la función de distribución acumulada (CDF) del índice, previamente construida con los parámetros, según la ecuación A.4 para SSMI y la ecuación A.8 para ESSMI.

Finalmente, la probabilidad acumulada se transforma a valores normalizados (según la ecuación A.5 para SSMI y ecuación A.9 para ESSMI), permitiendo la conversión del valor de humedad del suelo en un índice estandarizado. Este índice facilita la interpretación de las condiciones del suelo en relación con su contenido de agua.

En las siguientes secciones se describen el flujo del cálculo de SSMI y ESSMI.

3.7.1. SSMI (índice paramétrico)

El índice paramétrico seleccionado para este trabajo corresponde al índice estandarizado de humedad de suelo (Standardized Soil Moisture Index, SSMI) ajustado a la función de distribución gamma, tal cual como lo realiza Palagiri and Pal (2024). En el Anexo A.3 se detalla las fórmulas necesarias para el cálculo de este índice paramétrico.

La implementación computacional para el cálculo del SSMI se realiza mediante la programación de funciones en el ambiente estadístico R (R Core Team, 2025), con la utilización de los paquetes **terra** (Hijmans et al., 2022) y **SPEI** (Beguería et al., 2017).

Primero es necesario obtener los valores de humedad del suelo correspondientes al período de acumulación deseado. Esto se logra mediante la función `cut_dates()`, que recorta los datos de humedad del suelo según la fecha deseada y la escala temporal definida por el usuario (en meses). Esta función calcula el número de días que se deben considerar para el cálculo del índice, extrae las fechas disponibles en la carpeta de datos históricos y selecciona aquellas que corresponden al rango de tiempo especificado. Además se verifica que el periodo seleccionado esté dentro del rango de datos disponibles, evitando errores por fechas fuera de rango.

Con el `SpatRaster` de SSM/RZSM ajustado al rango de días a considerar, se procede al cálculo del SSMI utilizando una función auxiliar `ssmi_raster()`. Esta función requiere cuatro entradas: el `SpatRaster` con los datos diarios de SSM/RZSM, los parámetros de la distribución gamma obtenidos previamente y la fecha objetivo del índice. El proceso comienza convirtiendo la fecha deseada al formato juliano, para poder extraer los parámetros α y β correspondientes de la distribución gamma. Luego, se valida que la fecha objetivo esté presente en los datos de humedad del suelo antes de continuar.

Una vez extraídos los valores SSM/RZSM, estos son promediados entre sí (para tener un valor de humedad del suelo para la fecha objetivo y la escala temporal deseada), se evalúa su posición dentro de la distribución gamma mediante la CDF. Esto proporciona una probabilidad acumulada. Posteriormente, los valores de probabilidad acumulada se transforman a una escala normal estándar (con media cero y desviación estándar uno), aplicando la función inversa de la distribución normal, utilizando la función *qnorm* de R base, obteniendo así el valor numérico del SSMI. Finalmente, se genera un nuevo SpatRaster con los valores calculados del índice, manteniendo la estructura espacial del ráster original.

Este proceso permite obtener mapas de SSMI (anomalías de humedad del suelo) de manera sistemática y automatizada. Al integrar la selección del periodo de acumulación, la conversión de valores de humedad a probabilidades y la transformación a una escala normal estándar, se obtiene un índice que facilita el monitoreo de condiciones de sequía y superávit de agua contenida en el suelo a diferentes escalas temporales.

3.7.2. ESSMI (índice no paramétrico)

El índice estandarizado empírico de humedad de suelo (Empirical Standardized Soil Moisture Index, ESSMI) de Carrão et al. (2016) es una herramienta no paramétrica que permite evaluar las condiciones de humedad del suelo sin asumir una distribución específica para los datos. Su cálculo se basa en la estimación de la CDF de los datos de humedad del suelo mediante el método de estimación de Kernel Density Estimation (KDE), lo que permite capturar de manera flexible la forma empírica de la distribución de la humedad acumulada. Una etapa crucial en este proceso es la selección del ancho de banda óptimo. En el Anexo A.4 se detallan las fórmulas necesarias para el cálculo de este índice no paramétrico ESSMI.

La implementación computacional del cálculo del índice ESSMI se desarrolla mediante una secuencia programada en el entorno estadístico R (R Core Team, 2025), con la utilización de los paquetes **terra** (Hijmans et al., 2022), **SPEI** (Beguería et al., 2017) y **kde1d** Nagler et al. (2025). El procedimiento se inicia con la definición de una fecha objetivo y una escala temporal, expresada en meses, la cual determina el número de días previos que deben considerarse para calcular la humedad del suelo acumulada. En esta etapa, se recorta el conjunto de datos diarios, seleccionando únicamente las capas temporales que se encuentran dentro del rango de fechas calculado.

El cálculo del índice se implementó mediante la función `essmi_raster_kde()`, la cual toma como entradas un `SpatRaster` con los datos diarios de SSM/RZSM, otro con el ancho de banda y otro con las acumulaciones históricas (`SpatRaster` que contiene los datos diarios de SSM/RZSM para el período 1981-2023), los que dependen de la fecha objetivo y la escala temporal seleccionada.

A partir del ráster de acumulaciones históricas, se seleccionan todas las capas correspondientes al mismo mes y día (MM-DD) de años anteriores. Esto permite construir una muestra histórica representativa del comportamiento típico de la humedad del suelo en ese día del año, considerando una ventana de acumulación definida previamente.

Una vez obtenidas las acumulaciones históricas, el valor promediado de los datos SSM/RZSM y el ancho de banda, se aplica una función auxiliar `calculate_essmi_celda()` celda por celda. Esta función, estima la distribución de densidad empírica mediante KDE utilizando los valores acumulados históricos y el h correspondiente. Luego, evalúa la CDF asociada al valor promediado y transforma esa probabilidad acumulada a una escala normal estándar mediante la función `qnorm()` de R base. Se genera como resultado un nuevo archivo espacial donde cada celda contiene el valor correspondiente del índice ESSMI.

3.8. Clasificación de anomalías de humedad de suelo

La clasificación de anomalías de humedad de suelo, representadas por los valores de SSMI/ESSMI, se utiliza para describir los resultados obtenidos del cálculo del índice de humedad de suelo. En lugar de utilizar la clasificación original propuesta por Agnew (2000), la cual se basa en la clasificación realizada por McKee et al. (1993), se utiliza el índice estandarizado de precipitación para eventos de sequía, el que puede ser adaptado a todo evento de anomalía de humedad de suelo (déficit y superávit de agua contenida en el suelo), y por ende, a SSMI y ESSMI.

En la Tabla 3.2 se muestra la clasificación de anomalías de humedad de suelo para SSMI y ESSMI utilizados en el presente trabajo.

Tabla 3.2: Clasificación de los valores de SSMI y ESSMI, basado en Agnew (2000).

Rango de valores		Clase
	SSMI, ESSMI $\geq 1,65$	Extremadamente húmedo
$\leq 1,28$	SSMI, ESSMI $< 1,65$	Severamente húmedo
$\leq 0,84$	SSMI, ESSMI $< 1,28$	Moderadamente húmedo
$< -0,84$	SSMI, ESSMI $< 0,84$	Normal
$< -1,28$	SSMI, ESSMI $\leq -0,84$	Moderadamente seco
$< -1,65$	SSMI, ESSMI $\leq -1,28$	Severamente seco
	SSMI, ESSMI $\geq -1,65$	Extremadamente seco

3.9. Desarrollo de plataforma web

Actualmente, Chile continental carece de herramientas que permitan monitorear en tiempo real la humedad del suelo. Para abordar esta problemática, en el presente trabajo se desarrolló una plataforma web interactiva denominada **Pülliko** (<https://hzambran.shinyapps.io/Pulliko/>), implementada en el lenguaje de programación R (R Core Team, 2025) y construida principalmente con el paquete **Shiny** (Chang et al., 2015). El nombre **Pülliko** proviene de la lengua mapuche y se traduce como ‘agua en el suelo’.

La plataforma web ha sido creada como un recurso interactivo para la consulta y visualización de SpatRaster y series temporales del comportamiento actual e histórico de la humedad del suelo, tanto en valores volumétricos como a través de índices estandarizados diarios (SSMI y ESSMI). Su diseño integra dos procesos distintos pero que se complementan entre sí: en primer lugar, la automatización del proceso de descarga y almacenamiento de datos grillados desde servidores externos, como se detalla en la Sección 3.5. Por otro lado, la aplicación Shiny se conecta a esos archivos que han sido preprocesados y que están almacenados en el servidor <https://kutama.ufro.cl/>, descargando solo aquellos necesarios para responder a la consulta definida por el usuario.

Esta arquitectura busca minimizar los tiempos de espera en la aplicación. La lógica interna de Shiny se basa en dos componentes fundamentales: i) el servidor, que gestiona la lógica de procesamiento y los cálculos (como la ejecución de funciones de descarga,

acumulación y estandarización); ii) la interfaz de usuario (UI), que controla el diseño y formato de los controles con los que interactúa el usuario, como, por ejemplo, el producto de humedad de suelo, la fecha, el tipo de índice, la escala temporal y la zona de análisis (SSM/RZSM).

La visualización se realiza a través del paquete **leaflet** (Cheng et al., 2019), ofreciendo mapas interactivos configurables en cuanto a paletas de color, opacidad, capas base y clasificación. Esta plataforma representa una contribución relevante para el monitoreo operativo de la humedad del suelo, al permitir un fácil acceso a datos diarios de humedad de suelo, los que son clave para la gestión agrícola, hídrica y la evaluación de eventos extremos hidrometeorológicos.

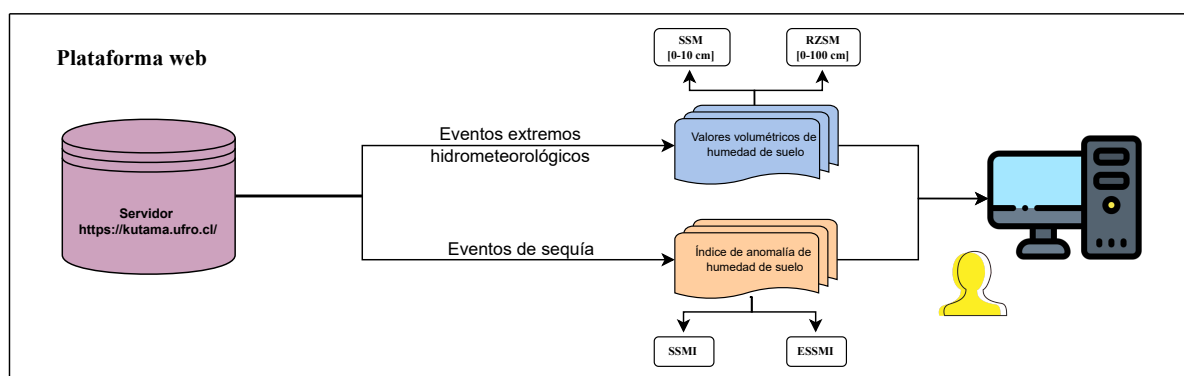


Figura 3.6: Opciones de consulta en la plataforma web.

La plataforma **Pülliko** (<https://hzambran.shinyapps.io/Pulliko/>), permite visualizar mapas de valores volumétricos de humedad del suelo para dos profundidades: la de SSM (0-10 [cm]) y la de RZSM (0-100 [cm]). También es posible visualizar los índices de humedad del suelo, el SSMI y ESSMI, los descritos en la Sección 3.7. Estos índices pueden ser visualizados tanto para la SSM como para la RZSM. Estas opciones de visualización están representadas en la Figura 3.6.

La representación de los valores volumétricos de humedad del suelo utiliza los cuatro productos grillados descritos en la Tabla 3.1: ERA5, ERA5-Land, GLDAS-Noah y SMAP-L4. Sin embargo, los índices estandarizados de humedad del suelo solo se calculan para tres productos (ERA5, ERA5-Land y GLDAS-Noah), debido a que los datos disponibles de SMAP-L4 no son lo suficientemente extensos para la estimación robusta de los parámetros de distribución.

CAPÍTULO 4

Resultados y discusión

La plataforma **Pülliko** (<https://hzambran.shinyapps.io/Pulliko/>) entrega información espacial y series temporales para una fecha y escala determinadas: i) valores volumétricos de zona superficial (SSM, 0-10 [cm]) y zona de raíces (RZSM; 0-100 [cm]), o ii) valores obtenidos del cálculo de índices estandarizados paramétrico y no paramétrico. Lo anterior con el fin de analizar eventos extremos hidrometeorológicos y/o eventos de sequía, según los intereses del usuario.

4.1. Valores volumétricos de humedad de suelo

Esta sección presenta los resultados obtenidos a partir del análisis de los valores volumétricos de humedad del suelo m^3/m^3 , diferenciados para la SSM y RZSM, las que se calcularon de acuerdo a lo descrito en la Sección 3.4. Los productos utilizados fueron seleccionados según los criterios descritos en la Sección 3.3.

4.1.1. Zona superficial (SSM; 0-10 [cm])

Para poder comparar la distribución espacial de los valores de humedad de suelo entregados por los distintos productos grillados, la Figura 4.1 presenta los valores promedio de SSM (0-10 [cm]) para el período 2015-2023, derivados de cuatro productos grillados de humedad de suelo: GLDAS-Noah, ERA5, ERA5-Land y SMAP-L4.

En la zona norte, correspondiente al Desierto de Atacama y el Altiplano Andino (18° – 26° S), GLDAS-Noah la Figura 4.1 muestra mayores contrastes en los valores volumétricos: el desierto propiamente tal y el Salar de Atacama presentan valores bajos, entre $0,00$ – $0,10 m^3/m^3$, mientras que otras áreas del norte alcanzan rangos entre $0,10$ – $0,20 m^3/m^3$. En contraste, ERA5, ERA5-Land y SMAP-L4 asignan valores más uniformes en esta zona, todos dentro del rango más seco ($0,00$ – $0,10 m^3/m^3$), sin diferenciar el salar ni el desierto.

Desde el paralelo 30° S hacia el sur, se aprecia un incremento progresivo en el contenido de humedad del suelo en los cuatro productos. En la zona centro, ERA5 y ERA5-Land, en la Figura 4.1, muestran mayores valores volumétricos, alcanzando rangos entre $0,30$ – $0,35 m^3/m^3$, mientras que GLDAS-Noah se mantiene entre $0,20$ – $0,25 m^3/m^3$. SMAP-L4 entrega los valores más bajos en esta franja, con contenidos que oscilan entre $0,10$ – $0,20 m^3/m^3$.

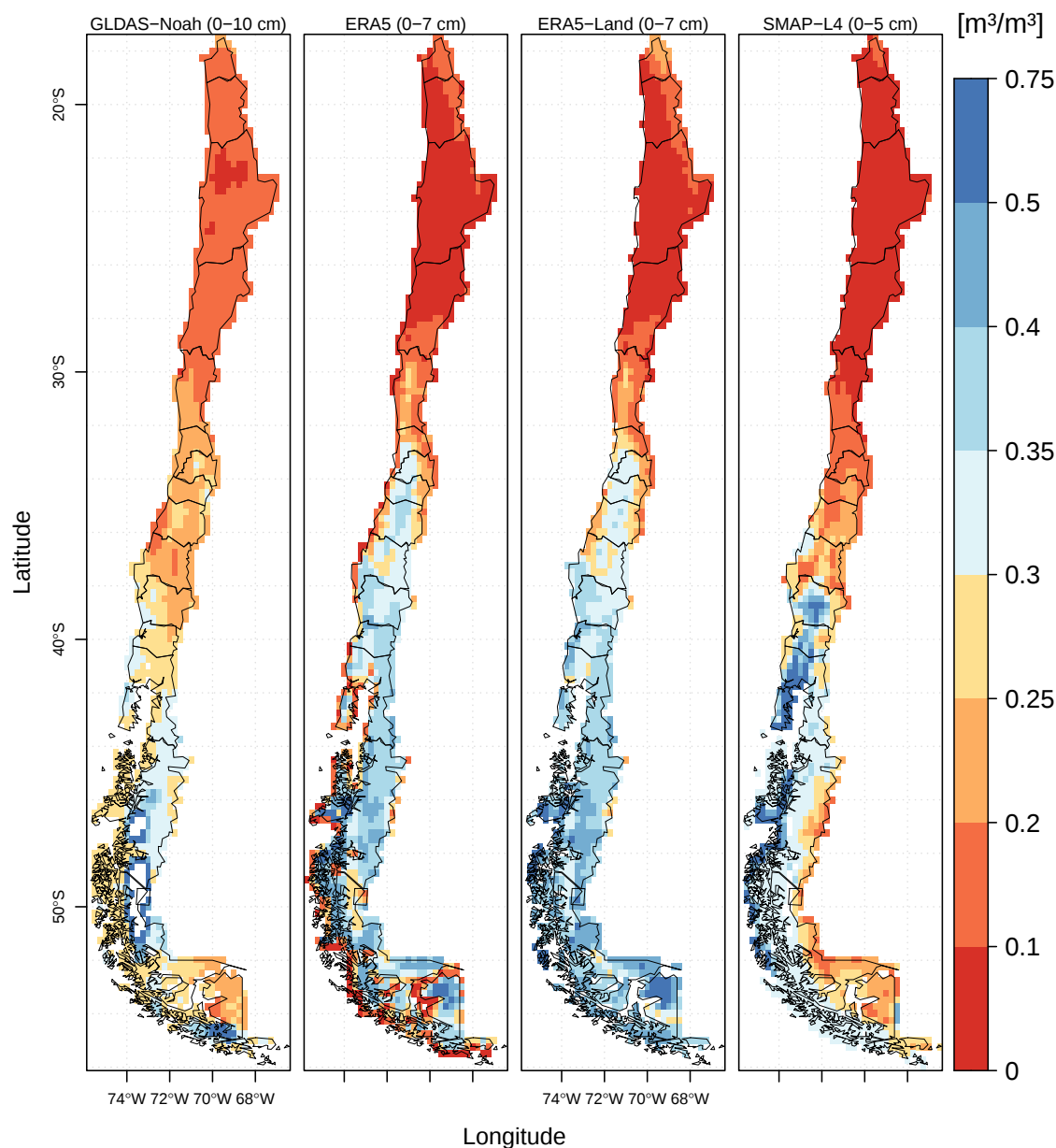


Figura 4.1: Promedios anuales del SSM en Chile continental para el período 2015-2023, según cuatro productos grillados: GLDAS-Noah, ERA5, ERA5-Land y SMAP-L4.

En la zona sur (38° – 44° S), los productos ERA5, ERA5-Land y SMAP-L4 muestran una mayor disponibilidad de agua en el suelo, con valores promedio entre $0,35$ – $0,55 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Particularmente, SMAP-L4 presenta los mayores valores en la depresión intermedia de las regiones de La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos, donde los valores superan los $0,40 \text{ m}^3/\text{m}^3$ e incluso alcanzan $0,50 \text{ m}^3/\text{m}^3$. En contraste, GLDAS-Noah muestra un patrón más seco, con valores entre $0,25$ – $0,30 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

En la zona austral ($43,0^{\circ}$ - $56,5^{\circ}$ S), los patrones se diversifican. GLDAS-Noah es el único producto que representa de forma diferenciada los Campos de Hielo Patagónicos, como el Parque Nacional Laguna San Rafael y el Parque Nacional Torres del Paine, los cuales aparecen sin valores dentro de la escala considerada. SMAP-L4, por su parte, muestra los valores más bajos en el extremo sur, especialmente hacia el límite con la Patagonia argentina, donde las condiciones frías y secas dominan. Los productos ERA5 y ERA5-Land, en cambio, muestran valores elevados en esta región, entre $0,35$ – $0,55 \text{ m}^3/\text{m}^3$, aunque ERA5 destaca por presentar zonas costeras con valores mínimos ($0,00$ – $0,10 \text{ m}^3/\text{m}^3$), particularmente en los archipiélagos australes.

4.1.2. Zona de raíces (RZSM; 0-100 [cm])

Para comprender la distribución espacial de los valores de humedad de suelo entregados por los distintos productos grillados, la Figura 4.2 presenta los valores promedio de RZSM (0-100 [cm]) para el período 2015-2023, derivados de cuatro productos grillados: GLDAS-Noah, ERA5, ERA5-Land y SMAP-L4.

En la zona norte ($17,5^{\circ}$ – $30,0^{\circ}$ S), según la Figura 4.2, todos los productos coinciden en representar condiciones de baja humedad, con predominio de valores entre $0,00$ y $0,10 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Sin embargo, GLDAS-Noah distingue valores más uniformes dentro del rango $0,10$ – $0,20 \text{ m}^3/\text{m}^3$, sin grandes diferencias espaciales. En cambio, ERA5, ERA5-Land y SMAP-L4 muestran gradientes de valores entre $0,00$ – $0,25 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

En la zona centro del país (30° – 38° S), según la Figura 4.2, los productos ERA5 y ERA5-Land muestran mayores contenidos de humedad del suelo, con valores que oscilan entre $0,30$ – $0,40 \text{ m}^3/\text{m}^3$, en comparación con los productos provenientes de la NASA, que registran valores más bajos, en el rango de $0,20$ – $0,30 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

En la zona sur (38° – 44° S), según la Figura 4.2, GLDAS-Noah presenta nuevamente los valores más bajos entre los cuatro productos ($0,20$ – $0,30 \text{ m}^3/\text{m}^3$), mientras que ERA5, ERA5-Land y SMAP-L4 simulan una mayor disponibilidad de agua en el suelo. En la región austral, todos los productos coinciden en representar condiciones húmedas, aunque GLDAS-Noah presenta nuevamente los valores bajos, en contraste con ERA5 y ERA5-Land, que muestran mayor saturación. GLDAS-Noah destaca por ser el único en representar explícitamente los Campos de Hielo Norte y Sur, fuera del rango

representado en la leyenda, como ya se había observado también en la SSM.

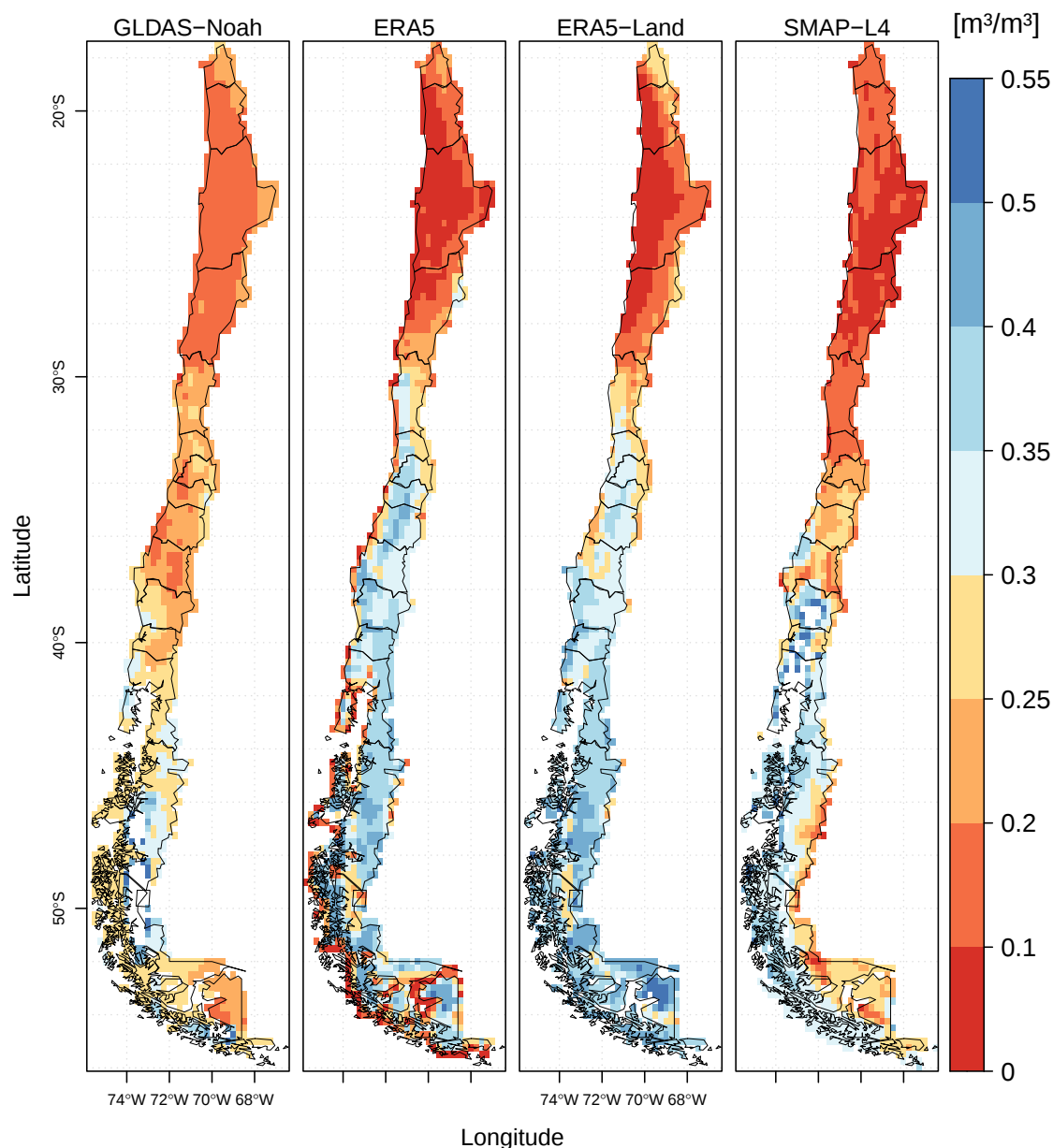


Figura 4.2: Promedio diario de RZSM para el período 2015-2023 en Chile continental, estimada a partir de los productos grillados: GLDAS-Noah, ERA5, ERA5-Land y SMAP-L4.

En la Figura A.3 y Figura A.4 se evidencian los valores volumétricos promedio de humedad de suelo para la SSM y la RZSM, respectivamente, para los tres conjuntos de datos grillados utilizados, en el período 2000-2023.

4.2. Índices estandarizados de humedad de suelo

En esta sección se presentan los resultados del cálculo de SSMI y ESSMI, ambos calculados para una escala temporal de 12 meses (SSMI-12 y ESSMI-12), correspondiente al promedio anual de humedad de suelo. La selección de los años considerados en el análisis responde a la necesidad de representar distintos contextos hidrológicos: un año predominantemente húmedo (2002), dos años de transición de condiciones húmedas a secas (2014 y 2015), y un año caracterizado por condiciones marcadamente secas (2020).

El análisis se realizó a partir de los productos grillados GLDAS-Noah, ERA5 y ERA5-Land, tanto para la SSM como para la RZSM, en todo Chile continental. El producto SMAP-L4 es excluido debido a la disponibilidad de datos existentes (menor a 20 años). La clasificación de las anomalías se realiza a partir de lo detallado en la Tabla 3.2.

El ESSMI para los años evaluados (2002, 2014, 2015 y 2020) muestra valores que varían principalmente entre -0,84 a 0,84; por lo que la clasificación en este capítulo será definida: de $0 < \text{ESSMI} < 0,84$; normal positivo (húmedo) para una anomalía húmeda y de $-0,84 < \text{ESSMI} < 0$, normal negativo (seco) para una anomalía seca.

4.2.1. Zona superficial (SSM; 0-10 [cm])

En la Figura 4.3 muestra los mapas de anomalía correspondientes a los años seleccionados: 2002, 2014, 2015 y 2020, los cuales representan distintos contextos hidroclimáticos: un año húmedo (2002), años de transición (2014 y 2015) y un año seco (2020).

En el año 2002, según la Figura 4.3, se observa un comportamiento predominantemente húmedo en todo Chile continental, especialmente en el producto GLDAS-Noah, donde el índice SSMI-12 alcanza valores superiores a 0,84 en gran parte del país. En contraste, los productos ERA5 y ERA5-Land identifican una situación más mixta en el extremo sur, con zonas clasificadas entre normal negativo (entre 0,00 y -0,84) y severamente secas (entre -1,28 y -1,65). Sin embargo, al observar el índice ESSMI-12, los tres productos identifican una anomalía normalmente positiva a nivel nacional.

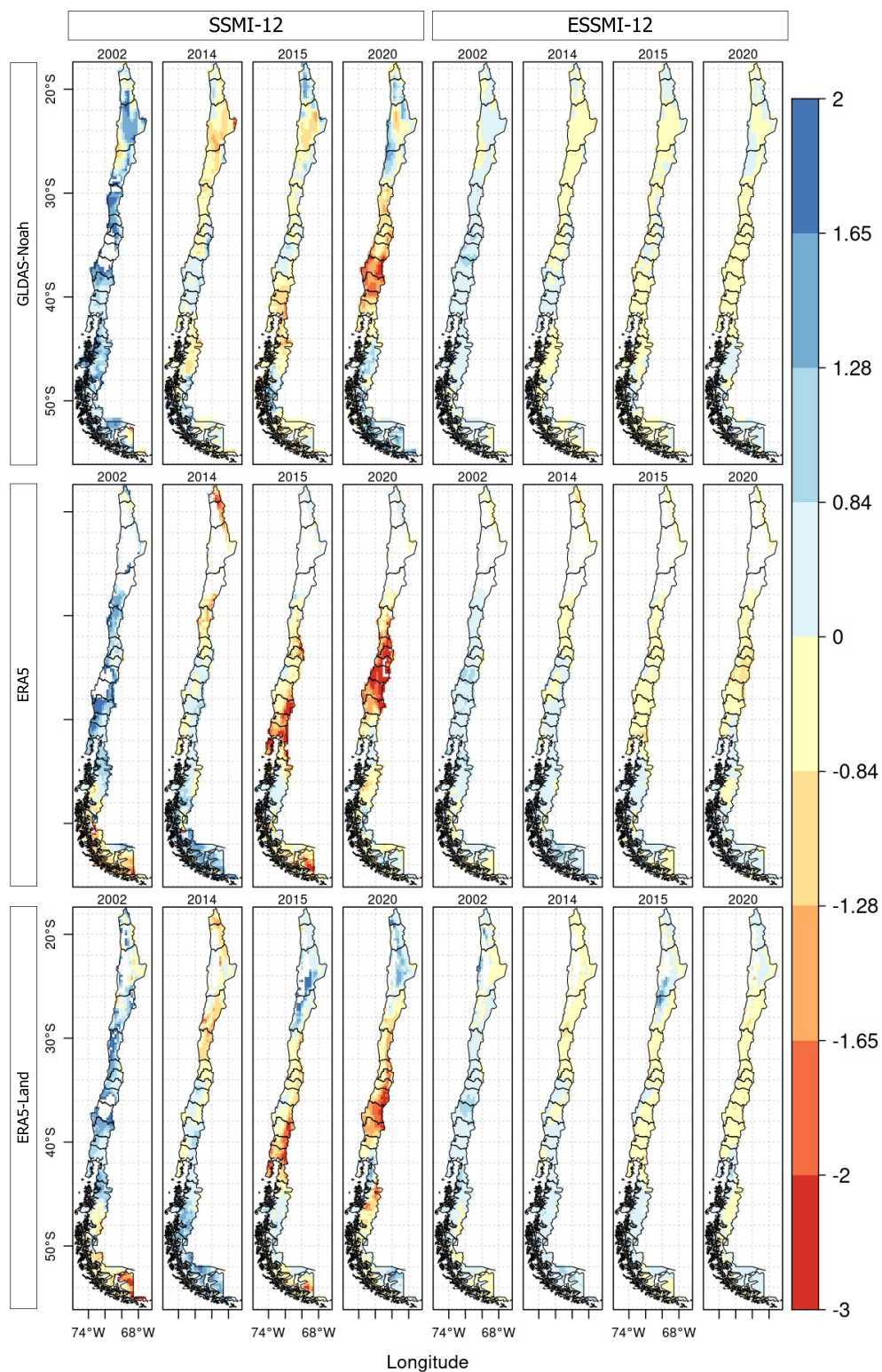


Figura 4.3: SSMI-12 y ESSMI-12 para los años 2002, 2014, 2015 y 2020 en la SSM de Chile continental. Se muestran los resultados para los productos GLDAS-Noah, ERA5 y ERA5-Land.

En el año 2014, se identifica un patrón de transición. ERA5 y ERA5-Land presentan valores positivos de SSMI-12 en el extremo sur, clasificando gran parte de esa región como normal positivo (entre 0,00 y 0,84), mientras que GLDAS-Noah muestra una mayor variabilidad, con áreas que fluctúan entre condiciones normal negativa (entre 0,00 y -0,84) y normal positiva (entre 0,00 y 0,84). En el caso del ESSMI-12, las diferencias entre productos se reducen, aunque persiste una anomalía más neutral positiva (entre 0,00 y 0,84) en el sur.

El año 2015 representa otro periodo transitorio, donde comienza a observarse una anomalía negativa en la zona centro-sur. En particular, SSMI-12 muestra condiciones de extremadamente seco (entre 0,00 y -0,84) en dicha zona para los tres productos, siendo más marcada en ERA5 y ERA5-Land.

En tanto, ESSMI-12 refleja anomalías normalmente negativas (entre 0,00 y -0,84) en esta misma región, lo cual sugiere una disminución sostenida de la humedad del suelo sin alcanzar extremos tan marcados como en el SSMI.

En el año 2020, se acentúa la anomalía negativa en la zona centro-sur del país. Los tres productos coinciden en mostrar una anomalía extremadamente seca (valor menor a -1,65) para el SSMI-12, extendida desde la región del Maule hasta La Araucanía. En cuanto al índice ESSMI-12, ERA5 identifica una anomalía moderadamente seca (entre -1,28 y -0,84) en esa misma región, mientras que GLDAS-Noah y ERA5-Land la clasifican como normalmente negativa (entre 0,00 y -0,84). Este contraste refleja cómo el ESSMI tiende a suavizar los extremos en comparación al SSMI, dado su enfoque basado en distribuciones empíricas.

4.2.2. Zona de raíces (RZSM; 0-100 [cm])

La Figura 4.4 presenta los resultados del SSMI-12 y ESSMI-12 calculados para la RZSM durante los años 2002, 2014, 2015 y 2020, a partir de los productos GLDAS-Noah, ERA5 y ERA5-Land.

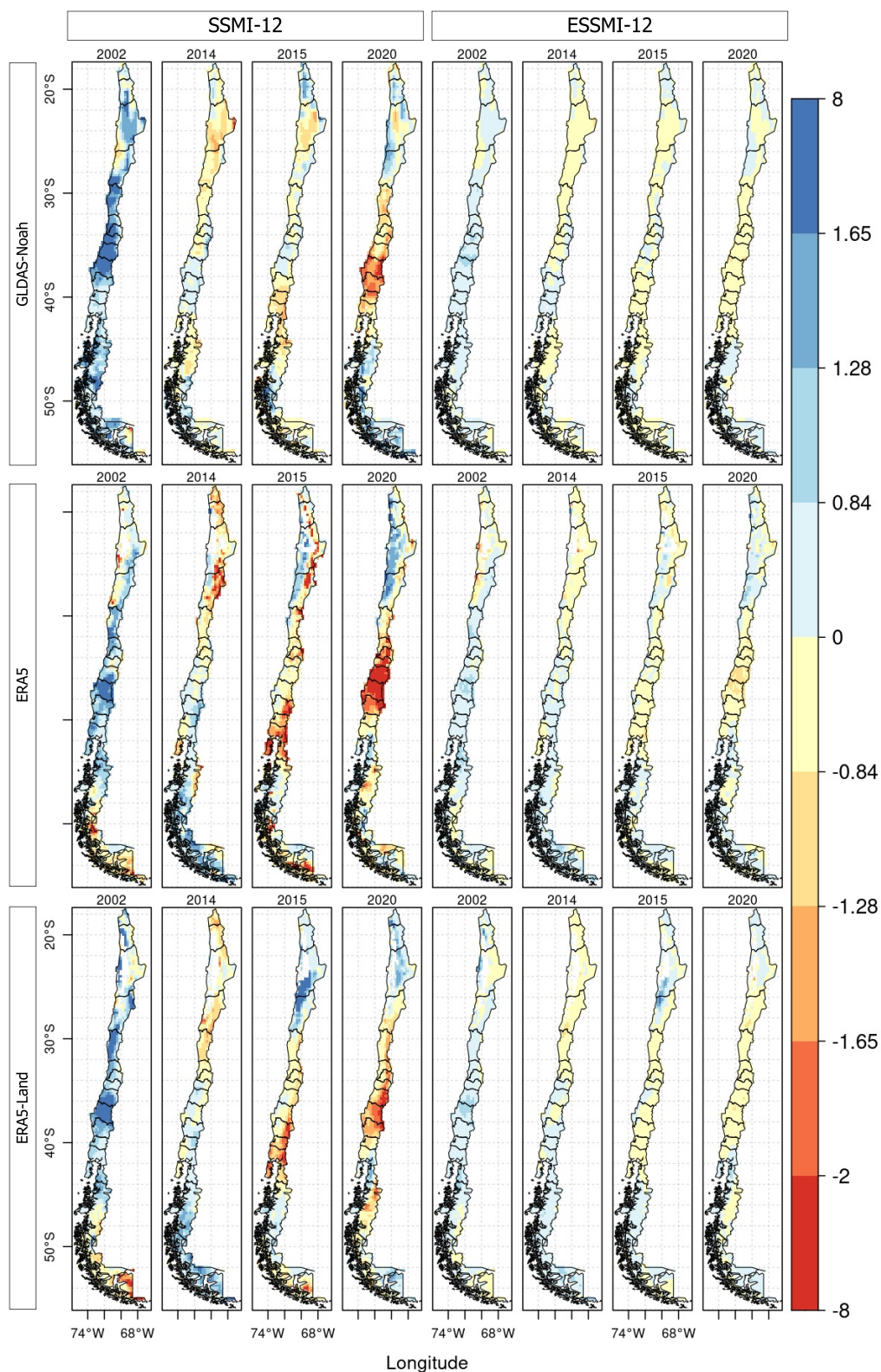


Figura 4.4: SSMI-12 y ESSMI-12 en la RZSM para los años 2002, 2014, 2015 y 2020, calculados a partir de los productos GLDAS-Noah, ERA5 y ERA5-Land.

Durante el año 2002, el SSMI-12 muestra valores marcadamente positivos a nivel nacional, con anomalías clasificadas entre severamente húmedas (entre 1,28 y 1,65) y extremadamente húmedas (valores mayores a 1,65) en la mayor parte de Chile continental para los tres productos analizados. Solo se observan excepciones puntuales en algunas regiones específicas, principalmente en sectores del norte y extremo sur. En cambio, el ESSMI-12 registra una anomalía predominantemente normal positiva (entre 0,00 y 0,84).

En los años 2014 y 2015, se observa una transición desde condiciones normalmente positivas (entre 0,00 y -0,84) hacia una progresiva sequía en el SSMI-12. En 2015, la señal seca comienza a intensificarse en la zona centro-sur, particularmente en los productos ERA5 y ERA5-Land, los cuales muestran anomalías severamente secas (entre -1,28 y -1,65), mientras que GLDAS-Noah refleja una sequía menos intensa en esa misma región. En el caso del ESSMI-12, el patrón transicional también es evidente, pasando de anomalías normalmente positivas (entre 0,00 y 0,84) en 2014 a normalmente negativas (entre 0,00 y -0,84) en 2015, aunque sin alcanzar los niveles extremos del SSMI.

Finalmente, en el año 2020, se acentúa la sequía en la zona centro-sur del país. GLDAS-Noah muestra en el SSMI-12 una anomalía severamente seca (entre -1,28 y -1,65), mientras que ERA5 y ERA5-Land intensifican esa condición, registrando anomalías extremadamente secas (valores menores a -1,65) en gran parte de la zona central y sur. El ESSMI-12 en este año refleja un patrón similar al observado en la SSM, con una anomalía generalizada normalmente negativa (entre 0,00 y -0,84) en los tres productos, y valores más intensos en ERA5, lo que evidencia la persistencia del déficit hídrico en las capas profundas del suelo.

4.3. Casos de estudio

Para demostrar la aplicación práctica de la plataforma web creada, en esta sección se describen dos casos de estudio: i) evento extremo hidrometeorológico y ii) evento de sequía. En el caso i) se evaluó un evento de precipitación intensa ocurrida en agosto de 2023 en la Cuenca de Río Claro en San Carlos, en la región del Maule. Y en el caso ii), la Cuenca del Río Petorca en Longotoma, una zona altamente afectada por sequías prolongadas iniciadas en 2010. Las series temporales, propiedades de suelo y otras variables consideradas fueron a partir de un promedio de todas las celdas dentro de la

cuenca de estudio.

4.3.1. Respuesta de la humedad del suelo en un evento de precipitación intenso

Para evaluar la utilidad que tiene una visualización de los valores volumétricos de humedad del suelo para monitorear los efectos de eventos de precipitación intensos, se analizó el caso del sistema frontal que afectó a la Cuenca de Río Claro en San Carlos entre el 18 y el 23 de agosto de 2023. Según registros de <https://vismet.cr2.cl/>, el evento alcanzó una precipitación acumulada de 791,35 [mm] en 5 días.

La Figura 4.5 muestra la evolución diaria del contenido volumétrico de agua en el suelo según los productos GLDAS-Noah, ERA5, ERA5-Land y SMAP-L4 junto con la precipitación diaria acumulada obtenida de ERA5. También se muestran en líneas horizontales las propiedades de suelo extraídas del producto CLSoilMaps (Dinamarca et al., 2023), específicamente la capacidad de campo (FC) y el punto de saturación del suelo (θ_s) en la cuenca. Las propiedades estimadas para la SSM son: $FC = 0,314 \text{ m}^3/\text{m}^3$ y $\theta_s = 0,488 \text{ m}^3/\text{m}^3$, y para RZSM son: $FC = 0,308 \text{ m}^3/\text{m}^3$ y $\theta_s = 0,481 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Todos los valores estimados se obtienen a partir del promedio de los valores de las celdas de la grilla contenidas dentro de la cuenca.

Durante el evento, la precipitación acumulada que registró ERA5 alcanzó cerca de 621 [mm] (diferente a lo registrado por vismet), lo cual generó un aumento evidente en los valores de humedad del suelo en la capa superficial para los tres productos analizados. Este aumento situó los niveles de humedad por sobre la capacidad de campo ($FC = 0,314 \text{ m}^3/\text{m}^3$), pero aún por debajo del punto de saturación ($\theta_s = 0,488 \text{ m}^3/\text{m}^3$), lo que indica una recarga en la zona superficial sin alcanzar condiciones de saturación.

Por otra parte, en la RZSM, también se observó un incremento de humedad: ERA5 y ERA5-Land muestran aumentos alrededor del 20-21 de agosto, mientras que GLDAS-Noah presentó un aumento más tardío, el 23 de agosto. En todos los casos, los valores en RZSM se acercaron al umbral de saturación, lo que confirma que el evento tuvo una repercusión hidrológica significativa en profundidad. Para una visualización horaria de la respuesta de la humedad de suelo al evento de precipitación, se puede consultar la Figura A.5 en el Anexo A.

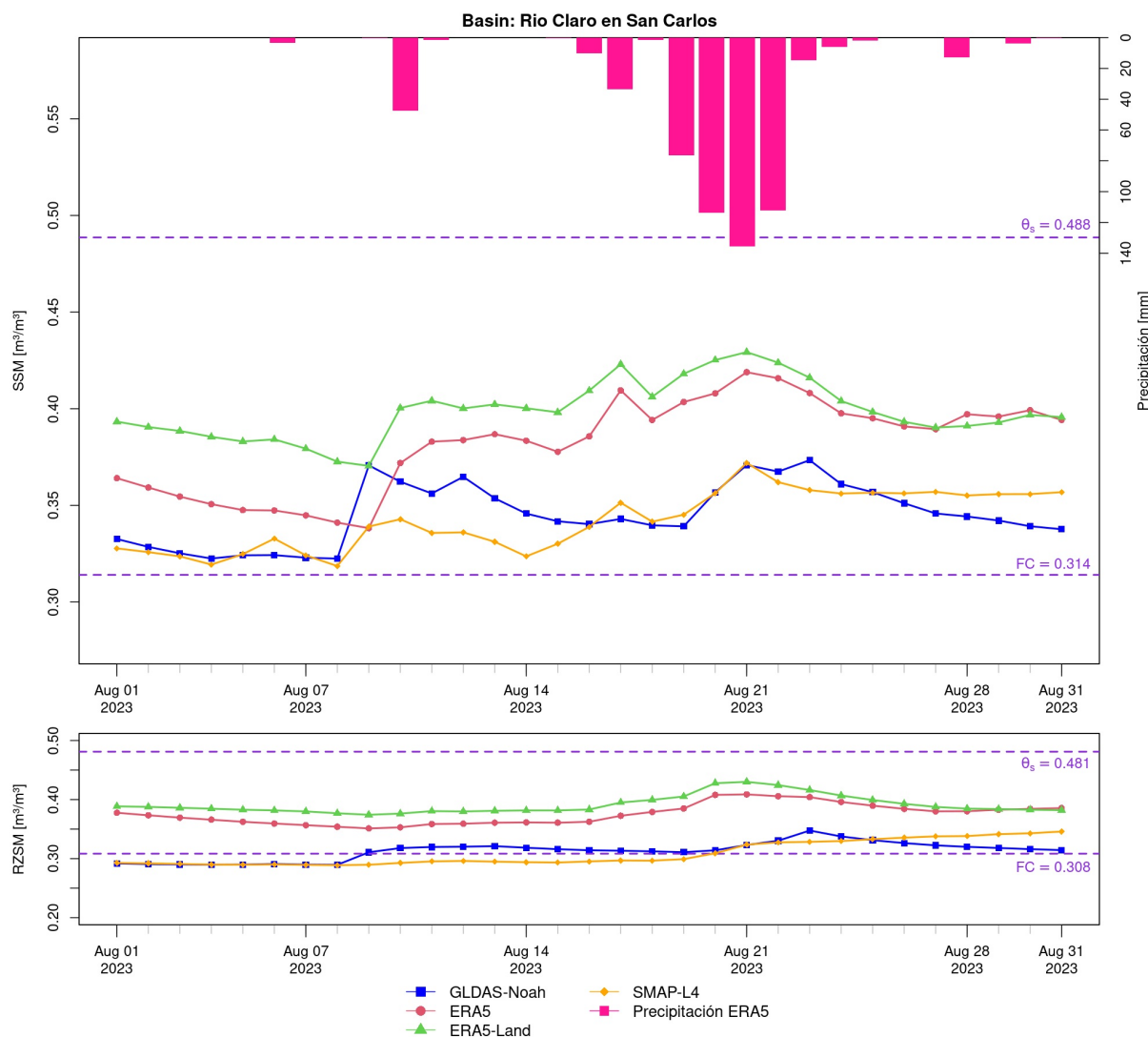


Figura 4.5: Precipitación (ERA5) vs SSM y RZSM para evento de agosto 2023 en la cuenca de Río Claro en San Carlos.

4.3.2. Monitoreo de las anomalías de humedad del suelo ante eventos de sequía

En la Figura 4.6 se muestra el valor del índice SSMI calculado el día 01 de cada mes, a distintas escalas temporales, para la RZSM. Se muestra una dinámica de anomalías para el período de 2010-2023.

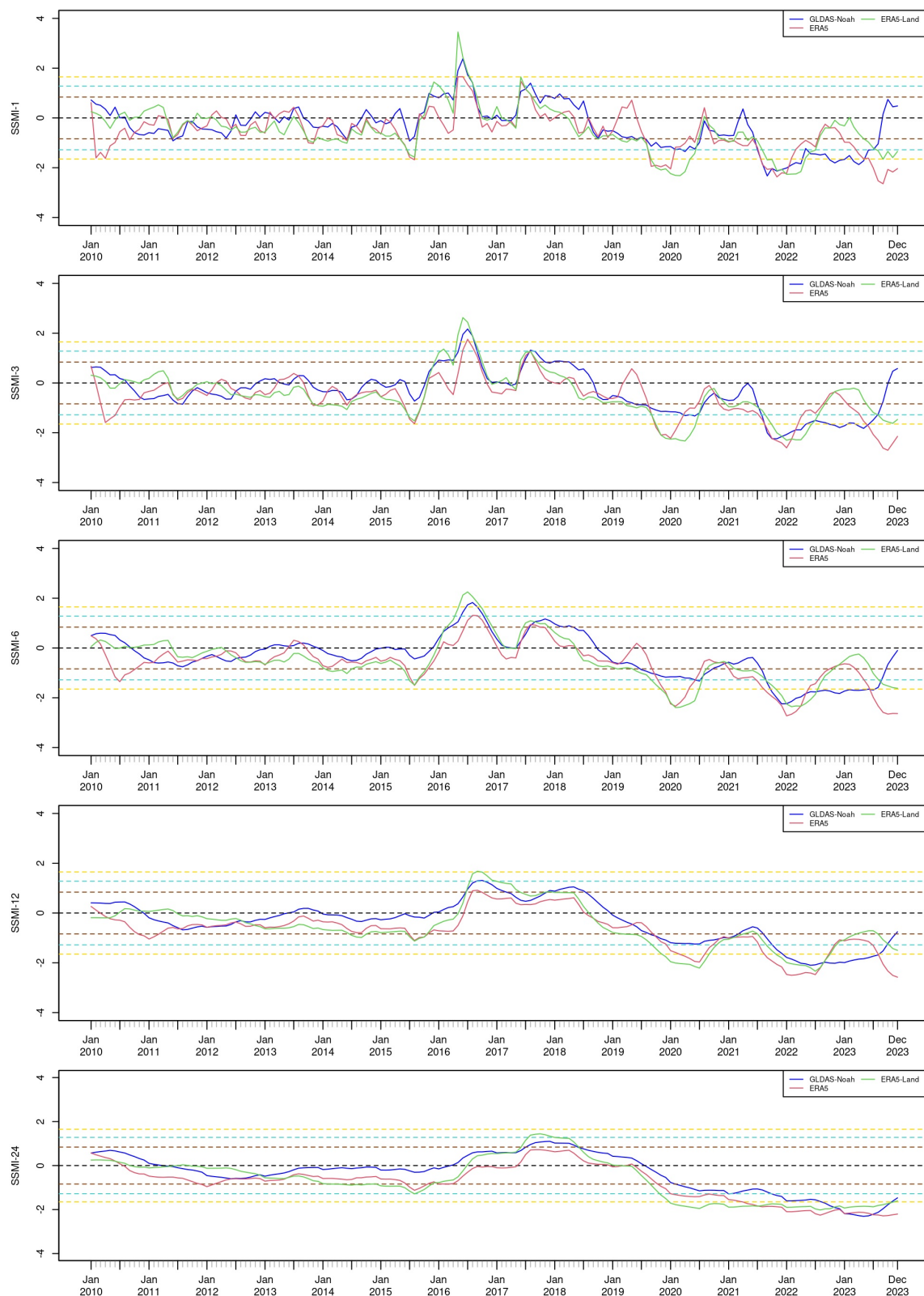


Figura 4.6: SSMI en RZSM para el día 1 del mes a distintas escalas temporales para el período 2010-2023.

La Figura 4.6 muestra que el inicio de las anomalías negativas es a mediados del año 2010, la cual se ve interrumpida por un cambio de signo en la anomalía entre mayo y julio de 2016. Este cambio de signo en la anomalía se debió a un evento intenso de precipitación que duró 4 días (01-04 junio), según lo registrado en <https://vismet.cr2.cl/>.

En la Figura 4.6, a escala mensual (SSMI-1), se observa una alta respuesta a la variabilidad diaria, con oscilaciones frecuentes entre anomalías negativas y positivas. Esta escala permite capturar de manera inmediata la respuesta del suelo a eventos intensos, aunque presenta también mayores discrepancias entre productos. Por ejemplo, en eventos como enero 2011, mayo 2012 o mayo 2021, GLDAS-Noah registra anomalías negativas, mientras que los productos ECMWF reflejan anomalías positivas, y viceversa.

La Figura 4.6 muestra que el evento de junio de 2016 se destaca como el máximo valor positivo del período, el cual se refleja con claridad desde SSMI-1 hasta SSMI-12, en la Cuenca del Río Petorca. No obstante, en la escala SSMI-24, dicho máximo aparece desplazado hacia julio-agosto de 2017, lo que pone en evidencia el desfase temporal entre escalas y cómo se acumula la humedad en capas profundas. Además, las diferencias entre productos en la Cuenca del Río Petorca persisten incluso en escalas más largas, como se observa en abril de 2019, donde ERA5 identifica una anomalía positiva, mientras que los otros productos no la registran con la misma magnitud.

La Figura 4.6 muestra que en la SSM, desde 2019 en adelante, se observa una señal persistente de anomalía negativa en las escalas más largas (SSMI-6, SSMI-12 y SSMI-24), reflejando condiciones de sequía prolongada.

Si bien es cierto que la señal de los índices estandarizados es continua y semejante entre los productos ERA5, ERA5-Land y GLDAS-Noah, sus valores volumétricos de humedad de suelo no lo son. Es por esto que la Figura 4.7 muestra los valores volumétricos espaciales, que son promediados para el período de años de 2010-2023 en SSM/RZSM en la cuenca del Río Petorca en Longotoma, los que van desde los $0,13 \text{ m}^3/\text{m}^3$ a los $0,36 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

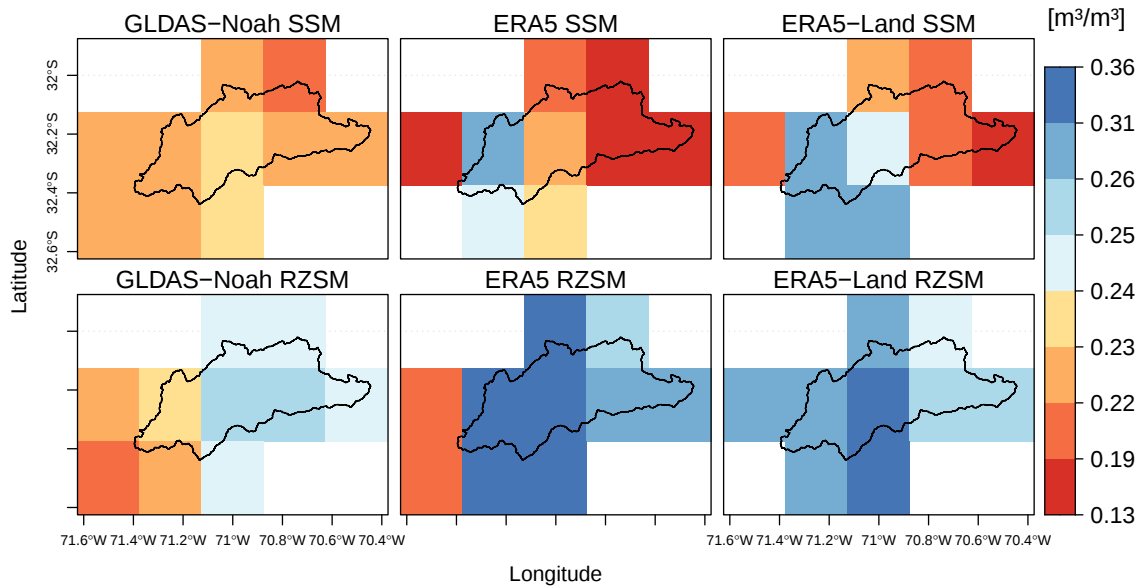


Figura 4.7: Valores volumétricos promedio de humedad del suelo m^3/m^3 para la SSM y la RZSM en el período 2010-2023.

En términos generales de la Figura 4.7, se observan diferencias importantes entre productos. Para la SSM, los valores de humedad en GLDAS-Noah se encuentran en un rango medio ($0,22-0,25 m^3/m^3$), mientras que los productos ERA5 y ERA5-Land muestran valores más bajos ($0,13-0,23 m^3/m^3$). En cambio, al analizar la RZSM, los productos ERA5 y ERA5-Land reportan valores más altos, en el rango de $0,26-0,36 m^3/m^3$, lo que evidencia una mayor capacidad de almacenamiento de agua en capas profundas, posiblemente relacionada con la parametrización de los modelos de superficie terrestre que incorporan asimilación de datos atmosféricos. Por otra parte, GLDAS-Noah mantiene valores más bajos también en RZSM, sin superar los $0,25 m^3/m^3$.

Las diferencias observadas en los valores volumétricos promedio de humedad del suelo entre productos grillados que se muestran en la Figura 4.7 son mayores que las diferencias observadas al aplicar el cálculo del SSMI, a distintas escalas, entre productos grillados, como se muestra en la Figura 4.6. Por lo que, al ser estandarizados los índices, estas diferencias se ven reducidas, permitiendo distinguir las anomalías más importantes.

4.4. Plataforma web: Pülliko

La plataforma **Pülliko** (<https://hzambran.shinyapps.io/Pulliko/>) desarrollada permite consultar y visualizar de forma interactiva los valores volumétricos de humedad del suelo y los índices estandarizados de anomalías (SSMI y ESSMI), para distintas escalas temporales. Su interfaz gráfica (Figura 4.8) se encuentra diseñada para facilitar la interacción del usuario con los datos disponibles y se estructura en torno a diversas secciones que deben ser definidas para obtener visualizaciones específicas. La Figura 4.8 muestra una interfaz adaptada de la plataforma <https://mawunnrt.cr2.cl/>.

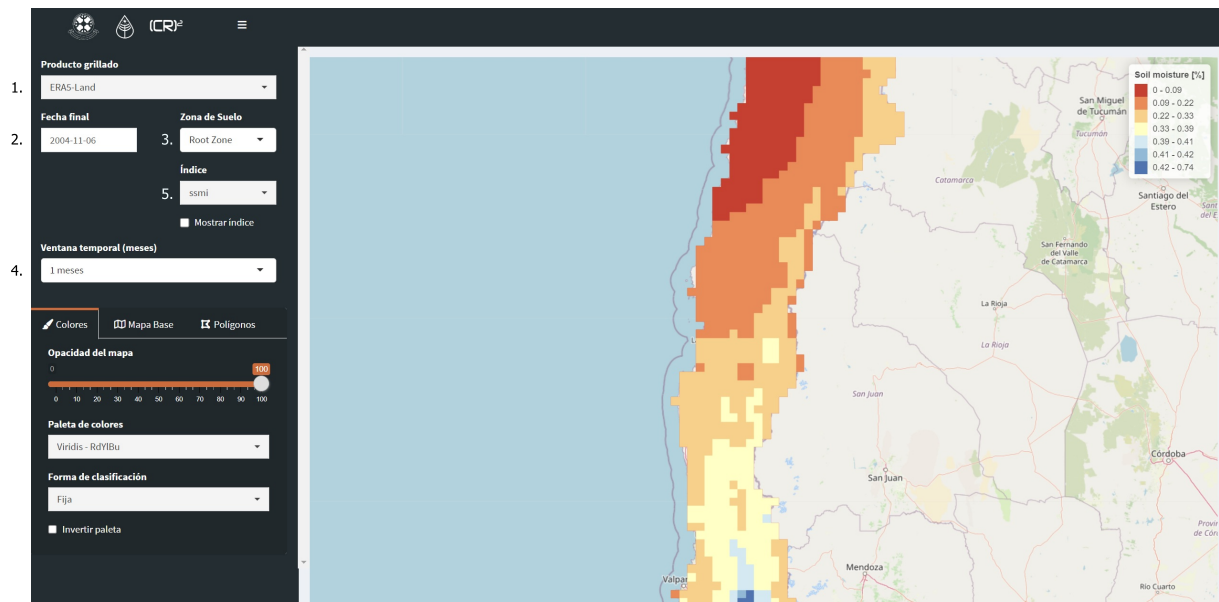


Figura 4.8: Interfaz plataforma web. Se visualizan los valores volumétricos de RZSM para Chile continental con producto grillado de ERA5-Land para el día 06/11/2004 con escala temporal de 1 mes.

Inicialmente, el usuario debe seleccionar el producto grillado de humedad del suelo (1. Producto grillado), que puede corresponder a ERA5, ERA5-Land, GLDAS-Noah y SMAP-L4, de acuerdo a lo descrito en la Sección 3.3. En el caso de visualizar los índices estandarizados, solo están disponibles ERA5, ERA5-Land y GLDAS-Noah.

Posteriormente, es necesario indicar la fecha (final) para la cual se desea visualizar el valor de humedad de suelo o del índice estandarizado (2. Fecha final).

Así como también definir la zona de almacenamiento en el perfil de suelo (3. Zona

de suelo), ya sea superficial (SSM: 0–10 cm) o zona de raíces (RZSM: 0–100 cm).

Adicionalmente, se debe seleccionar la escala temporal de agregación de los datos (4. Ventana temporal), disponible en períodos de 1, 3, 6, 12 o 24 meses, para el caso de la consulta de los índices SSMI/ESSMI. Esta selección influye directamente sobre la representación espacio-temporal de las condiciones de humedad promedio, así como también sobre la posterior estimación de los índices estandarizados, según lo descrito en la Sección 3.7. En el caso de consulta para los valores volumétricos de humedad de suelo, estos estarán disponibles para ventanas temporales diarias, donde la escala mínima es un día.

En caso de querer visualizar directamente un índice estandarizado, la plataforma permite elegir entre SSMI o ESSMI mediante la opción 5. Índice, debiendo activar adicionalmente la casilla "Mostrar índice".

Por otro lado, la visualización del resultado incluye una leyenda situada en la esquina superior derecha, que muestra la escala de valores volumétricos de humedad del suelo en m^3/m^3 . Esta leyenda utiliza una escala de colores que facilita la interpretación rápida de las condiciones del suelo, desde colores rojos (valores bajos, secos) hasta colores azules (valores altos, húmedos), cuya clasificación de colores y opacidad del mapa pueden ser ajustadas según preferencias del usuario.

4.5. Discusión

Los resultados obtenidos en la Sección 4.1 revelan una clara relación entre los valores volumétricos de humedad del suelo y el gradiente climático latitudinal de Chile continental: menor humedad en el norte y mayor contenido hacia el sur. Esta observación coincide con diversos estudios internacionales que documentan una correlación directa entre gradientes climáticos y la distribución espacial de la humedad del suelo (Dorigo et al., 2017; Albergel et al., 2020). ERA5 y ERA5-Land tienden a simular mayor humedad, particularmente en la zona centro-sur, mientras que, GLDAS-Noah y SMAP-L4 muestran estimaciones más conservadoras. Estas diferencias se mantienen entre SSM/RZSM, con mayor contraste en la RZSM, donde la acumulación de humedad varía según las distintas parametrizaciones y modelos hidrológicos subyacentes en cada producto (Fernandez-Moran et al., 2015). Estos resultados sugieren que, para

Chile continental, los productos de ECMWF (ERA5 y ERA5-Land) son más adecuados debido a su mejor representación espacial y temporal, coherente con estudios previos que destacan su buen desempeño en regiones montañosas y climáticamente heterogéneas (Demaria et al., 2013; Balmaceda-Huarte et al., 2021; Demortier et al., 2021). Por otra parte, la capacidad de GLDAS-Noah para identificar áreas físicamente restringidas, como los Campos de Hielo, representa una ventaja adicional, aportando realismo físico (Rodell et al., 2004).

Al evaluar los índices estandarizados de humedad del suelo (Sección 4.2), se constató que el índice paramétrico SSMI presentó mayor importancia a anomalías extremas en comparación con el índice no paramétrico ESSMI, el cual tiende a suavizar valores recientes debido al uso de distribuciones empíricas históricas (Palagiri and Pal, 2024). Esta observación, en la que los métodos paramétricos funcionan mejor que los métodos no paramétricos a la hora de capturar sequías extremas, es respaldada también por diversos estudios (Sol'áková et al., 2014; Hobbins et al., 2016; Tjiedeman et al., 2020; Noguera et al., 2022). Sin embargo, en condiciones extremas como las observadas en 2020, ambos índices convergen en detectar déficit hídrico severo en la zona centro-sur. Lo anterior implica la detección temprana de eventos extremos por el SSMI es rápida respecto al ESSMI, así como también una posible sobreestimación de magnitud o frecuencia de eventos extremos y con un ESSMI, al ser menos rápido a valores extremos, ofrece una evaluación más robusta y estable en series temporales con datos atípicos.

La respuesta diferencial observada entre la SSM y la RZSM concuerda con estudios previos que han demostrado que la capa superficial responde con mayor rapidez a variaciones climáticas y eventos extremos, mientras la zona radicular presenta una respuesta amortiguada pero persistente, la cual se recomienda para evaluar sequías de humedad de suelo (Entekhabi et al., 1996; Albergel et al., 2008; Hirschi et al., 2014; Martínez-Fernández et al., 2015; Mladenova et al., 2020). Esta diferenciación es crucial para comprender y anticipar los impactos hidrológicos y ecológicos, especialmente en lo referido a procesos como la evapotranspiración, la productividad agrícola, la resiliencia de los ecosistemas y la recuperación pos-sequía (Seneviratne et al., 2010; Miralles et al., 2019).

En la Sección 4.3.1, el análisis de un evento de precipitación intenso en la cuenca de Río Claro (18–22 de agosto de 2023) resalta la importancia de la información de los

valores volumétricos de humedad de suelo, ya que esto sí permitiría evaluar la magnitud de la recarga de agua en el suelo tras eventos intensos de precipitación, aportando información clave sobre la disponibilidad hídrica para la vegetación y la recarga de aguas subterráneas, factores fundamentales para el ciclo hidrológico y la productividad de ecosistemas agrícolas y naturales. Durante este evento de precipitación, la SSM superó la capacidad de campo (FC), pero no alcanzó el punto de saturación (θ_s), mientras que la RZSM se acercó a ambos umbrales, confirmando el impacto hidrológico del evento de precipitación en el suelo más profundo.

En contraste, en la cuenca del Río Petorca en Longotoma (Sección 4.3.2), se evidencia que tanto SSMI como ESSMI detectan claramente anomalías negativas sostenidas desde 2019 a 2023 y consistentes con otros estudios en Chile (Muñoz et al., 2020), confirmando resultados previos que identifican estos índices como herramientas robustas y confiables para monitorear sequías persistentes en regiones semiáridas (Carrão et al., 2016; Dorigo et al., 2017; Palagiri and Pal, 2024).

Estos resultados justifican adoptar una estrategia integrada que combine índices estandarizados paramétricos y no paramétricos junto con datos volumétricos de humedad de suelo para lograr un monitoreo completo y robusto que refleje las diversas condiciones de humedad del suelo en Chile continental. La aplicación integrada de estas herramientas permitirá analizar con mayor precisión y profundidad los impactos potenciales de eventos de precipitación o la ausencia de los mismos sobre la vegetación y el ciclo hidrológico, siendo especialmente relevante en escenarios futuros proyectados de mayor variabilidad climática (Grillakis, 2019; IPCC, 2022).

CAPÍTULO 5

Conclusiones

El presente trabajo tuvo como objetivo principal monitorear las anomalías de humedad del suelo en Chile continental, mediante el análisis de valores volumétricos de humedad de suelo y la aplicación de índices estandarizados (SSMI y ESSMI) en zonas superficial (SSM; 0-10 [cm]) y de raíces (RZSM; 0-100 [cm]), a partir de productos grillados con asimilación de datos (ERA5 Y SMAP-L4) y sin asimilación de datos (ERA5-Land y GLDAS-Noah). Para ello, se implementó una metodología reproducible de descarga automatizada, procesamiento y análisis espacio-temporal de los datos de humedad de suelo, que permitió generar valores volumétricos de humedad de suelo y anomalías de humedad de suelo a distintas escalas temporales.

Los resultados obtenidos, a partir de los valores volumétricos de humedad de suelo, confirman la existencia de un patrón espacial coherente con el gradiente climático latitudinal del país, observándose menor contenido de humedad en la zona norte ($0,00-0,20 \text{ m}^3/\text{m}^3$) y mayor valor hacia el sur ($0,30-0,75 \text{ m}^3/\text{m}^3$). Sin embargo, se identificaron discrepancias relevantes entre los productos utilizados. Mientras ERA5 y ERA5-Land tienden a sobreestimar la humedad del suelo, especialmente en la zona centro-sur (alcanzando hasta $0,50 \text{ m}^3/\text{m}^3$), SMAP-L4 y GLDAS-Noah entregan estimaciones más conservadoras (con un máximo de $0,30 \text{ m}^3/\text{m}^3$ en la misma región). Estas diferencias fueron consistentes tanto para la capa superficial como para la zona de raíces, lo que evidencia la necesidad de considerar múltiples fuentes de datos al analizar condiciones hidrológicas en regiones con escasa o nula disponibilidad de mediciones in situ.

En cuanto al comportamiento de los índices estandarizados analizados, se observó que el SSMI presentó una señal notablemente dinámica, con valores que oscilaron, en general, entre -1,65 y 1,65 a lo largo del país. Esta mayor variabilidad permitió identificar con mayor claridad condiciones extremas, tanto de déficit como de superávit hídrico. En contraste, el ESSMI mostró una señal más estable y centrada en torno a cero, con fluctuaciones más acotadas de la señal, generalmente entre -0,84 y 0,84. Esta menor amplitud de la señal dificultó la detección de clasificación (normalmente, moderadamente, severamente y extremadamente) de los estados húmedos y secos. Estas diferencias se explican por los enfoques metodológicos sobre los cuales se construyen ambos índices. El SSMI se basa en un enfoque paramétrico, que ajusta los datos a una distribución estadística teórica. Esto permite una mejor representación de los valores extremos, al modelar adecuadamente las colas de la distribución, lo que mejora su capacidad para

detectar anomalías extremas. Por el contrario, el ESSMI utiliza un enfoque no paramétrico, basado en la distribución empírica de los datos observados. Este método depende en mayor medida de la disponibilidad, representatividad y calidad de los datos, lo que puede limitar su efectividad para identificar eventos anómalos.

Además, el análisis de dos casos de estudio permitió contrastar condiciones de superávit y déficit de agua en el suelo. En la Cuenca del Río Claro en San Carlos, el análisis de los valores volumétricos de humedad del suelo permitió monitorear el aumento de humedad del suelo posterior a la ocurrencia de precipitaciones, superando la capacidad de campo ($FC = 0,308 \text{ m}^3 / \text{m}^3$) y acercándose al punto de saturación ($\theta_s = 0,481 \text{ m}^3 / \text{m}^3$), especialmente en la RZSM, mientras que, en la Cuenca del Río Petorca en Longotoma, los índices detectaron claramente anomalías negativas (entre 0,00 y -2,00) persistentes a escalas temporales de 3, 6 y 12 meses. Este resultado resalta la importancia de incluir tanto valores volumétricos de humedad del suelo como de anomalías estandarizadas, para poder monitorear la evolución del contenido de agua en el suelo en distintas escalas temporales.

No obstante, uno de los desafíos identificados es que no existe una escala temporal universal para evaluar anomalías de humedad del suelo. La elección de esta escala depende de múltiples factores, como la intensidad y duración del evento hidrológico, así como de la capacidad del suelo y del sistema hidrológico para responder a dichos desequilibrios. Por ello, se propone que el monitoreo de anomalías se evalúe en distintas ventanas temporales, adaptables al objetivo del análisis. Será el usuario, investigador o tomador de decisiones quien defina la escala más adecuada según el contexto del caso de estudio.

Como aporte tecnológico, se desarrolló un sistema de descarga y procesamiento automatizado de datos de todos los productos, el cual quedó integrado dentro de la plataforma web de visualización **Pülliko** (<https://hzambran.shinyapps.io/Pulliko/>). Esta plataforma está basada en R-Shiny, que permite monitorear en tiempo real las condiciones de humedad del suelo a lo largo del país. La plataforma propuesta en este trabajo ofrece un recurso valioso para investigadores, instituciones y tomadores de decisiones interesados en la humedad actual del suelo y análisis de anomalías estandarizadas.

Bibliografía

- Abatzoglou, J.T., Dobrowski, S.Z., Parks, S.A., Hegewisch, K.C., 2018. Terraclimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. *Scientific data* 5, 1–12.
- Abbott, T.H., Cronin, T.W., 2023. Multiple equilibria and soil moisture-precipitation feedbacks in idealized convection-permitting simulations with an open hydrological cycle. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 15, e2023MS003719.
- Adler, R.F., Huffman, G.J., Chang, A., Ferraro, R., Xie, P.P., Janowiak, J., Rudolf, B., Schneider, U., Curtis, S., Bolvin, D., et al., 2003. The version-2 global precipitation climatology project (gpcp) monthly precipitation analysis (1979–present). *Journal of hydrometeorology* 4, 1147–1167.
- Agnew, C., 2000. Using the spi to identify drought .
- Dirección General de Aguas, D., 2020. Balance de Gestión Integral 2020. Ministerio de Obras Públicas.
- Albergel, C., Rüdiger, C., Pellarin, T., Calvet, J.C., Fritz, N., Froissard, F., Suquia, D., Petitpa, A., Pignatelli, B., Martin, E., 2008. From near-surface to root-zone soil moisture using an exponential filter: an assessment of the method based on in-situ observations and model simulations. *Hydrology and Earth System Sciences* 12, 1323–1337.
- Albergel, C., Zheng, Y., Bonan, B., Dutra, E., Rodríguez-Fernández, N., Munier, S., Draper, C., de Rosnay, P., Muñoz Sabater, J., Balsamo, G., Fairbairn, D., Meurey, C., Calvet, J.C., 2020. Data assimilation for continuous global assessment of severe conditions over terrestrial surfaces. *Hydrology and Earth System Sciences* 24, 4291–4316.
- Almazroui, M., Ashfaq, M., Islam, M.N., Rashid, I.U., Kamil, S., Abid, M.A., O'Brien, E., Ismail, M., Reboita, M.S., Sörensson, A.A., et al., 2021. Assessment of cmip6 performance and projected temperature and precipitation changes over south america. *Earth Systems and Environment* 5, 155–183.
- Amani, M., Salehi, B., Mahdavi, S., Masjedi, A., Dehnavi, S., 2017. Temperature-vegetation-soil moisture dryness index (TVMDI) 197, 1–14.
- Ariyanto, D.P., Aziz, A., Komariah, K., Sumani, S., Abara, M., 2020. Comparing the accuracy of estimating soil moisture using the standardized precipitation index (spi) and the standardized precipitation evapotranspiration index (spei). *SAINS TANAH- Journal of Soil Science and Agroclimatology* 17, 23–29.

- Baez-Villanueva, O.M., Zambrano-Bigiarini, M., Miralles, D.G., Beck, H.E., Siegmund, J.F., Alvarez-Garreton, C., Verbist, K., Garreaud, R., Boisier, J.P., Galleguillos, M., 2024. On the timescale of drought indices for monitoring streamflow drought considering catchment hydrological regimes. *Hydrology and Earth System Sciences* 28, 1415–1439.
- Balmaceda-Huarte, R., Olmo, M.E., Bettolli, M.L., Poggi, M.M., 2021. Evaluation of multiple reanalyses in reproducing the spatio-temporal variability of temperature and precipitation indices over southern south america. *International Journal of Climatology* 41, 5572–5595.
- Bao, Y., Lin, L., Wu, S., Deng, K.A.K., Petropoulos, G.P., 2018. Surface soil moisture retrievals over partially vegetated areas from the synergy of sentinel-1 and landsat 8 data using a modified water-cloud model. *International journal of applied earth observation and geoinformation* 72, 76–85.
- Bathurst, J.C., Fahey, B., Iroumé, A., Jones, J., 2020. Forests and floods: using field evidence to reconcile analysis methods. *Hydrological Processes* 34, 3295–3310.
- Bathurst, J.C., Hagon, H., Hambly Barton, F., Iroumé, A., Kilbride, A., Kilsby, C., 2022. Partial afforestation has uncertain effect on flood frequency and peak discharge at large catchment scales (100–1000 km²), south-central chile. *Hydrological Processes* 36, e14585.
- Beaudoing, H., Rodell, M., et al., 2020. Gldas noah land surface model l4 monthly 0.25 x 0.25 degree v2. 1. Greenbelt, Maryland .
- Beck, H.E., McVicar, T.R., Vergopolan, N., Berg, A., Lutsko, N.J., Dufour, A., Zeng, Z., Jiang, X., van Dijk, A.I., Miralles, D.G., 2023. High-resolution (1 km) köppen-geiger maps for 1901–2099 based on constrained cmip6 projections. *Scientific data* 10, 724.
- Beck, H.E., Pan, M., Miralles, D.G., Reichle, R.H., Dorigo, W.A., Hahn, S., Sheffield, J., Karthikeyan, L., Balsamo, G., Parinussa, R.M., et al., 2021. Evaluation of 18 satellite- and model-based soil moisture products using in situ measurements from 826 sensors. *Hydrology and Earth System Sciences* 25, 17–40.
- Beguería, S., Vicente-Serrano, S.M., Beguería, M.S., 2017. Package ‘spei’. Calculation of the Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index, CRAN [Package] .

- Berg, A., Sheffield, J., 2018. Climate change and drought: the soil moisture perspective 4, 180–191.
- Bolin, B., 1959. atmosphere and the sea in motion: scientific contributions to the rossby memorial volume.
- Brocca, L., Ciabatta, L., Massari, C., Camici, S., Tarpanelli, A., 2017. Soil moisture for hydrological applications: Open questions and new opportunities. *Water* 9, 140.
- Brocca, L., Melone, F., Moramarco, T., Morbidelli, R., 2009. Soil moisture temporal stability over experimental areas in central italy. *Geoderma* 148, 364–374.
- Bronfman, N.C., Nikole, G.M., Castañeda, J.V., Cisternas, P., Repetto, P.B., 2024. Relationship between social vulnerability and community resilience: A geospatial study in the context of natural disasters. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 112, 104774.
- Cai, W., McPhaden, M.J., Grimm, A.M., Rodrigues, R.R., Taschetto, A.S., Garreaud, R.D., Dewitte, B., Poveda, G., Ham, Y.G., Santoso, A., et al., 2020. Climate impacts of the el niño–southern oscillation on south america. *Nature Reviews Earth & Environment* 1, 215–231.
- Campos, D., Rondanelli, R., 2023. Enso-related precipitation variability in central chile: The role of large scale moisture transport. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 128, e2023JD038671.
- Carrão, H., Russo, S., Sepulcre-Canto, G., Barbosa, P., 2016. An empirical standardized soil moisture index for agricultural drought assessment from remotely sensed data. *International journal of applied earth observation and geoinformation* 48, 74–84.
- Center, N.G.S.F., 2022. README Document for NASA GLDAS Version 2 Data Products. Technical Report. Greenbelt, MD, USA. Last revised October 13, 2022.
- Center, N.G.S.F., 2025. North american land data assimilation system (nca-ldas) faq.
- Chan, S., 2016. Enhanced level 3 passive soil moisture product specification document. Jet Propulsion Lab., California Inst. Technol.: Pasadena, CA, USA .
- Chang, W., Cheng, J., Allaire, J., Xie, Y., McPherson, J., 2015. Package ‘shiny’. See <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download> .

- Chen, F., Mitchell, K., Schaake, J., Xue, Y., Pan, H.L., Koren, V., Duan, Q.Y., Ek, M., Betts, A., 1996. Modeling of land surface evaporation by four schemes and comparison with fife observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 101, 7251–7268.
- Cheng, J., Karambelkar, B., Xie, Y., Wickham, H., Russell, K., Johnson, K., Schloerke, B., Agafonkin, V., 2019. Package ‘leaflet’. R package version 2, 1.
- Clem, K.R., Fogt, R.L., 2013. Varying roles of enso and sam on the antarctic peninsula climate in austral spring. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 118, 11–481.
- Contreras, M.T., Escauriaza, C., 2020. Modeling the effects of sediment concentration on the propagation of flash floods in an andean watershed. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 20, 221–241.
- Corporación Nacional Forestal, C., 2021. Cobertura de suelo en chile.
- Daniels, L.D., Veblen, T.T., 2000. Enso effects on temperature and precipitation of the patagonian-andean region: implications for biogeography. *Physical Geography* 21, 223–243.
- Dätwyler, C., Grosjean, M., Steiger, N.J., Neukom, R., 2020. Teleconnections and relationship between the el niño–southern oscillation (enso) and the southern annular mode (sam) in reconstructions and models over the past millennium. *Climate of the Past* 16, 743–756.
- Davis, R.E., 1976. Predictability of sea surface temperature and sea level pressure anomalies over the north pacific ocean. *Journal of Physical Oceanography* 6, 249–266.
- Demaria, E., Maurer, E.P., Sheffield, J., Bustos, E., Poblete, D., Vicuña, S., Meza, F., 2013. Using a gridded global dataset to characterize regional hydroclimate in central chile. *Journal of Hydrometeorology* 14, 251–265.
- Demortier, A., Bozkurt, D., Jacques-Coper, M., 2021. Identifying key driving mechanisms of heat waves in central chile. *Climate Dynamics* 57, 2415–2432.
- Deng, K.A.K., Lamine, S., Pavlides, A., Petropoulos, G.P., Bao, Y., Srivastava, P.K., Guan, Y., 2019. Large scale operational soil moisture mapping from passive mw radiometry: Smos product evaluation in europe & usa. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 80, 206–217.

- Dinamarca, D.I., Galleguillos, M., Seguel, O., Faúndez Urbina, C., 2023. Clsoilmaps: A national soil gridded database of physical and hydraulic soil properties for chile. *Scientific Data* 10, 630.
- Dirmeyer, P.A., Koster, R.D., Guo, Z., 2006. Do global models properly represent the feedback between land and atmosphere? *Journal of Hydrometeorology* 7, 1177–1198.
- Donoso Zegers, C., et al., 1993. Bosques templados de chile y argentina. variación, estructura y dinámica. *ecología forestal* .
- Dorigo, W., Wagner, W., Albergel, C., Albrecht, F., Balsamo, G., Brocca, L., Chung, D., Ertl, M., Forkel, M., Gruber, A., Haas, E., Hamer, P.D., Hirschi, M., Ikonen, J., De Jeu, R., Kidd, R., Lahoz, W., Liu, Y.Y., Miralles, D., Mistelbauer, T., Nicolai-Shaw, N., Parinussa, R., Pratola, C., Reimer, C., Van Der Schalie, R., Seneviratne, S.I., Smolander, T., Lecomte, P., 2017. ESA CCI soil moisture for improved earth system understanding: State-of-the art and future directions 203, 185–215.
- Entekhabi, D., Reichle, R.H., Koster, R.D., Crow, W.T., 2010. Performance metrics for soil moisture retrievals and application requirements. *Journal of Hydrometeorology* 11, 832–840.
- Entekhabi, D., Rodriguez-Iturbe, I., Castelli, F., 1996. Mutual interaction of soil moisture state and atmospheric processes. *Journal of Hydrology* 184, 3–17.
- Entekhabi, D., Yueh, S., De Lannoy, G., 2014. *Smmap handbook* .
- Europea, C., 2007. Addressing the challenge of water scarcity and droughts in the european union. Communication from the Commission to the European Parliament and the Council, COM (2007) 414.
- Fahey, B., Payne, J., 2017. The glendhu experimental catchment study, upland east otago, new zealand: 34 years of hydrological observations on the afforestation of tussock grasslands. *Hydrological Processes* 31, 2921–2934.
- FAO, 2019. The State of the World’s Biodiversity for Food and Agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Fernandez-Moran, R., Wigneron, J.P., Lopez-Baeza, E., Miernecki, M., Salgado-Hernanz, P., Coll, M., Kerr, Y.H., Schwank, M., 2015. Validación a largo plazo de datos de nivel 3 de tierra de smos con medidas de elbara-ii en la valencia anchor station. *Revista de Teledetección* 43, 55–62.

- Fogt, R.L., Bromwich, D.H., Hines, K.M., 2011. Understanding the sam influence on the south pacific enso teleconnection. *Climate dynamics* 36, 1555–1576.
- Fogt, R.L., Marshall, G.J., 2020. The southern annular mode: variability, trends, and climate impacts across the southern hemisphere. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 11, e652.
- Frugone, M., Latorre, C., Barreiro Lostres, F., Giralt, S., Moreno, A., Polanco Martínez, J., Maldonado, A., Carrevedo, M.L., Bernardez, P., Prego, R., et al., 2020. Volcanism and climate change as drivers in holocene depositional dynamic of laguna del maule (andes of central chile-36 degrees s) .
- Fuentealba, M., Bahamóndez, C., Sarricolea, P., Meseguer-Ruiz, O., Latorre, C., 2021. The 2010–2020‘megadrought’drives reduction in lake surface area in the andes of central chile (32°-36°s). *Journal of Hydrology: Regional Studies* 38, 100952.
- Furtak, K., Wolińska, A., 2023. The impact of extreme weather events as a consequence of climate change on the soil moisture and on the quality of the soil environment and agriculture—a review. *Catena* 231, 107378.
- Gao, X., Zhao, X., Brocca, L., Huo, G., Lv, T., Wu, P., 2017. Depth scaling of soil moisture content from surface to profile: Multistation testing of observation operators. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 2017, 1–25.
- Garreaud, R.D., Alvarez-Garretón, C., Barichivich, J., Boisier, J.P., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., Zambrano-Bigiarini, M., 2017. The 2010–2015 megadrought in central chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation 21, 6307–6327.
- Garreaud, R.D., Boisier, J.P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H.H., Veloso-Aguila, D., 2020. The central chile mega drought (2010–2018): a climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology* 40, 421–439.
- Garreaud, R.D., Vuille, M., Clement, A.C., 2003. The climate of the altiplano: Observed current conditions and mechanisms of past changes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 194, 5–22.
- Garreaud, R.D., Vuille, M., Compagnucci, R., Marengo, J., 2009. Present-day south american climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 281, 180–195.

- Garreaud Salazar, R., 2018. Record-breaking climate anomalies lead to severe drought and environmental disruption in western patagonia in 2016 .
- Gerdener, H., Kusche, J., Schulze, K., Döll, P., Klos, A., 2023. The global land water storage data set release 2 (glws2. 0) derived via assimilating grace and grace-fo data into a global hydrological model. *Journal of Geodesy* 97, 73.
- Gillett, N.P., Kell, T.D., Jones, P., 2006. Regional climate impacts of the southern annular mode. *Geophysical Research Letters* 33.
- Gomis-Cebolla, J., Rattayova, V., Salazar-Galán, S., Francés, F., 2023. Evaluation of era5 and era5-land reanalysis precipitation datasets over spain (1951–2020). *Atmospheric Research* 284, 106606.
- Gong, T., Feldstein, S.B., Luo, D., 2013. A simple gcm study on the relationship between enso and the southern annular mode. *Journal of the Atmospheric Sciences* 70, 1821–1832.
- González-Zamora, Á., Sánchez, N., Martínez-Fernández, J., Wagner, W., 2016. Root-zone plant available water estimation using the smos-derived soil water index. *Advances in Water Resources* 96, 339–353.
- Goodrich, G.B., 2007. Influence of the pacific decadal oscillation on winter precipitation and drought during years of neutral enso in the western united states. *Weather and forecasting* 22, 116–124.
- Graf, M., Arnault, J., Fersch, B., Kunstmann, H., 2021. Is the soil moisture precipitation feedback enhanced by heterogeneity and dry soils? a comparative study. *Hydrological Processes* 35, e14332.
- Grillakis, M., Koutroulis, A., Komma, J., Tsanis, I., Wagner, W., Blöschl, G., 2016. Initial soil moisture effects on flash flood generation – a comparison between basins of contrasting hydro-climatic conditions 541, 206–217.
- Grillakis, M.G., 2019. Increase in severe and extreme soil moisture droughts for europe under climate change. *Science of the Total Environment* 660, 1245–1255.
- Guo, Z., Dirmeyer, P.A., Koster, R.D., Sud, Y., Bonan, G., Oleson, K.W., Chan, E., Versegny, D., Cox, P., Gordon, C., et al., 2006. Glace: the global land–atmosphere coupling experiment. part ii: analysis. *Journal of Hydrometeorology* 7, 611–625.

- Han, H., Choi, C., Kim, J., Morrison, R.R., Jung, J., Kim, H.S., 2021. Multiple-depth soil moisture estimates using artificial neural network and long short-term memory models 13, 2584.
- He, X., Pan, M., Wei, Z., Wood, E.F., Sheffield, J., 2020. A global drought and flood catalogue from 1950 to 2016. *Bulletin of the American Meteorological Society* 101, E508 – E535.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Sabater, J.M., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., et al., 2023. Era5 hourly data on pressure levels from 1940 to present: Tech. rep.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R.J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., Thépaut, J.N., 2020. The era5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 146, 1999–2049. <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/qj.3803>.
- Hijmans, R.J., Bivand, R., Forner, K., Ooms, J., Pebesma, E., Sumner, M.D., 2022. Package ‘terra’. Maintainer: Vienna, Austria 384.
- Hirschi, M., Mueller, B., Dorigo, W., Seneviratne, S.I., 2014. Using remotely sensed soil moisture for land–atmosphere coupling diagnostics: The role of surface vs. root-zone soil moisture variability. *Remote sensing of environment* 154, 246–252.
- Hlavcova, H., Kohnova, S., Kubes, R., Szolgay, J., Zvolensky, M., 2005. An empirical method for estimating future flood risks for flood warnings 9, 431–448.
- Hobbins, M.T., Ramírez, J.A., Brown, T.C., 2004. Trends in pan evaporation and actual evapotranspiration across the conterminous us: Paradoxical or complementary? *Geophysical Research Letters* 31.
- Hobbins, M.T., Wood, A., McEvoy, D.J., Huntington, J.L., Morton, C., Anderson, M., Hain, C., 2016. The evaporative demand drought index. part i: Linking drought evolution to variations in evaporative demand 17, 1745–1761.

- Houston, J., Hartley, A.J., 2003. The central andean west-slope rainshadow and its potential contribution to the origin of hyper-aridity in the atacama desert. *International Journal of Climatology* 23, 1453–1464.
- Huffman, G.J., Adler, R.F., Morrissey, M.M., Bolvin, D.T., Curtis, S., Joyce, R., McGavock, B., Susskind, J., 2001. Global precipitation at one-degree daily resolution from multisatellite observations. *Journal of hydrometeorology* 2, 36–50.
- Huning, L.S., AghaKouchak, A., 2020. Global snow drought hot spots and characteristics 117, 19753–19759.
- IPCC, 2022. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Working Group II contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Islam, S., Engman, T., 1996. Why bother for 0.0001 % of earth's water? challenges for soil moisture research 77, 420–420.
- Jaeger, E.B., Seneviratne, S.I., 2011. Impact of soil moisture–atmosphere coupling on european climate extremes and trends in a regional climate model. *Climate Dynamics* 36, 1919–1939.
- Kerr, Y.H., Waldteufel, P., Wigneron, J.P., Delwart, S., Cabot, F., Boutin, J., Escorihuela, M.J., Font, J., Reul, N., Gruhier, C., Juglea, S.E., Drinkwater, M.R., Hahne, A., Martín-Neira, M., Mecklenburg, S., 2010. The smos mission: New tool for monitoring key elements of the global water cycle. *Proceedings of the IEEE* 98, 666–687.
- Kim, J.E., Hong, S.Y., 2007. Impact of soil moisture anomalies on summer rainfall over east asia: A regional climate model study. *Journal of Climate* 20, 5732–5743.
- Komma, J., Reszler, C., Blöschl, G., Haiden, T., 2007. Ensemble prediction of floods – catchment non-linearity and forecast probabilities 7, 431–444.
- Koren, V., Schaake, J., Mitchell, K., Duan, Q.Y., Chen, F., Baker, J., 1999. A parameterization of snowpack and frozen ground intended for ncep weather and climate models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 104, 19569–19585.
- Koster, R.D., Dirmeyer, P.A., Guo, Z., Bonan, G., Chan, E., Cox, P., Gordon, C., Kanae, S., Kowalczyk, E., Lawrence, D., et al., 2004. Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation. *Science* 305, 1138–1140.

- Koster, R.D., Suarez, M.J., Ducharne, A., Stieglitz, M., Kumar, P., 2000. A catchment-based approach to modeling land surface processes in a general circulation model: 1. model structure. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 105, 24809–24822.
- Koster, R.D., Sud, Y., Guo, Z., Dirmeyer, P.A., Bonan, G., Oleson, K.W., Chan, E., Verseghy, D., Cox, P., Davies, H., et al., 2006. Glace: the global land–atmosphere coupling experiment. part i: overview. *Journal of Hydrometeorology* 7, 590–610.
- Leung, L.R., Huang, M., Qian, Y., Liang, X., 2011. Climate–soil–vegetation control on groundwater table dynamics and its feedbacks in a climate model. *Climate Dynamics* 36, 57–81.
- Liang, X., Lettenmaier, D.P., Wood, E.F., Burges, S.J., 1994. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 99, 14415–14428.
- Liu, D., Wang, G., Mei, R., Yu, Z., Yu, M., 2013. Impact of initial soil moisture anomalies on climate mean and extremes over asia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 119, 529–545. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/2013JD020890>.
- Liu, E., Zhu, Y., Calvet, J.C., Lü, H., Bonan, B., Zheng, J., Gou, Q., Wang, X., Ding, Z., Xu, H., et al., 2024. Evaluation of root zone soil moisture products over the huai river basin. *Hydrology and Earth System Sciences* 28, 2375–2400.
- Liu, Y., Yu, X., Dang, C., Yue, H., Wang, X., Niu, H., Zu, P., Cao, M., 2023. A dryness index TSWDI based on land surface temperature, sun-induced chlorophyll fluorescence, and water balance 202, 581–598.
- Lou, J., Holbrook, N.J., O’Kane, T.J., 2019. South pacific decadal climate variability and potential predictability. *Journal of Climate* 32, 6051–6069.
- López, P., Garreaud, R., Alvarez-Garretón, C., 2021. Hydroclimatic projections for chile: Future changes in streamflow and water availability. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 38, 100957.
- Magrin, G.O., Marengo, J.A., Boulanger, J.P., Buckeridge, M.S., Castellanos López, E.J., Poveda, G., Scarano, F.R., Vicuña, S., Alfaro Martínez, E.J., Anthelme, F., et al., 2014. Central and south america .

- Mantua, N.J., Hare, S.R., 2002. The pacific decadal oscillation. *Journal of oceanography* 58, 35–44.
- Mantua, N.J., Hare, S.R., Zhang, Y., Wallace, J.M., Francis, R.C., 1997. A pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bulletin of the american Meteorological Society* 78, 1069–1080.
- Mardones, P., Garreaud, R.D., 2020. Future changes in the free tropospheric freezing level and rain–snow limit: The case of central chile. *Atmosphere* 11, 1259.
- Martínez-Fernández, J., González-Zamora, A., Sánchez, N., Gumuzzio, A., 2015. A soil water based index as a suitable agricultural drought indicator. *Journal of Hydrology* 522, 265–273.
- Masiokas, M.H., Villalba, R., Christie, D.A., Betman, E., Luckman, B.H., LeQuesne, C., Prieto, M.d.C., Mauget, S., 2020. Snowpack variations in the central andes of argentina and chile, 1951-2005: Large-scale atmospheric influences and implications for water resources in the region. *Journal of Hydrometeorology* 7, 966–984.
- Massari, C., Brocca, L., Moramarco, T., Tramblay, Y., Lescot, J.F.D., 2014. Potential of soil moisture observations in flood modelling: Estimating initial conditions and correcting rainfall. *Advances in Water Resources* 74, 44–53.
- Massari, C., Brocca, L., Tarpanelli, A., Moramarco, T., 2015. Data assimilation of satellite soil moisture into rainfall-runoff modelling: A complex recipe? *Remote Sensing* 7, 11403–11433.
- McKee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J., et al., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales, in: *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, Boston. pp. 179–183.
- Mei, R., Wang, G., 2011. Impact of sea surface temperature and soil moisture on summer precipitation in the united states based on observational data. *Journal of Hydrometeorology* 12, 1086–1099.
- Mei, R., Wang, G., 2012. Summer land–atmosphere coupling strength in the united states: Comparison among observations, reanalysis data, and numerical models. *Journal of Hydrometeorology* 13, 1010–1022.

- Meza, L., Corso, S., Soza, S., 2010. Gestión del riesgo de sequía y otros eventos climáticos extremos en Chile. Organización de Las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Servicio Nacional de Geología y Minería, S., 2020. Ojos del salado: El volcán más alto del mundo.
- Miralles, D.G., Bonte, O., Koppa, A., Baez-Villanueva, O.M., Tronquo, E., Zhong, F., Beck, H.E., Hulsman, P., Dorigo, W., Verhoest, N.E., et al., 2025. Glean4: global land evaporation and soil moisture dataset at 0.1 resolution from 1980 to near present. *Scientific data* 12, 416.
- Miralles, D.G., Gentile, P., Seneviratne, S.I., Teuling, A.J., 2019. Land-atmospheric feedbacks during droughts and heatwaves: state of the science and current challenges. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1436, 19–35.
- Mladenova, I.E., Bolten, J.D., Crow, W., Sazib, N., Reynolds, C., 2020. Agricultural drought monitoring via the assimilation of smap soil moisture retrievals into a global soil water balance model. *Frontiers in big Data* 3, 10.
- Montecinos, A., Aceituno, P., 2003. Seasonal diagnostic and predictability of rainfall in subtropical south america based on tropical pacific sst.
- Montecinos, A., Gomez, F., 2010. Enso modulation of the upwelling season off southern-central chile. *Geophysical Research Letters* 37.
- Muñoz, A.A., Klock-Barría, K., Alvarez-Garreton, C., Aguilera-Betti, I., González-Reyes, Á., Lastra, J.A., Chávez, R.O., Barría, P., Christie, D., Rojas-Badilla, M., et al., 2020. Water crisis in petorca basin, chile: The combined effects of a mega-drought and water management. *Water* 12, 648.
- Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., Boussetta, S., Choulga, M., Harrigan, S., Hersbach, H., et al., 2021. Era5-land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth system science data* 13, 4349–4383.
- Nagler, T., Vatter, T., Nagler, M.T., 2025. Package ‘kde1d’.
- Narasimhan, B., Srinivasan, R., 2005. Development and evaluation of soil moisture deficit index (SMDI) and evapotranspiration deficit index (ETDI) for agricultural drought monitoring 133, 69–88.

- Newman, M., Alexander, M.A., Ault, T.R., Cobb, K.M., Deser, C., Di Lorenzo, E., Mantua, N.J., Miller, A.J., Minobe, S., Nakamura, H., et al., 2016. The pacific decadal oscillation, revisited. *Journal of Climate* 29, 4399–4427.
- Nogueira, M., Albergel, C., Boussetta, S., Johannsen, F., Trigo, I.F., Ermida, S.L., Martins, J.P., Dutra, E., 2020. Role of vegetation in representing land surface temperature in the chessel (cy45r1) and surfex-isba (v8. 1) land surface models: A case study over iberia. *Geoscientific Model Development* 13, 3975–3993.
- Noguera, I., Vicente-Serrano, S.M., Domínguez-Castro, F., Reig, F., 2022. Assessment of parametric approaches to calculate the evaporative demand drought index. *International Journal of Climatology* 42, 834–849.
- Núñez Ibarra, D.A., 2024. Evaluación de la humedad de suelo estimada mediante productos grillados en la zona centro-sur de chile.
- O'Neill, P., Entekhabi, D., Njoku, E., Kellogg, K., 2010. The nasa soil moisture active passive (smap) mission: Overview, in: 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, pp. 3236–3239.
- Ortenzi, S., Massari, C., Ciabatta, L., Cencetti, C., Dionigi, M., Marchesini, I., Stelluti, M., Di Matteo, L., 2025. Leveraging smap-based soil moisture to identify runoff thresholds on flash flood-prone basins in the mediterranean region. *Journal of Hydrometeorology* .
- Palagiri, H., Pal, M., 2024. Parametric and non-parametric indices for agricultural drought assessment using esacci soil moisture data over the southern plateau and hills, india. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 134, 104175.
- Palmer, W.C., 1968. Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: the new crop moisture index.
- Parinussa, R.M., Holmes, T.R.H., Wanders, N., Dorigo, W.A., de Jeu, R.A.M., 2015. A preliminary study toward consistent soil moisture from amsr2. *Journal of Hydrometeorology* 16, 932 – 947.
- Pettorelli, N., Vik, J.O., Mysterud, A., Gaillard, J.M., Tucker, C.J., Stenseth, N.C., 2005. Using the satellite-derived ndvi to assess ecological responses to environmental change. *Trends in ecology & evolution* 20, 503–510.

- Posner, A., Georgakakos, K., Shamir, E., 2014. MODIS inundation estimate assimilation into soil moisture accounting hydrologic model: A case study in southeast asia 6, 10835–10859.
- Quadros, A.F., Zimmer, M., 2018. Aboveground macrodetritivores and belowground soil processes: insights on species redundancy. *Applied Soil Ecology* 124, 83–87.
- R Core Team, 2025. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria.
- Reichle, R., De Lannoy, G., Koster, R., Crow, W., Kimball, J., Liu, Q., 2018. Smap l4 global 3-hourly 9 km ease-grid surface and root zone soil moisture geophysical data, version 4.
- Reichle, R.H., De Lannoy, G.J., Liu, Q., Ardizzone, J.V., Colliander, A., Conaty, A., Crow, W., Jackson, T.J., Jones, L.A., Kimball, J.S., et al., 2017. Assessment of the smap level-4 surface and root-zone soil moisture product using in situ measurements. *Journal of hydrometeorology* 18, 2621–2645.
- Reichle, R.H., Liu, Q., Ardizzone, J.V., Crow, W.T., De Lannoy, G.J., Dong, J., Kimball, J.S., Koster, R.D., 2021. The contributions of gauge-based precipitation and smap brightness temperature observations to the skill of the smap level-4 soil moisture product. *Journal of Hydrometeorology* 22, 405–424.
- Rienecker, M.M., Suarez, M.J., Todling, R., Bacmeister, J., Takacs, L., Liu, H.C., Gu, W., Sienkiewicz, M., Koster, R.D., Gelaro, R., Stajner, I., Nielsen, J.E., 2008. The GEOS-5 Data Assimilation System – Documentation of Versions 5.0.1, 5.1.0, and 5.2.0. Technical Report. NASA Tech. Rep. Series on Global Modeling and Data Assimilation.
- Rodell, M., Houser, P., Jambor, U., Gottschalck, J., Mitchell, K., Meng, C.J., Arsenault, K., Cosgrove, B., Radakovich, J., Bosilovich, M., et al., 2004. The global land data assimilation system. *Bulletin of the American Meteorological society* 85, 381–394.
- Rouse Jr, J.W., Haas, R.H., Deering, D., Schell, J., Harlan, J.C., 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation.
- Ruiz-Barradas, A., Nigam, S., 2006. Great plains hydroclimate variability: The view from north american regional reanalysis. *Journal of climate* 19, 3004–3010.
- Salazar, Á., Thatcher, M., Goubanova, K., Bernal, P., Gutiérrez, J., Squeo, F., 2024. Cmpip6 precipitation and temperature projections for chile. *Climate Dynamics* 62, 2475–2498.

- Seneviratne, S.I., Corti, T., Davin, E.L., Hirschi, M., Jaeger, E.B., Lehner, I., Orlowsky, B., Teuling, A.J., 2010. Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Science Reviews* 99, 125–161.
- Seneviratne, S.I., Lüthi, D., Litschi, M., Schär, C., 2006. Land–atmosphere coupling and climate change in europe. *Nature* 443, 205–209.
- Shaw, T.E., Ulloa, G., Farías-Barahona, D., Fernandez, R., Lattus, J.M., McPhee, J., 2021. Glacier albedo reduction and drought effects in the extratropical andes, 1986–2020. *Journal of Glaciology* 67, 158–169.
- Sheather, S.J., Jones, M.C., 1991. A reliable data-based bandwidth selection method for kernel density estimation. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)* 53, 683–690.
- Sheffield, J., Goteti, G., Wen, F., Wood, E.F., 2004. A simulated soil moisture based drought analysis for the united states. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 109.
- Sims, A.P., Niyogi, D.d.S., Raman, S., 2002. Adopting drought indices for estimating soil moisture: A north carolina case study. *Geophysical Research Letters* 29, 24–1.
- Sol’áková, T., De Michele, C., Vezzoli, R., 2014. Comparison between parametric and nonparametric approaches for the calculation of two drought indices: Spi and ssi. *Journal of Hydrologic Engineering* 19, 04014010.
- Soulsby, C., Dick, J., Scheliga, B., Tetzlaff, D., 2017. Taming the flood-how far can we go with trees? *Hydrological Processes* 31.
- Sridhar, V., Hubbard, K.G., You, J., Hunt, E.D., 2008. Development of the soil moisture index to quantify agricultural drought and its “user friendliness” in severity-area-duration assessment. *Journal of Hydrometeorology* 9, 660–676.
- Staudinger, M., Kauzlaric, M., Mas, A., Evin, G., Hingray, B., Viviroli, D., 2025. The role of antecedent conditions in translating precipitation events into extreme floods at the catchment scale and in a large-basin context. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 25, 247–265.
- Stöwhas Borghetti, L., 2017. Fundamentos de Hidrología aplicada.

- Sujud, L.H., Jaafar, H.H., 2022. A global dynamic runoff application and dataset based on the assimilation of gpm, smap, and gcn250 curve number datasets. *Scientific Data* 9, 706.
- Sun, Y., Wu, Z., Xu, X., Wohlberg, B., Kamilov, U.S., 2021. Scalable plug-and-play admm with convergence guarantees. *IEEE Transactions on Computational Imaging* 7, 849–863.
- Svoboda, M., Hayes, M., Wood, D., 2012. Standardized precipitation index: user guide .
- Tallaksen, L.M., Van Lanen, H.A., 2023. Hydrological drought: processes and estimation methods for streamflow and groundwater.
- Teuling, A.J., Uijlenhoet, R., Hupet, F., Van Loon, E., Troch, P., 2006. Estimating spatial mean root-zone soil moisture from point-scale observations. *Hydrology and Earth System Sciences* 10, 755–767.
- Tijdeman, E., Stahl, K., Tallaksen, L.M., 2020. Drought characteristics derived based on the standardized streamflow index: a large sample comparison for parametric and nonparametric methods. *Water Resources Research* 56, e2019WR026315.
- Trabucco, A., Zomer, R., 2019. Global Aridity Index and Potential Evapotranspiration (ET0) Climate Database v2 .
- Trenberth, K.E., Dai, A., Van Der Schrier, G., Jones, P.D., Barichivich, J., Briffa, K.R., Sheffield, J., 2014. Global warming and changes in drought. *Nature Climate Change* 4, 17–22.
- Van Loon, A.F., 2015. Hydrological drought explained. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 2, 359–392.
- Vargas, G., Pantoja, S., Rutllant, J.A., Lange, C.B., Ortlieb, L., 2007. Enhancement of coastal upwelling and interdecadal enso-like variability in the peru-chile current since late 19th century. *Geophysical Research Letters* 34.
- Vera, C., Silvestri, G., Liebmann, B., González, P., 2006. Climate change scenarios for seasonal precipitation in south america from ipcc-ar4 models. *Geophysical research letters* 33.

- Viale, M., Garreaud, R.D., 2015. Orographic effects of the subtropical and extratropical andes on upstream precipitation and moisture transport. *Journal of Hydrometeorology* 16, 778–791.
- Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., López-Moreno, J.I., 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index 23, 1696–1718.
- Vicente-Serrano, S.M., Peña-Angulo, D., Beguería, S., Domínguez-Castro, F., Tomás-Burguera, M., Noguera, I., Gimeno-Sotelo, L., El Kenawy, A., 2022. Global drought trends and future projections. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 380, 20210285.
- Vicuña, S., Vargas, X., Boisier, J.P., Mendoza, P.A., Gómez, T., Vásquez, N., Cepeda, J., 2021. Impacts of Climate Change on Water Resources in Chile. Springer International Publishing, Cham. pp. 347–363.
- Vivoni, E., Entekhabi, D., Bras, R., Ivanov, V., 2007. Controls on runoff generation and scale-dependence in a distributed hydrologic model. *Hydrology and Earth System Sciences* 11, 1683–1701.
- Wagner, W., Hahn, S., Kidd, R., Melzer, T., Bartalis, Z., Hasenauer, S., Figa-Saldaña, J., De Rosnay, P., Jann, A., Schneider, S., et al., 2013. The ascat soil moisture product: A review of its specifications, validation results, and emerging applications. *Meteorologische Zeitschrift*.
- Wasko, C., Nathan, R., 2019. Influence of changes in rainfall and soil moisture on trends in flooding 575, 432–441.
- Wei, W., Pang, S., Wang, X., Zhou, L., Xie, B., Zhou, J., Li, C., 2020. Temperature vegetation precipitation dryness index (TVPDI)-based dryness-wetness monitoring in china 248, 111957.
- Winn, M., Kirchgeorg, M., Griffiths, A., Linnenluecke, M.K., Günther, E., 2011. Impacts from climate change on organizations: a conceptual foundation 20, 157–173.
- World Meteorological Organization, W., 1983. Guide to climatological practices. Secretariat of the World Meteorological Organization.

- Wu, Z., Feng, H., He, H., Zhou, J., Zhang, Y., 2021. Evaluation of soil moisture climatology and anomaly components derived from era5-land and gldas-2.1 in china. *Water Resources Management* 35, 629–643.
- Xia, Y., Ek, M.B., Wu, Y., Ford, T., Quiring, S.M., 2015. Comparison of nldas-2 simulated and nasmd observed daily soil moisture. part i: Comparison and analysis. *Journal of Hydrometeorology* 16, 1962–1980.
- Xing, Z., Fan, L., Zhao, L., De Lannoy, G., Frappart, F., Peng, J., Li, X., Zeng, J., Al-Yaari, A., Yang, K., et al., 2021. A first assessment of satellite and reanalysis estimates of surface and root-zone soil moisture over the permafrost region of qinghai-tibet plateau. *Remote Sensing of Environment* 265, 112666.
- Xu, M., Yao, N., Hu, A., Gustavo Goncalves De Goncalves, L., Abrahão Mantovani, F., Horton, R., Heng, L., Liu, G., 2022. Evaluating a new temperature-vegetation-shortwave infrared reflectance dryness index (TVSDI) in the continental united states 610, 127785.
- Xu, Y., Wang, L., Ross, K.W., Liu, C., Berry, K., 2018. Standardized soil moisture index for drought monitoring based on soil moisture active passive observations and 36 years of north american land data assimilation system data: A case study in the southeast united states. *Remote Sensing* 10, 301.
- Yang, L., Sun, G., Zhi, L., Zhao, J., 2018. Negative soil moisture-precipitation feedback in dry and wet regions. *Scientific reports* 8, 4026.
- Zambrano, F., Wardlow, B., Tadesse, T., Lillo-Saavedra, M., Lagos, O., 2017. Evaluating satellite-derived long-term historical precipitation datasets for drought monitoring in chile 186, 26–42.
- Zambrano-Bigiarini, M., Nuñez-Ibarra, D., Galleguillos, M., 2025. How well do gridded products represent soil moisture signatures in natural ecosystems during precipitation events? Technical Report. Copernicus Meetings.
- Zehe, E., Blöschl, G., 2004. Predictability of hydrologic response at the plot and catchment scales: Role of initial conditions 40, 2003WR002869.
- Zhang, J., Wang, W.C., Leung, L.R., 2008a. Contribution of land-atmosphere coupling to summer climate variability over the contiguous united states. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 113.

- Zhang, J., Wang, W.C., Wei, J., 2008b. Assessing land-atmosphere coupling using soil moisture from the global land data assimilation system and observational precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 113.
- Zhang, J., Wu, L., Dong, W., 2011. Land-atmosphere coupling and summer climate variability over east asia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 116.
- Zhang, K., Chen, H., Ma, N., Shang, S., Wang, Y., Xu, Q., Zhu, G., 2024. A global dataset of terrestrial evapotranspiration and soil moisture dynamics from 1982 to 2020. *Scientific Data* 11, 445.
- Zhang, Y., Schaap, M.G., . Weighted recalibration of the rosetta pedotransfer model with improved estimates of hydraulic parameter distributions and summary statistics (rosetta3) 547, 39–53.
- Zheng, Y., Coxon, G., Woods, R., Li, J., Feng, P., 2023. Controls on the spatial and temporal patterns of rainfall-runoff event characteristics—a large sample of catchments across great britain. *Water Resources Research* 59, e2022WR033226.
- Zomer, R.J., Xu, J., Trabucco, A., 2022. Version 3 of the global aridity index and potential evapotranspiration database. *Scientific Data* 9, 409.

APÉNDICE A

Anexos

A.1. Producto CLSoilMaps

CLSoilMaps (Dinamarca et al., 2023) corresponde a una base de datos que entrega propiedades físicas e hidráulicas del suelo de Chile. Sus productos constan de mapas espaciales de todo Chile y cuencas binacionales compartidas con Argentina a una resolución espacial de 100 metros, para seis profundidades estandarizadas, 0-5 cm, 5-15 cm, 15-30 cm, 30-60 cm, 60-100 cm y 100-200 cm.

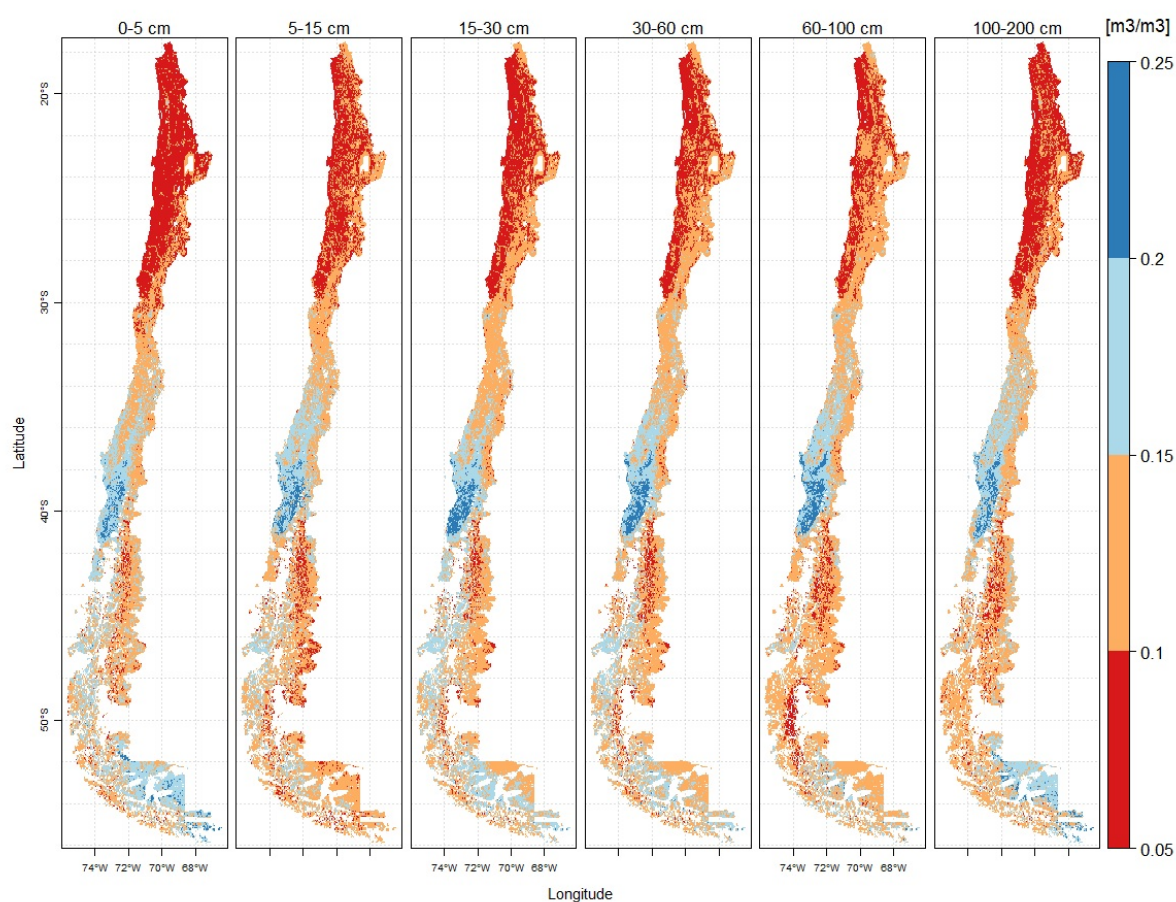


Figura A.1: Punto de marchitez permanente (0-200) cm.

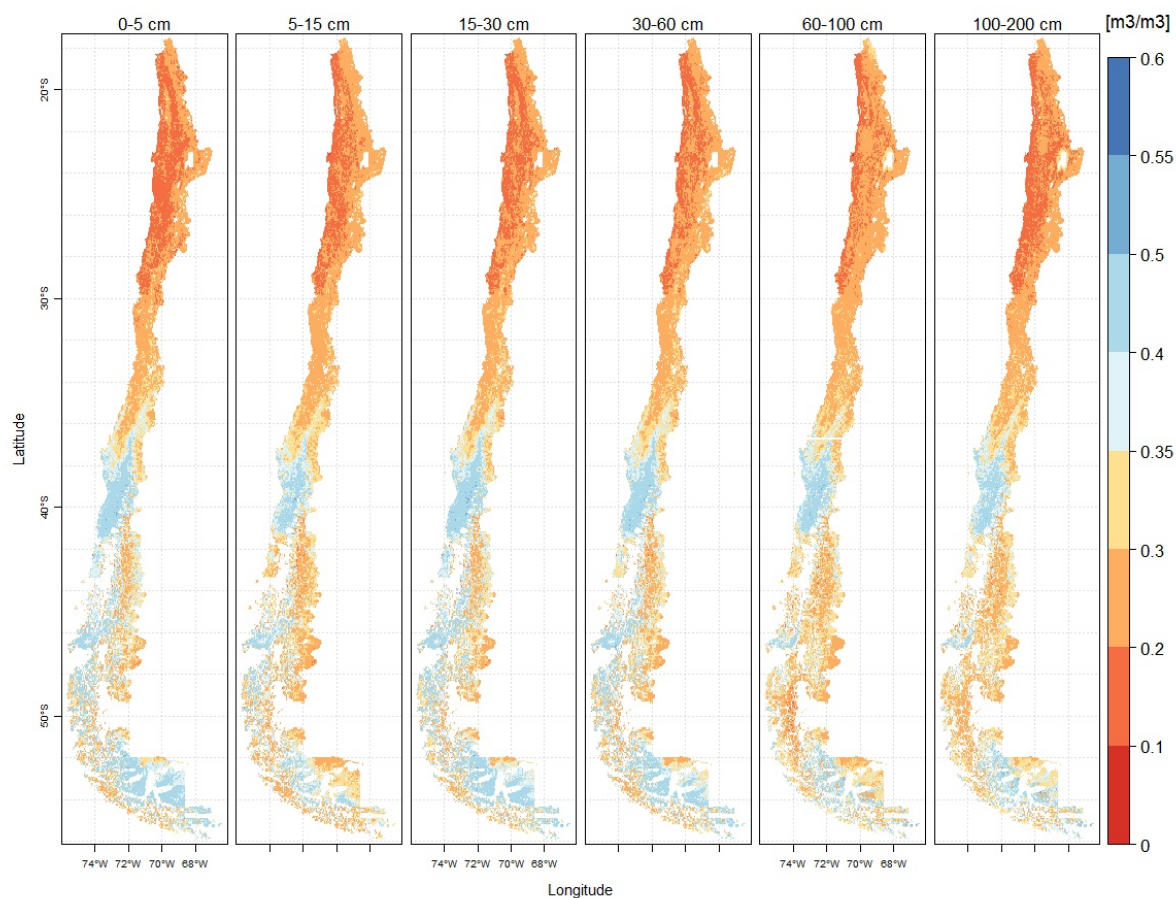


Figura A.2: Capacidad de campo (0-200) cm.

La generación de mapas fue a través del paquete de modelación de pedotransferencia, Rosetta V3 (Zhang and Schaap), el que estima los parámetros de retención de agua de interés por la ecuación de Van Genuchten (1980). Para obtener la capacidad de campo el h es equivalente a 330 kPa y el punto de marchitez permanente a 15000 kPa .

Además, la base de datos contiene varios conjuntos de mapas de suelo, de los cuales fueron utilizados en este trabajo:

- ROSETTA_MEAN: Capacidad de campo, punto de marchitez permanente, punto de saturación del suelo y punto mínimo de agua contenida en el suelo.
- Textural_Classes: Mapas de clases texturales del suelo según el esquema de clasificación del USDA.

A.2. Productos grillados de humedad de suelo

A.2.1. ERA5

ERA5 es el re-análisis atmosférico global de quinta generación producido por el ECMWF (Hersbach et al., 2020, 2023), que combina datos de observación, medición y simulación. ERA5 está disponible desde 1940 hasta el presente, con actualizaciones diarias disponibles con 5 días de latencia.

ERA5 utiliza un método avanzado de asimilación de datos llamado *4-Dimensional Variational* (4D-Var). Este método no solo integra las observaciones meteorológicas disponibles en un momento determinado, sino que también las ajusta de manera continua a lo largo del tiempo para garantizar una representación más precisa de la evolución atmosférica. Además, utiliza un conjunto de 10 miembros, lo que significa que el modelo se ejecuta varias veces con pequeñas variaciones en las condiciones iniciales, permitiendo así cuantificar la incertidumbre en los datos re-analizados. El sistema de pronóstico se basa en la versión CY41R2 del *Integrated Forecasting System* (IFS), un modelo de predicción numérica del ECMWF. En términos de resolución vertical, ERA5 trabaja con 137 niveles híbridos sigma/presión, lo que significa que en la parte baja de la atmósfera los niveles siguen la topografía del terreno, mientras que en niveles más altos se usan niveles de presión estándar (Hersbach et al., 2020).

El modelo *Hydrology Tiled ECMWF Scheme for Surface Exchanges over Land* (H-TESSEL), que forma parte del IFS del ECMWF, es el encargado de modelar las variables de la superficie terrestre en ERA5. Para ello, recibe como entrada la forzante atmosférica cercana a la superficie, proveniente del nivel más bajo del modelo atmosférico, aproximadamente a 10 metros sobre el suelo. Estas forzantes incluyen variables como temperatura, humedad y viento, que influyen en los procesos terrestres.

H-TESSEL utiliza información del Mapa Mundial de Suelos de la FAO/UNESCO y la base de datos *Global Land Cover Characteristics* (GLCC) para definir las propiedades del suelo y la cobertura del terreno en la simulación (Nogueira et al., 2020). Para modelar el flujo de agua en el perfil del suelo, emplea la ecuación de Richards en su forma de difusiva (ecuación diferencial parcial que describe el flujo de agua en un suelo no saturado), que describe cómo el agua se mueve verticalmente dentro de la columna de suelo, la cual está dividida en cuatro capas. Sin embargo, H-TESSEL no considera

el flujo de agua lateral entre celdas de la cuadrícula, es decir, el movimiento del agua ocurre exclusivamente en la dirección vertical.

El proceso de análisis comienza ajustando las variables atmosféricas medidas cerca de la superficie terrestre (temperatura y humedad relativa medidas a 2 metros sobre el suelo), corrigiendo posibles desviaciones en los datos. Posteriormente, estos ajustes se incorporan al análisis de humedad del suelo, asegurando una mayor precisión en la representación de las condiciones del terreno dentro del modelo (Liu et al., 2024).

A.2.2. SMAP-L4

La misión satelital *Soil Moisture Active and Passive* (SMAP; O'Neill et al., 2010) de la NASA proporciona mediciones de humedad del suelo a través de observaciones pasivas de microondas en la banda L (1.4 GHz). Estas mediciones, obtenidas en la capa superficial del suelo (0-5 [cm]), son fundamentales para el monitoreo del balance hídrico global. No obstante, muchas aplicaciones requieren información sobre la humedad del suelo en la zona de raíces (0-100 [cm]), la cual no puede ser observada directamente por el sensor SMAP.

Para superar esta limitación, el *Goddard Modeling and Analysis Group* (GMAO), en colaboración con la Universidad de Montana y el *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) de la NASA, desarrolla los productos de nivel 4 (L4). Estos productos combinan observaciones satelitales con modelos numéricos para estimar la humedad en capas más profundas del suelo, junto con otros parámetros hidrológicos y de carbono (Reichle et al., 2021).

El producto SMAP-L4 emplea un enfoque de asimilación de datos mediante el *Goddard Earth Observing System Model, version 5*, para el *Land Data Assimilation System* (GEOS-5 LDAS), que permite fusionar las observaciones satelitales de humedad superficial con modelos hidrológicos avanzados, proporcionando estimaciones mejoradas de la humedad del suelo en la zona de raíces. En particular, este sistema utiliza el modelo de superficie terrestre *Catchment Land Surface Model* (CLSM), forzado con datos meteorológicos del sistema GEOS-5 *Forward Processing* (FP), para simular procesos como la humedad del suelo y la evapotranspiración (Rienecker et al., 2008). Las simulaciones se actualizan cada tres horas mediante *Ensemble Kalman Filter* (EnKF), que incorpora tanto observaciones satelitales como la temperatura de brillo de SMAP, mejorando así la representación espacial y temporal de la humedad del suelo (Reichle et al., 2017).

Para mejorar la precisión de las estimaciones de precipitación en el modelo, el GEOS-5 LDAS integra observaciones de precipitaciones diarias del *Climate Prediction Center Unified* (CPCU) con una resolución espacial de 0.5° . Antes de su incorporación al sistema, estas observaciones se ajustan a la climatología del producto de precipitación *Global Precipitation Climatology Project, version 2.2* (GPCPv2.2), junto con los datos de precipitación de fondo del modelo FP GEOS-5. Este ajuste permite corregir sesgos y garantizar la coherencia de las estimaciones con los patrones climáticos de largo plazo (Reichle et al., 2021).

Adicionalmente, el producto SMAP-L4 integra información del conjunto de datos de propiedades del suelo (Harmonized World Soil Database version 1.2; HWSD V1.2) y del producto de cobertura terrestre Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) (Reichle et al., 2021). Estos datos permiten mejorar la representación espacial de la humedad del suelo.

El proceso descrito permite transformar las mediciones superficiales de humedad del suelo obtenidas por SMAP en estimaciones de mayor profundidad y utilidad operativa. Gracias a la integración de modelos hidrológicos, asimilación de datos meteorológicos y la aplicación de técnicas avanzadas de filtrado estadístico, el producto SMAP-L4 proporciona información clave para la evaluación del impacto del cambio climático, la gestión de cultivos y la planificación sostenible de los recursos hídricos.

A.2.3. ERA5-Land

ERA5-Land es una versión especializada del reanálisis climático ERA5, enfocada exclusivamente en la superficie terrestre (Muñoz-Sabater et al., 2021). Por lo tanto, ERA5-Land no está acoplado al módulo atmosférico del IFS del ECMWF, sino que resulta de forzar el componente de superficie terrestre de H-TESSEL (versión Cy45r1 del IFS) con campos meteorológicos atmosféricos bajos de ERA5, es decir, que sus simulaciones pueden actualizarse más rápido porque no dependen de la asimilación de datos atmosféricos. Además, ERA5-Land ofrece una mayor resolución espacial que ERA5, lo que permite representar con mayor detalle las variables de la superficie terrestre. Para modelar los procesos del suelo y la hidrología superficial, utiliza H-TESSEL, un esquema de intercambio de energía y agua que permite simular la humedad del suelo, la escorrentía y otros procesos hidrológicos (Muñoz-Sabater et al., 2021; Wu et al., 2021;

Xing et al., 2021; Gomis-Cebolla et al., 2023).

A.2.4. GLDAS-Noah

El sistema global de asimilación de datos terrestres *Global Land Data Assimilation System* (GLDAS), desarrollado conjuntamente por científicos del *Goddard Space Flight Center* (GSFC) de la NASA y el *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) de *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP), tiene por finalidad generar campos óptimos de estados y flujos de la superficie terrestre, mediante la entrada de datos provenientes de observaciones satelitales y terrestres, utilizando técnicas avanzadas de modelación de la superficie terrestre y asimilación de datos (Rodell et al., 2004).

Actualmente, GLDAS maneja tres *Land Surface Models* (LSMs): *NOAH* (Chen et al., 1996; Koren et al., 1999), *Catchment Land Surface Model* (CLSM; Koster et al., 2000) y *Variable Infiltration Capacity* (VIC; Liang et al., 1994).

Para el caso de GLDAS-Noah versión 2.1, no contempla la asimilación de datos, y utiliza una combinación de datos de modelos y observaciones desde el año 2000 hasta la actualidad. Los datos de GLDAS-Noah v2.1 están disponibles en dos flujos de producción: un flujo se procesa con datos combinados que incluyen la versión 1.3 de GPCP (Huffman et al., 2001; Adler et al., 2003) (el flujo de producción principal) y el otro flujo de producción temprana. Dado que los datos de la versión 1.3 de GPCP tienen una latencia de 3 a 4 meses (Center, 2022), los productos de datos GLDAS-2.1 se crean primero sin ellos y se denominan productos tempranos (Early Production, EP), con una latencia de aproximadamente 1.5 meses. Una vez que los datos de la versión 1.3 de GPCP están disponibles, los productos de datos GLDAS-2.1 se procesan en el flujo de producción principal y se eliminan del archivo de productos tempranos (Beaudoin et al., 2020).

A.3. Procedimiento de cálculo del índice paramétrico

A.3.1. Recopilación de datos:

Se recopilan datos (diarios) históricos de humedad del suelo para la ubicación espacial, obtenidos de productos grillados. Se define un periodo de datos históricos suficientemente largo (20-40 años) para asegurar una buena estimación de la distribución.

A.3.2. Estimación de la distribución gamma:

Se asume que la humedad del suelo que sigue una distribución gamma (Palagiri and Pal, 2024) con función de densidad de probabilidad:

$$f(\theta; \alpha, \beta) = \frac{\theta^{\alpha-1} e^{-\theta/\beta}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \quad (\text{A.1})$$

donde θ es el valor de humedad del suelo en el tiempo t ; α es el parámetro de forma, estimado con:

$$\alpha = \frac{\mu^2}{\sigma^2} \quad (\text{A.2})$$

β es el parámetro de escala, calculado como:

$$\beta = \frac{\sigma^2}{\mu} \quad (\text{A.3})$$

Donde: μ y σ^2 son la media y varianza de la humedad del suelo en el periodo de referencia.

A.3.3. Cálculo del valor estandarizado:

Se obtiene la CDF de la humedad del suelo para el tiempo t :

$$P(\theta_t) = F(\theta_t; \alpha, \beta) \quad (\text{A.4})$$

Finalmente, se transforma a la distribución normal estándar mediante la inversa de la función de distribución normal:

$$SSMI_t = \Phi^{-1}(P(\theta_t)) \quad (\text{A.5})$$

A.4. Procedimiento de cálculo del índice no paramétrico

Para el procedimiento del cálculo del ESSMI, es necesario estimar el KDE con núcleo gaussiano y selección del ancho de banda.

A.4.1. Estimación de KDE con núcleo gaussiano

La estimación de densidad por Kernel es una técnica no paramétrica utilizada para estimar la función de densidad de probabilidad de una variable aleatoria. Para un conjunto de datos $x_1, x_2, \dots, x_n$, la estimación de densidad en un punto x se define como:

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h}\right) \quad (\text{A.6})$$

Donde n es el número de observaciones, h es el ancho de banda o parámetro de suavizamiento y K es la función Kernel; en este caso, se utiliza el núcleo gaussiano:

$$K(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-u^2/2} \quad (\text{A.7})$$

El ancho de banda h controla el grado de suavizamiento de la estimación: valores pequeños de h pueden producir una estimación con mucho ruido (sobreajuste), mientras que valores grandes pueden suavizar en exceso los datos, ocultando características importantes.

A.4.2. Selección del Ancho de Banda: Método de Sheather and Jones (1991)

La elección adecuada del ancho de banda es esencial para obtener una estimación precisa de la densidad. El método de Sheather and Jones (1991) es una técnica de selección de ancho de banda ampliamente reconocida por su eficacia. Este método se basa en una aproximación de *plug-in* (método para estimar parámetros a partir de muestras (Sun et al., 2021)) que busca minimizar el error cuadrático medio integrado (MISE) de la estimación.

El procedimiento implica los siguientes pasos:

1. **Estimación de derivadas de la densidad:** Se estiman derivadas de órdenes superiores de la densidad para evaluar la suavidad de la función subyacente.

2. **Cálculo iterativo del ancho de banda:** Utilizando las estimaciones anteriores, se calcula el ancho de banda óptimo a través de una serie de iteraciones que refinan la estimación inicial.

Este método es preferido por su capacidad para adaptarse a diferentes estructuras de datos y proporcionar estimaciones de densidad precisas sin requerir suposiciones fuertes sobre la distribución de los datos.

Con la densidad estimada $\hat{f}(x)$ y el ancho de banda óptimo h , se procede al cálculo del ESSMI de la siguiente manera:

1. **Cálculo de la CDF:** Se integra la densidad estimada para obtener la CDF:

$$\hat{F}(x) = \int_{-\infty}^x \hat{f}(t) dt \quad (\text{A.8})$$

2. **Transformación a la Distribución Normal Estándar:** Se aplica la inversa de la CDF de la distribución normal estándar a los valores de $\hat{F}(x)$ para obtener los valores estandarizados:

$$ESSMI(x) = \Phi^{-1}(\hat{F}(x)) \quad (\text{A.9})$$

Donde Φ^{-1} es la función inversa de la CDF de la distribución normal estándar.

A.5. Valores volumétricos de SSM y RZSM promedio (2000-2023) de GLDAS-Noah, ERA5 y ERA5-Land en Chile continental

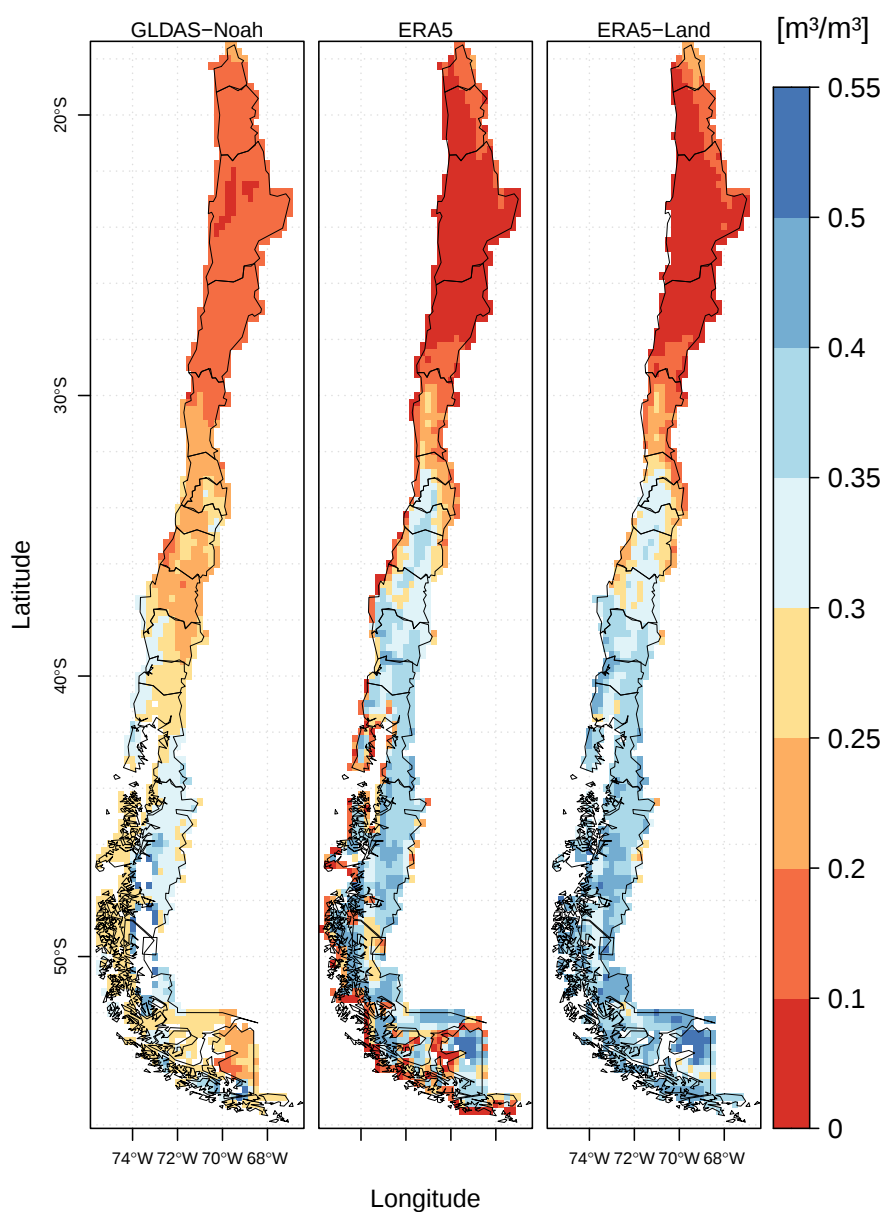


Figura A.3: Valores volumétricos de SM promedio del período 2000-2023 de SSM para los productos grillados: GLDAS-Noah, ERA5 y ERA5-Land.

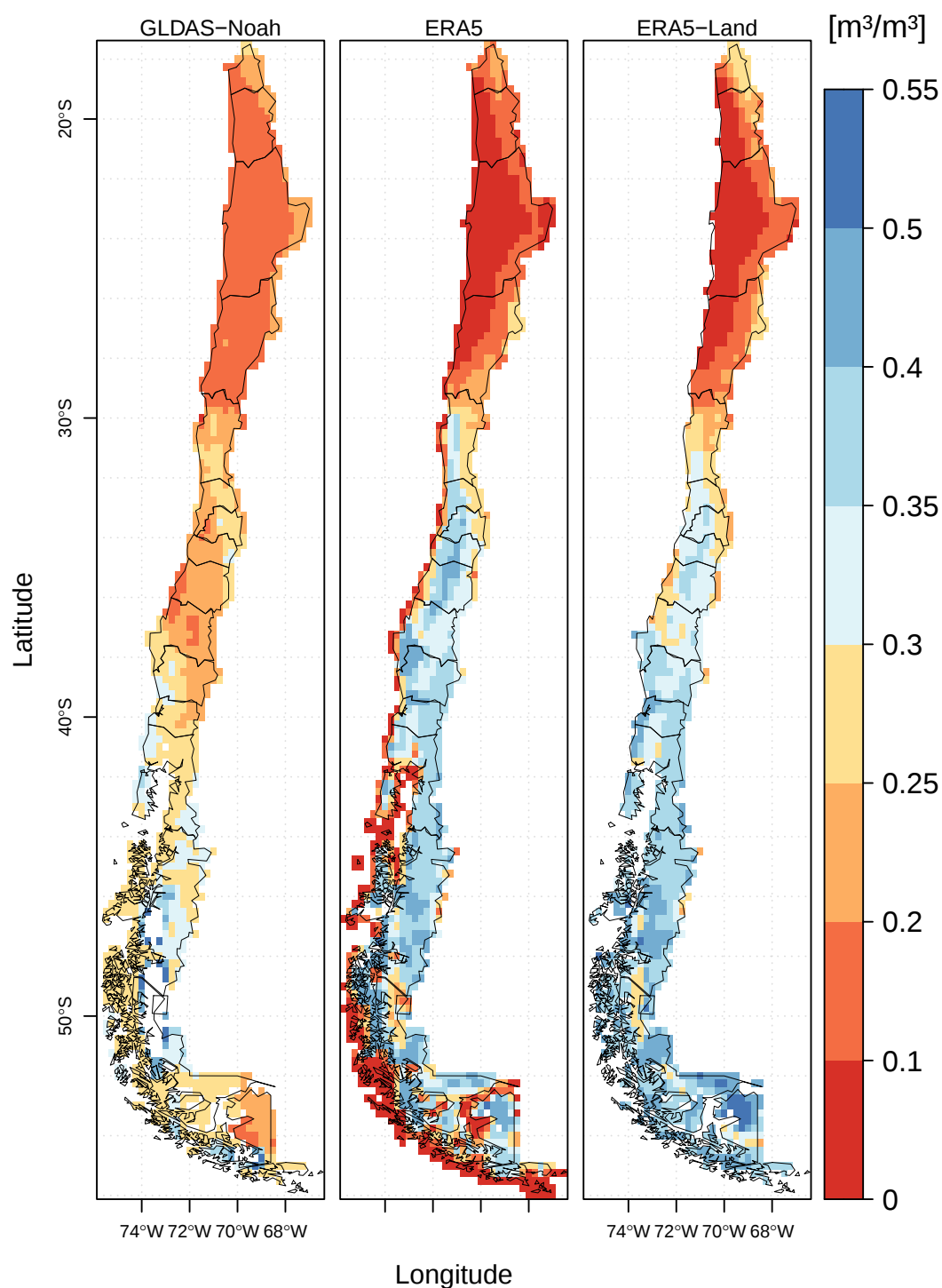


Figura A.4: Valores volumétricos de humedad de suelo promedio del período 2000-2023 de la RZSM para los productos grillados: GLDAS-Noah, ERA5 y ERA5-Land.

A.6. Evento (horario) de precipitación intensa en Cuenca del Río Claro en San Carlos

La Figura A.5 muestra el evento de precipitación intenso a escala horaria en la cuenca Río Claro en San Carlos, para las variables de caudal (DGA), precipitación (ERA5) y humedad de suelo, en la SSM y RZSM.

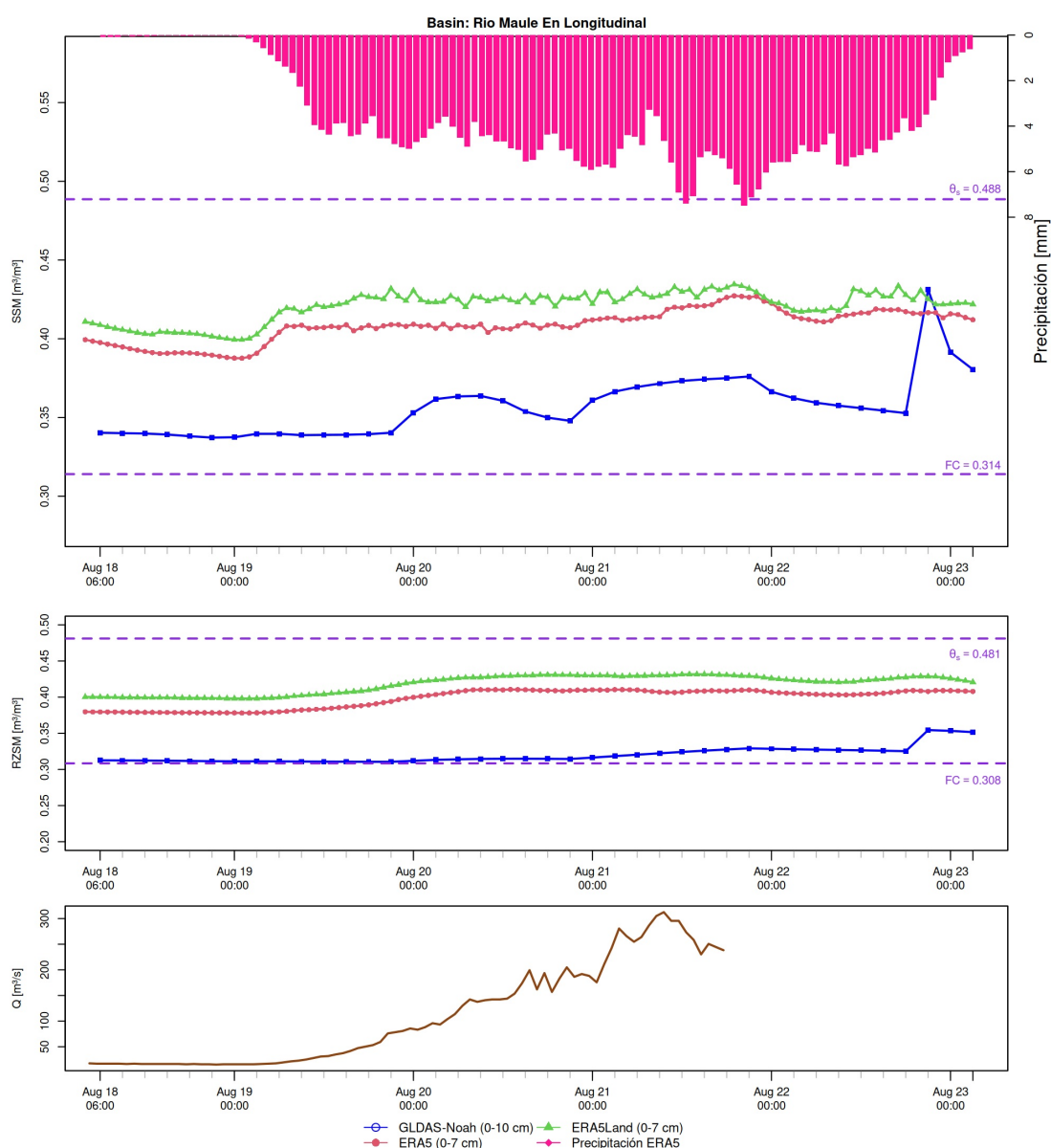


Figura A.5: Caudal, precipitación y humedad de suelo (SSM y RZSM) en la cuenca Río Claro en San Carlos.

A.7. Evento (mensual) de sequía en Cuenca del Río Petorca en Longotoma

A.7.1. Antecedentes generales

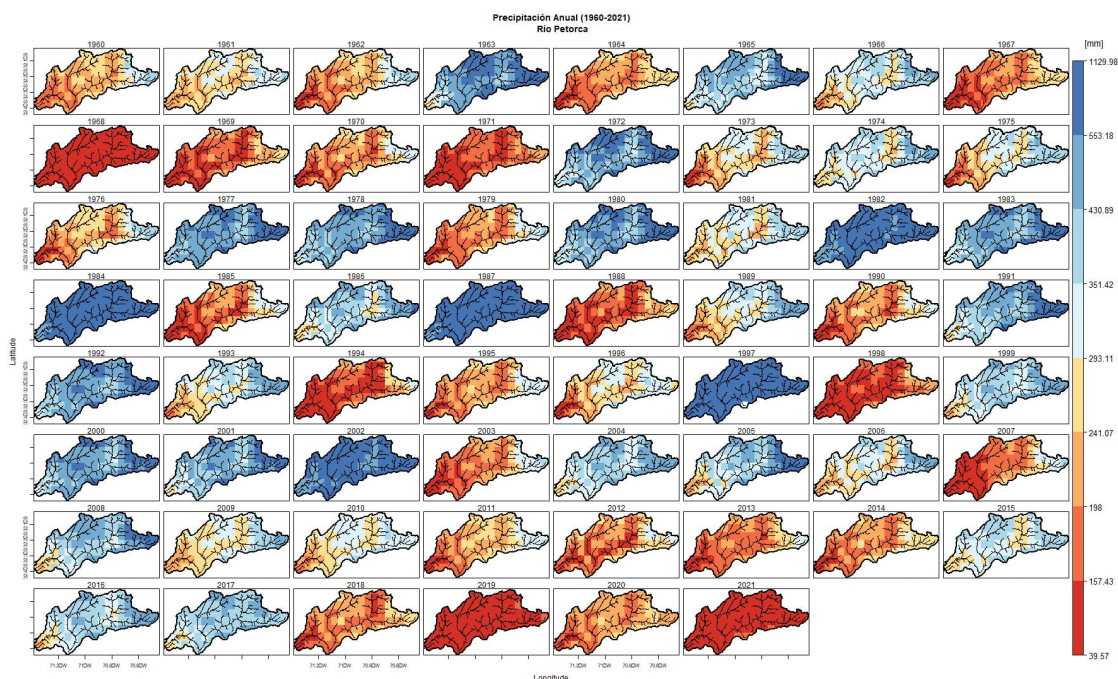


Figura A.6: Precipitación anual en la Cuenca de Río Petorca para período 1960-2021 (Fuente: <https://chi2.ufro.cl/Petorca/>).

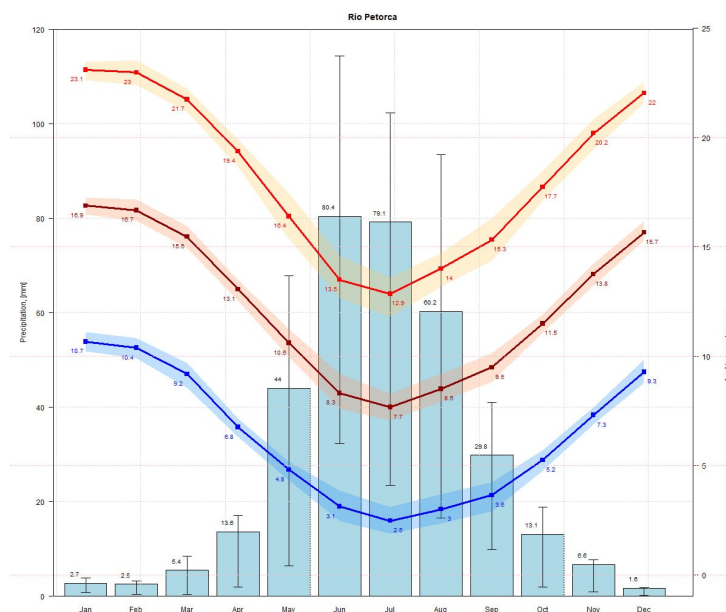


Figura A.7: Climograma de la Cuenca del Río Petorca en Longotoma. Elaborado a partir de los datos CR2METv2.5 (Fuente: <https://chi2.ufro.cl/Petorca/>).

A.7.2. Índice estandarizado de humedad de suelo en SSM (2010-2023)

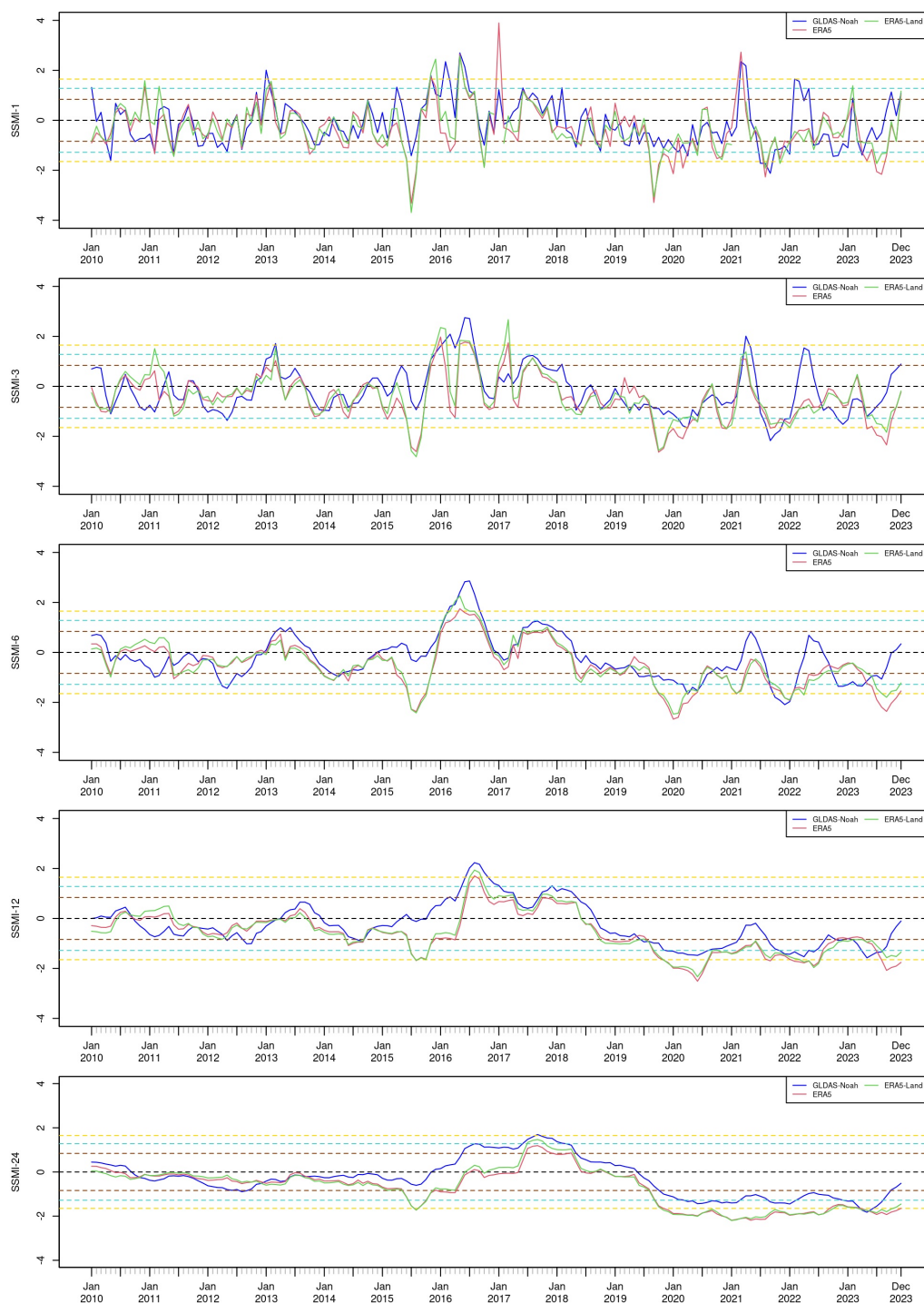


Figura A.8: SSMI en SSM para el día 01 de cada mes en la cuenca del Río Petorca en Longotoma.