

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONOMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**VALIDACIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO ESTIMADA MEDIANTE UN
MÉTODO ÓPTICO MICROONDAS PASIVO EN DOS ZONAS AGRÍCOLAS DE
DISTINTO RÉGIMEN HÍDRICO**

CLAUDIA LILY OLIVARES CABELLO

Santiago, Chile

2016

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**VALIDACIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO ESTIMADA MEDIANTE UN
MÉTODO ÓPTICO MICROONDAS PASIVO EN DOS ZONAS AGRÍCOLAS DE
DISTINTO RÉGIMEN HÍDRICO**

**VALIDATION OF ESTIMATED SOIL MOISTURE USING A PASSIVE
MICROWAVE OPTICAL IN TWO AGRICULTURAL ZONES WITH DIFFERENT
WATER REGIMES**

CLAUDIA LILY OLIVARES CABELLO

Santiago, Chile

2016

UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE PREGRADO

VALIDACIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO ESTIMADA MEDIANTE UN MÉTODO ÓPTICO MICROONDAS PASIVO EN DOS ZONAS AGRÍCOLAS DE DISTINTO RÉGIMEN HÍDRICO

Memoria para optar al título profesional de:
Ingeniero en Recursos Naturales Renovables

CLAUDIA LILY OLIVARES CABELLO

PROFESOR GUÍA

Cristian Mattar B.
Ingeniero en Recursos Naturales Renovables, M.S., Ph.D.

Calificaciones

7,0

PROFESORES EVALUADORES

Juan Manuel Uribe M.
Ingeniero Agrónomo

6,7

Rodrigo Fuster Gómez
Ingeniero Agrónomo, M.S., Dr.

6,2

COLABORADOR

Andrés Santamaría Artigas
Ingeniero en Recursos Naturales Renovables

SANTIAGO, CHILE

2016

AGRADECIMIENTOS

Comienzo agradeciendo a mis queridos padres, a mi madre Lily por su amor, cariño y apoyo, y a mi padre Claudio por enseñarme día a día y acompañarme incondicionalmente. También a mis otras familias, a la Vero por acogerme y apoyarme espiritualmente desde mis 14 años y al tío Juan y sus hijas por el cariño. A mis queridos tíos y primas Paula, Javiera y Vika, pero por sobre todo a mi abuela Irma que nos dejó físicamente hace 3 años, sin embargo no ha dejado de acompañarnos en espíritu.

A mis amigas de la vida, Coti, Javi, Natys y Carla, y a las niñas del Valle, porque a pesar de desaparecer estos últimos meses no han dejado de acompañarme. A mi compañero del alma y aventuras, Diego por su gran apoyo y amor en esta etapa de mi vida y por el camino que emprenderemos.

A mis buenos compañeros y amigos de Universidad: Jevu, Danu, Caro, Maca, Sole, Calu, Tamy, Emi, Tobi, Ivan y Coto por regalarme la mejor etapa de mi vida, por todas las risas, los carretes, cumpleaños, salidas a la playa, etc durante estos 5 años y medio. Ustedes también fueron clave en mi formación profesional.

A los miembros del Laboratorio para el Análisis de la Biósfera, y en especial a los miembros del Fondecyt Caro, Nico, Angie y Diego Uribe por hacer de este un trabajo ameno y muy entretenido. A Lucho por ayudarme infinito en el procesamiento de datos, y por supuesto a mi estimado profesor guía Cristian Mattar por su gran paciencia, dedicación y apoyo durante estos meses.

Finalmente agradezco al proyecto Conicyt - Fondecyt Iniciación 10133359 “Estimating the surface soil moisture at regional scale by using a synergic optical-passive microwave approach and remote sensing data” por hacer posible esta memoria.

INDICE

1. RESUMEN	1
2. ABSTRACT	2
3. INTRODUCCIÓN	3
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	7
3.1.1. Objetivos Específicos	7
4. MATERIALES Y MÉTODOS	8
4.1. ÁREA DE ESTUDIO	8
4.2 MATERIALES	10
4.2.1 MODIS	10
4.2.4 Datos in-situ	14
4.3 MÉTODOS.....	19
4.3.1 Estimación la humedad del suelo mediante un método óptico microondas pasivo	19
4.3.2 Validación de la humedad del suelo estimada mediante datos entregados por la red LAB-net.....	19
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS	22
5.1 ESTIMACIÓN LA HUMEDAD DEL SUELO MEDIANTE UN MÉTODO ÓPTICO MICROONDAS PASIVO.....	26
5.2 VALIDACIÓN LA ESTIMACIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO MEDIANTE DATOS ENTREGADOS POR LA RED LAB-NET.....	31
6. DISCUSIÓN	33
7. CONCLUSIÓN	34
8. BIBLIOGRAFÍA	35
9. ANEXOS.....	41

1. RESUMEN

La humedad del suelo es un factor fundamental en la biósfera y en la interacción suelo-atmósfera. Contribuye en el desarrollo de modelos predictivos climáticos y meteorológicos aportando a la toma de decisiones relacionadas con el manejo de aguas. A pequeña y mediana escala espacial es de gran relevancia en la productividad agrícola, y con ello en la seguridad global alimentaria, haciéndose necesaria la estimación y medición de esta variable. Debido a la variabilidad espacial y temporal de la humedad del suelo es que existen diversos métodos de estimación y medición, siendo uno de estos el uso de métodos basados en teledetección. En este trabajo se presenta una validación del método óptico microondas pasivo (OPM) a partir de datos *in-situ* (LAB-net) en dos zonas de Chile con distinto régimen hídrico: Chimbarongo y Oromo ubicadas en la VI y en la X región de Chile, respectivamente. La humedad del suelo fue estimada y posteriormente validada para el año 2015 mediante el OPM, para el cual se utilizó la temperatura y humedad del suelo de ERA Interim reanalysis, la temperatura de brillo de SMOS derivada de la misión (*Soil Moisture Ocean Salinity*) y el índice de vegetación NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) obtenido del producto MOD13 y generado a partir de información entregada por MODIS. Los principales resultados reflejan que en la zona de estudio de Chimbarongo existe una fuerte influencia debido a los periodos de riego, por lo que se presentan diferencias entre los valores entregados por SMOS, ERA Interim y el método OPM, además de la sitio-dependencia de la estación LAB-net. Mientras en Oromo las estimaciones realizadas por el OPM son similares a los valores de ERA Interim, no obstante el OPM es poco sensible a eventos pluviométricos. Con respecto a los resultados de la validación, se aprecia que el RMSE disminuye un 1% m³/m³ al utilizar el NDVI en las estimaciones del OPM y en Oromo existe una mayor correlación entre OPM y ERA (mayor a 0.8), lo cual no se observa en Chimbarongo. Este trabajo es la primera validación del método OPM en Chile. Futuros usos, así como validaciones complementarias con medidas *in-situ* de la humedad del suelo podrían aportar a entregar resultados útiles para la toma de decisiones frente a eventos extremos como sequías y riesgo de incendios.

Palabras claves: Humedad del suelo, Método óptico microondas pasivo, SMOS, ERA Interim, NDVI.

2. ABSTRACT

Soil moisture is a key factor in a biosphere and in the interaction between soil and biosphere. It contributes in the development of climatic and meteorological predictive models, contributing to decisions related to the management of both water and watersheds. In a small and also medium scale it's really important in agricultural productivity, and thereby, in alimentary global security, making the estimation and measurement of this variable necessary. Due to soil moisture's spatial and temporal variability, different estimation and measurements methods exists, being one of these remote sensing. This work presents a validation of microwave passive optical method (OPM) occurs from *in-situ* (LAB-net) data in two areas with different water regime Chile: Chimbarongo and Oromo located in the VI and the X region of Chile, respectively. 2015's soil moisture was estimated through OPM for which the ERA Interim reanalysis soil temperature and soil moisture, brightness temperature from SMOS derived from the mission (*Soil Moisture Ocean Salinity*) and vegetation index NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) obtained of the product MOD11 and generated from information provided by the MODIS sensor were used. Main results indicates that in Chimbarongo a local influence exists due to the irrigation periods, for which they don't fit with the values obtained by SMOS, ERA Interim and the OPM method, additionally to the site-dependence of the LAB-net station. While in Oromo estimations made by the OPM are similar to the values of ERA Iterim, however the OPM is not very sensitive to pluviometric events. According to the validation results, the RMSE decreases 1% m³/m³ when using NDVI in the OPM estimations, and in Oromo there is a greater correlation between OPM & ERA (higher than 0,8), which does not occur in Chimbarongo. Future uses and complementary validations with *in-situ* measurements of soil moisture could make to deliver useful results for decisions in extreme situations, such as fire risk and droughts.

Key words: soil moisture, optic passive microwave method, SMOS, ERA Interim, NDVI.

3. INTRODUCCIÓN

La humedad del suelo, entendida como el contenido de agua que existe en la zona radicular (0.0 – 1.0 m) (Eltahir, 1998), es fundamental en el control de los balances de agua y energía que ocurren en la biósfera. Es considerada por la *Global Climate Observing System* (GCOS) como una variable climática esencial (ECV) por contribuir en el desarrollo de modelos de predicciones climáticas y en aplicaciones hidrológicas de gran relevancia en la toma de decisiones relacionadas con el manejo de aguas (Dorigo *et al.*, 2011). Al mismo tiempo, la humedad del suelo favorece a la existencia de los ciclos biogeoquímicos principales como el carbono, nitrógeno y metano, siendo un soporte para la existencia de la vegetación (Koster, 2004; Entekhabi *et al.*, 2010; Ahmad *et al.*, 2012).

A mediana y pequeña escala espacial, la humedad del suelo contribuye en las predicciones meteorológicas, permitiendo la evaluación de sequías, riesgo de escurrimiento y erosión hídrica regional (Piles, 2010, Albergel *et al.*, 2011; Albergel *et al.*, 2013). A nivel de planta, la humedad del suelo juega un rol en la estabilidad de los distintos cultivos por su dependencia a esta variable; ejemplo de esto son los cultivos sin riego (Holzman *et al.*, 2014). Esta variable es clave en el manejo de la productividad agrícola, ya que se pueden ver alterados los sistemas silvoagropecuarios, la seguridad global alimentaria y la optimización de los programas de riego. En este contexto, las mediciones a pequeña y mediana escala son importantes para el desarrollo sustentable de la producción agrícola nacional e internacional (Mwangi *et al.*, 2014).

Sin embargo la cuantificación de la humedad del suelo es compleja a escala regional, ya que esta varía tanto espacial como temporalmente, resultado de la heterogeneidad de las propiedades del suelo, precipitación, evapotranspiración, topografía y por el efecto que generan los cambios en el uso del suelo por acción antrópica (Pellarin *et al.*, 2003; Sobrino *et al.*, 2012). Es por esta complejidad que existen diversos métodos de estimación y medición de humedad del suelo, ya sea con métodos *in-situ* (Brocca *et al.*, 2007; Entin *et al.*, 2000), mediante sensores remotos (Dorigo *et al.*, 2011) y también a partir del uso de modelos de transferencia suelo-vegetación-atmósfera (Paulik *et al.*, 2014).

Las mediciones *in-situ* de humedad del suelo permiten analizar los procesos de transferencia agua-energía que ocurren en la interacción suelo-atmósfera a través de diversas técnicas, siendo las más utilizadas el método gravimétrico y el método volumétrico. En el primero, relaciona el contenido gravimétrico de agua en el suelo con la cantidad en masa de agua que existe en una determinada masa de suelo, mientras en el segundo método, el contenido volumétrico compara el volumen de agua en un determinado volumen de suelo (Robinson *et al.*, 2008). No obstante, las mediciones *in-situ* son complicadas ya que requieren recursos humanos, financieros, logísticos, entre otros. Por otra parte, la variabilidad espacial influye en la generación de redes de monitoreo requiriendo de más de un sitio de medición con el fin de tener una estimación representativa del área de estudio (Dorigo *et al.*, 2011; Mallick *et al.*, 2009). Por lo tanto, el uso de tecnologías remotas permitiría complementar las redes de

monitoreo *in-situ* a partir de la obtención de información espacial de la humedad del suelo. De hecho, la importancia de la estimación de la humedad del suelo a diferentes escalas espaciales ha permitido en las últimas décadas el desarrollo de nuevas tecnologías y métodos basados en teledetección, los cuales pueden utilizarse para monitorear la humedad del suelo en grandes áreas y con una buena frecuencia temporal permitiendo la adaptación a métodos de estimación a escala regional (Mallick *et al.*, 2009; Sobrino *et al.*, 2012; Santamaría-Artigas *et al.*, 2016).

Existen diversos enfoques en la estimación de la humedad del suelo mediante el uso de sensores remotos, los cuales tienen un gran potencial para entregar valores estimados de humedad del suelo a diferentes escalas espaciales. Inicialmente esta variable era estimada en el rango de onda corta, donde el dominio del visible analiza la reflectancia espectral de las superficies y se basa en el hecho de que los suelos se oscurecen cuando están húmedos, conduciendo a errores producto de los efectos atmosféricos, nubes y efectos de la cubierta vegetal (Kerr *et al.*, 2007; Dobriyal *et al.*, 2012). Debido a los significativos errores, posteriormente los métodos de estimación en el dominio óptico (visible e infrarrojo cercano (0.4 a 3.0 μm) se basaron en la medición de la reflexión de la superficie permitiendo una alta resolución espacial, amplia cobertura y el acceso a una gran disponibilidad y variedad de sensores multi e hiper-espectrales. Sin embargo, estas técnicas presentan poca relación con la humedad de la superficie y la penetración en ella es de apenas 1mm, además de altas perturbaciones producto de coberturas vegetacionales abundantes y ruido atmosférico, junto con una baja frecuencia temporal (Wang and Qu, 2009).

Mientras en el infrarrojo térmico (8.0 a 14.0 μm) la técnica para estimar la humedad del suelo proviene de la temperatura y/o emisividad de la superficie, otorgando una alta resolución espacial, una amplia cobertura y una estrecha relación entre la temperatura/vegetación y humedad de la superficie, además de la variedad de sensores disponibles. Esta técnica se vincula a los efectos del calor latente, ya que los suelos húmedos tienen una mayor inercia térmica que los suelos secos. De esta manera se han realizado monitoreos de inercia térmica, amplitud de la temperatura de la superficie, entre otros. Sus desventajas son menores al dominio al espectro óptico, aun así presentan poca penetración de superficie, alta perturbación atmosférica, producto de abundante cobertura vegetal, y baja frecuencia temporal (Kerr *et al.*, 2007; Wang and Qu, 2009).

Actualmente, las técnicas más utilizadas para estimar la humedad del suelo son el uso de sistemas de microondas, tanto pasivos como activos, los cuales se basan en la constante dieléctrica de los suelos, siendo altamente dependiente a la humedad del suelo debido a la gran diferencia existente entre las constantes dieléctricas del suelo seco y el agua. El resultado de esta diferencia se observa en las variaciones de la emisividad entre los suelos secos y húmedos, permitiendo ver la variación en la temperatura de brillo. Esta variación en la temperatura de brillo permite una mayor precisión en la estimación de humedad con un radiómetro solo y en un suelo desnudo, es mejor que un 1-2% (Njoku & Entekhabi, 1996). Una importante ventaja del uso de las microondas para la estimación de la humedad del suelo es que pueden realizarse estimaciones en cualquier condición climática, ya que los valores

no son alterados significativamente por la atmósfera y nubes, y puede penetrar en la vegetación (Kerr *et al.*, 2007; Kerr *et al.*, 2012).

Debido a las características que ofrecen las microondas es que en la última década han surgido un gran número de productos que entregan valores de humedad del suelo estimada a partir de sensores remotos en todo este dominio. Los sistemas de radar de apertura sintética (SAR) -tales como E-SAR, ERS-1, JERS-1 y SIR-C- han sido bastante utilizados en el último tiempo; estos transmiten ondas electromagnéticas y registran la radiación retrodispersada (Pérez and Muñoz, 2006), ofreciendo todas las mediciones meteorológicas con una alta resolución espacial, sin embargo con una frecuencia temporal baja, lo cual no es compatible con los requisitos hidrológicos ni con los modelos de previsión del tiempo (Kerr *et al.*, 2007; Brocca *et al.*, 2010).

De todo el dominio espectral de las microondas, la banda-L (1.4 GHz) es considerada la más adecuada para la detección de la humedad del suelo, debido a su sensibilidad a esta variable, a que reduce la atenuación atmosférica y por tener mayor penetración de la vegetación, presentando mayor eficiencia y exactitud, evitando las emisiones no deseadas y las interferencias de radiofrecuencia (RFI) (Djoku & Entekhabi, 1997). Diversos estudios han demostrado que esta banda es la más eficaz en el monitoreo mundial de la humedad del suelo, donde su señal es una de las más sensitivas a los efectos de la vegetación y a la temperatura efectiva, y en menor medida a la rugosidad superficial del suelo la topografía, textura y densidad aparente (Pellarin *et al.*, 2003; Brocca *et al.*, 2010; Kerr *et al.*, 2012).

Diversas misiones han desarrollado la medición de la energía emitida desde la superficie de la tierra en el rango de la banda-L. La primera misión espacial fue Skylab en 1973 con su instrumento Skylab S-194, aunque el gran tamaño de su antena (mayor a 4 m) obtenía una baja resolución espacial de 50 a 60 kilómetros (Jackson *et al.*, 2004). Varias décadas después, en el año 2011 aparece Aquarius/SAC-D con una órbita heliosincrónica a una altitud de 657 km. Si bien, Aquarius fue diseñado para mapear la salinidad del océano, es posible estimar la humedad de la superficie a través de un algoritmo de canal único (SCA) que requiere de la temperatura de la superficie de la tierra más diversos parámetros de suelo y vegetación (Bindlish *et al.*, 2015).

Actualmente existen dos misiones dedicadas al monitoreo de la humedad del suelo a escala global en banda L (1.4 GHz); la primera es SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) (Kerr *et al.*, 2012) lanzada el año 2009, la cual es una misión con sensores pasivos que presenta una resolución espacial entre 10-50 km donde obtiene la temperatura de brillo a través de un algoritmo iterativo; y la otra corresponde a SMAP (Soil Moisture Active-Passive) lanzada el año 2015, una misión que en una observación integra un radar y un radiómetro, ambos en banda L proveyendo mapas globales de humedad del suelo con alta resolución y alta exactitud cada dos a tres días (Entekhabi *et al.*, 2010).

De las misiones nombradas, SMOS utiliza un radiómetro con síntesis de apertura (MIRAS) multiangular entre 0 y 65° y de doble polarización (vertical y horizontal) en banda-L (1.4 GHz), basado en sistemas interferométricos con 69 antenas. Su órbita es heliosincrónica y

el sensor está inclinado con un ángulo de 32.5° permitiendo obtener la temperatura de brillo (TB) y el espesor óptico de la vegetación (τ) a través de la radiación emitida por la superficie de la Tierra, la cual está relacionada con el contenido de humedad en los primeros centímetros del suelo. De esta manera proporciona mapas globales de humedad del suelo cada tres días con una resolución espacial de 43 km y con un error de 4% m^3/m^3 (Wigneron *et al.*, 2007; Kerr *et al.*, 2010). Su concepto se basa en analizar pixeles vistos con diferentes ángulos y polarizaciones, que se usan para separar las diferentes contribuciones (suelo-vegetación) de la señal (Wigneron *et al.*, 2000), siendo esta su principal ventaja que hace a esta misión capaz de reducir los efectos de la vegetación y rugosidad superficial (Entekhabi *et al.*, 2008).

La doble polarización de las temperaturas de brillo (horizontal y vertical) cubre la superficie de la tierra entre los 200 y 350 Kelvin. El contenido de agua en el suelo es la principal variable a través de la constante dieléctrica que influencia la señal. En zonas sin vegetación, el rango de variación de la temperatura de brillo es entre 230 y 330 Kelvin entre un suelo saturado y un suelo muy seco. Su señal capta la emisividad de los primeros 2-3 cm del suelo y puede penetrar las nubes y los efectos atmosféricos (Kerr *et al.*, 2010; Srivastava *et al.*, 2013).

Para simular la temperatura de brillo se utiliza el modelo de transferencia radiativa L-MEB (*L-band Microwave Emission of the Biosphere*), donde mediante un algoritmo de minimización de la técnica se obtienen los valores de humedad del suelo (Louvet *et al.*, 2014). Este algoritmo incorpora una serie de parámetros que se adaptan mejor a las observaciones *in-situ* de la humedad del suelo (Wigneron *et al.*, 2007; Mialon *et al.*, 2012). Además, el L-MEB es un modelo semi-empírico derivado del modelo tau-omega ($\tau - \omega$), que requiere de otros parámetros como de la temperatura del suelo, el contenido de agua en la vegetación, el tipo de suelo y las características de la nieve (densidad, profundidad, tamaño del grano, contenido de agua líquida) para simular la temperatura de brillo (Ulaby *et al.*, 1986; Wigneron *et al.*, 2007; Panciera *et al.*, 2009). Su enfoque iterativo minimiza los errores a partir de la suma de las diferencias ponderadas al cuadrado entre los datos medidos y modelados de la temperatura de brillo para una variedad de ángulos de incidencia. Para cada ángulo de incidencia, los diferentes tipos de cobertura de la superficie presentes se estiman a partir de mapas de uso de suelo con una alta resolución espacial (Wigneron *et al.*, 2007). Del modelo tau-omega ($\tau - \omega$) (Ulaby *et al.*, 1986), el L-MEB se basa en una solución de orden cero de las ecuaciones de transferencia radiativa correspondientes a dicho modelo, donde la profundidad óptica τ considera las propiedades de la atenuación de la vegetación, y el albedo de dispersión simple ω representa los efectos de dispersión dentro de la capa del dosel. Este modelo permite responder a las atenuaciones de las emisiones del suelo por la contribución de las capas de vegetación a la radiación emitida (Wigneron *et al.*, 2007; Panciera *et al.*, 2009; Miernecki *et al.*, 2014).

Como alternativa al uso de algoritmos basados en modelos de inversión térmica –como el modelo L-MEB–, los efectos de la vegetación en banda-L se han considerado en diversos estudios, los cuales utilizan parametrizaciones semi-empíricas en el rango de las microondas (Wigneron *et al.*, 2004; Saleh *et al.*, 2006) y, también complementándose con información adicional que permite caracterizar la estructura de la vegetación como índices de vegetación en el dominio óptico, por ejemplo el NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) y el

EVI (*Enhanced Vegetation Index*) (Mattar et al., 2012). En este contexto, se ha demostrado que el espesor óptico de la vegetación puede relacionarse con algún indicador de vegetación como los mencionados, tal como el LAI, que está estrechamente correlacionado con el contenido de agua en la vegetación demostrando ser clave en la simulación del contenido de la humedad del suelo. Además, otros trabajos han expuesto que la profundidad óptica de la vegetación, clave en la simulación del contenido de la humedad del suelo en banda-L, podría ser parametrizada en función al NDVI, el cual mejora sustancialmente los valores de humedad de la superficie (Parrens et al., 2011; Mattar et al., 2012; Miernieki et al., 2014; Santamaría-Artigas et al., 2016). El método que permite estimar la humedad del suelo a partir de índices de vegetación y microondas pasiva propuesto por Mattar et al., (2012) corresponde al método Óptico Microondas Pasivo (en adelante, OPM).

A pesar de la mejoras sustanciales de los diferentes métodos de estimación de humedad del suelo, la resolución espacial de misiones pasivas que utilizan el dominio de las microondas como SMOS, es muy baja para aplicaciones hidrológicas, requiriéndose mediciones de humedad *in-situ* para así evaluar la exactitud de cualquier algoritmo de teledetección (Brocca et al., 2010). Sin embargo, a pesar de los grandes esfuerzos por utilizar el método óptico-microondas pasivo incorporando indicadores de vegetación, estos han sido solamente calibrados a escala regional, pero todavía no han sido validados a esta escala a partir de información *in-situ* (Santamaría-Artigas et al., 2016). Por lo tanto, el objetivo de esta memoria es validar la humedad del suelo estimada mediante un método óptico microondas-pasivo (OPM) a partir de datos *in-situ* en Chile.

3.1 Objetivo General

Validar la humedad del suelo estimada mediante un método óptico microondas-pasivo en dos zonas agrícolas de distinto régimen hídrico en Chile.

3.1.1. Objetivos Específicos

- Estimar la humedad del suelo mediante un método óptico microondas pasivo
- Validar la estimación de la humedad del suelo mediante datos entregados por la red LAB-net

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Área de estudio

El área de estudio de esta memoria corresponde dos zonas, una ubicada en la Región de O'Higgins en la comuna de Chimbarongo ($34^{\circ}43'39.98''S$; $70^{\circ}58'44.72''O$), y la segunda en la Región de los Lagos en la comuna de Purranque ($40^{\circ}53'1.45''S$; $73^{\circ}6'26.52''O$) (Figura 1). En estas dos zonas existen estaciones LAB-net donde ya se han desarrollado experiencias previas para el monitoreo del contenido de humedad del suelo (Olivera-Guerra *et al.*, 2015).

La Estación LAB-net de Chimbarongo corresponde a un predio compuesto principalmente por frambuesas. Su suelo es del orden Inceptisol y serie Limanque con textura franco limoso en todo el perfil, de topografía plana, permeabilidad rápida y buen drenaje (CIREN, s.a.). Además para este estudio se consideraron diferentes predios con variados cultivos en torno a la estación, compuestos de tabaco, pimientos, maíz, trigo y arándanos, haciéndolo una zona con una cobertura vegetal heterogénea.

El clima de Chimbarongo corresponde al tipo mediterráneo, específicamente templado cálido con estación seca prolongada (Kottek *et al.*, 2006). Las precipitaciones promedio alcanzan los 538 mm/año y existe una alta oscilación térmica en todas las estaciones (30 a 12°C en verano y 15 a 2°C en invierno) (Mattar *et al.*, 2016).

Mientras en la Estación LAB-net de Oromo corresponde a una pradera utilizada para pasturas. En este sector el suelo es alofánico, formado por cenizas volcánicas correspondiente a suelos Trumaos, destacados por presentar alofán y la frecuente presencia de minerales primarios. El orden de suelo es Andisol, su serie es Osorno y su textura es franca. Las cenizas volcánicas se han depositado sobre planos fluvio-glaciales, presentando una topografía compleja con pendientes dominantes de 2 a 5%. Se destacan por presentar muy buenas propiedades físicas con una velocidad de infiltración moderada (CIREN, 1978; Sanhueza *et al.*, 2011). Los puntos aledaños para mediciones *in-situ* mensuales son praderas para pasturas ubicadas en la Provincia de Osorno y en la Provincia de Llanquihue presentando suelos trumaos y suelos ñadis, donde el último se caracteriza por su capa de fierrillo (óxido de hierro, manganeso y sílice) teniendo un mal drenaje (Hermosilla and Cárdenas, 2007). El clima de esta zona es predominantemente templado lluvioso con influencia mediterránea, el cual presenta un período húmedo de ocho a doce meses con excedentes hídricos que superan los 1,300 mm/año. La temperatura promedio anual es de 12°C, y la amplitud térmica anual, de 9,6°C.

La justificación a elegir estas dos zonas con distinto régimen hídrico y gran variabilidad espacial con respecto a su cobertura vegetal es comparar los resultados de la estimación de la humedad a partir de un método óptico microondas-pasivo con una resolución espacial de 25 km x 25 km y los valores medidos *in-situ* en una zona con variados cultivos y distintos métodos de irrigación, como es el caso de Chimbarongo y en otra, Oromo, con una gran

homogeneidad espacial y sin riego durante el año. Además, la variación espacial utilizada en el método para estimar la humedad podría ocasionar sesgos significativos en la primera zona.

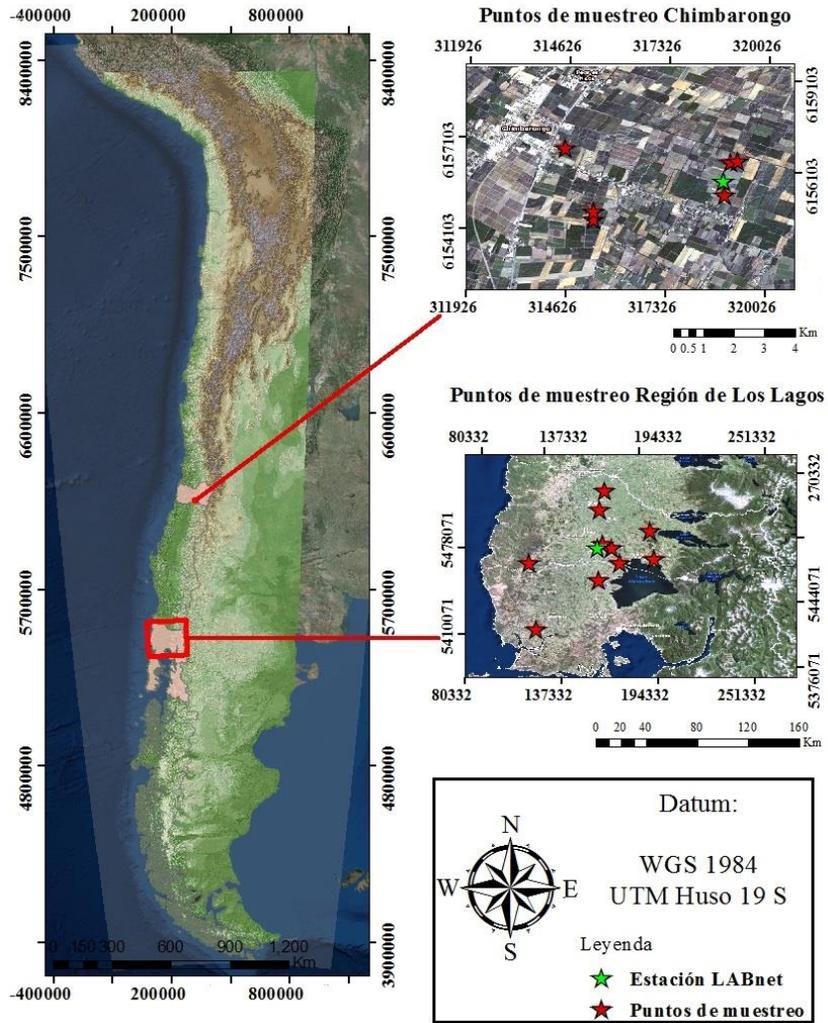


Figura 1. Ubicación de las áreas de estudio. Sitios de muestreo se detallan en anexos 1 y 2.

4.2 Materiales

En este trabajo se utilizaron diversas bases de datos provenientes de sensores remotos para estimar la humedad del suelo, correspondientes a los presentados en el Cuadro 1, más datos *in-situ* de terrenos mensuales y de estaciones LAB-net para la validación de los valores de humedad estimados. Todos ellos se describen a continuación.

Cuadro 1. Listado de datos utilizados en la estimación de la humedad

Producto	Fuente	Resolución espacial	Resolución temporal	Período
L3TB	SMOS	25 km	Diaria	01/01/2015 - 31/12/2015
MOD13Q1	MODIS	1 km	16 días	
STL1	ERA Interim	0.125°	3 horas	

4.2.1 MODIS

El producto MOD13Q1 V5 contiene los índices de vegetación NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) y EVI (*Enhanced Vegetation Index*) y es publicado cada 16 días con una resolución espacial de 1 km (Huete *et al.*, 2002). En este trabajo fue utilizado el producto NDVI para el año 2015 (Figura 2).

La base teórica para estos índices empíricos es derivada de las firmas espectrales de reflectancia de las hojas. La energía en el rango espectral del visible es muy baja, resultado de la alta absorción de los pigmentos fotosintéticamente activos, con su máxima absorción entre el azul (470 nm) y el rojo (670 nm), mientras que en el infrarrojo cercano (NIR) casi toda la radiación es dispersada con muy poca absorción. Producto de las características de estos rangos, el contraste entre el rojo y el NIR resulta una medida sensible de la cantidad de vegetación; por ejemplo en cantidades altas de vegetación, el NIR contribuye a aumentar los contrastes, ya que la banda roja se satura por la absorción de clorofila (Solano *et al.*, 2010).

De estos dos índices que proporciona el producto MOD13Q1, el NDVI fue seleccionado en la estimación de la humedad del suelo a partir del método óptico microondas pasivo, ya que varios trabajos han demostrado que el espesor óptico puede relacionarse con algún indicador de la vegetación, tales como NDVI y el índice de área foliar. Por ejemplo, Jackson *et al.* (2004) relacionó el espesor óptico de la vegetación y el contenido de agua en esta (*Water Vegetation Content, WVC*), e índices de vegetación obtenidos a partir de imágenes Landsat; además Mattar *et al.* (2012) estimaron la humedad del suelo a partir de índices de vegetación y microondas pasivas. Otra ventaja es que el NDVI puede estimarse fácilmente a partir de valores de reflectancias (Mattar *et al.*, 2012; Miernecki *et al.*, 2014; Santamaría-Artigas *et al.*, 2015)

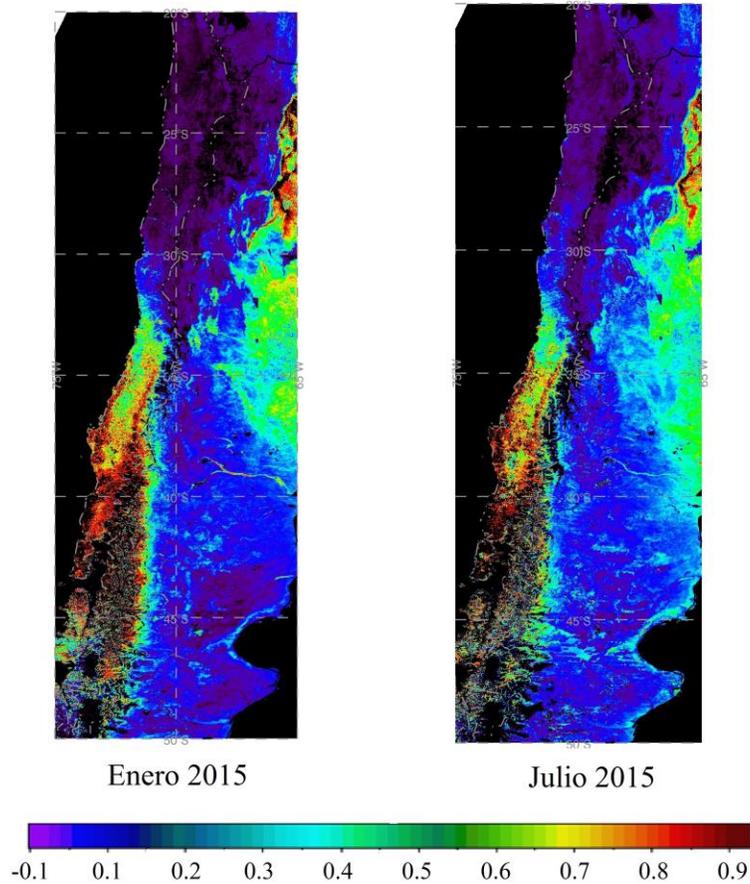


Figura 2. Producto MOD13 índices de vegetación: NDVI 16-día terra/MODIS para los meses de enero y julio del 2015

4.2.2 SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity)

El sensor abordo del satélite SMOS capta la temperatura de brillo con una sola frecuencia (1.4 GHz) pero con un ángulo de incidencia entre 0 y 65°. Está diseñado para proveer información global de la humedad del suelo con un error de un 4%. Las temperaturas de brillo son polarizadas horizontal y verticalmente, y cubren la superficie de la tierra entre los 200 y 350 Kelvin.

El producto utilizado en esta memoria es el SMOS L3TB (Temperatura de brillo), el cual es presentado en formato EASE-Grid V1 (*Equal Area Scalable Earth*) con una proyección cilíndrica de 25 km, con una resolución temporal diaria (Kerr *et al.*; 2012). Su ángulo de

incidencia es de 42.5° , el cual es obtenido por una interpolación lineal de todas las temperaturas obtenidas entre los ángulos 37.5° y 47.5° a 42.5° .

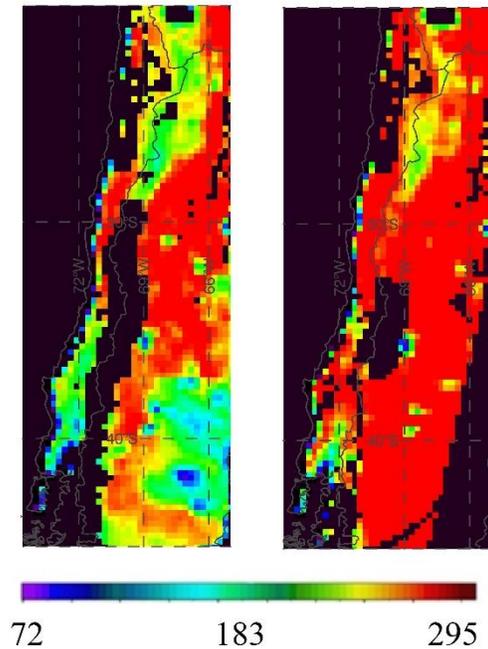


Figura 3. SMOS L3TB: Temperatura de brillo en banda L a 42.5° en polarización horizontal para enero del 2015 (izquierda) y julio del 2015 (derecha)

4.2.3 ERA-Interim reanalysis

ERA-Interim reanalysis es una base de datos meteorológicos creada para la investigación científica y el desarrollo en el año 1979 por el ECMWF (*European Centre for Medium Range Weather Forecasts*) la cual está en constante actualización. Proporciona datos para el periodo entre enero de 1979 y el presente e incluye datos meteorológicos mundiales en diferentes resoluciones espaciales y temporales, los que describen el clima, las condiciones de las ondas del océano y de la superficie de la tierra, y los parámetros de la atmósfera superior que cubren la troposfera y la estratosfera (Dee *et al.*, 2011; Balsamo *et al.*, 2015).

El STL1 y el SWVL1 proporciona datos con una resolución espacial de 0.125×0.125 grados y una resolución temporal de 3 horas (Dee *et al.*, 2011; Balsamo *et al.*, 2015). Para esta memoria se utilizaron la temperatura del suelo STL1 para la estimación de la humedad del suelo con el método OPM y el contenido volumétrico del agua del suelo SWVL1 para la validación del método OPM, ambos productos para la primera capa de profundidad 0-7 cm. La figura 4 y 5 muestran algunos ejemplos de este producto para enero y febrero sobre Chile.

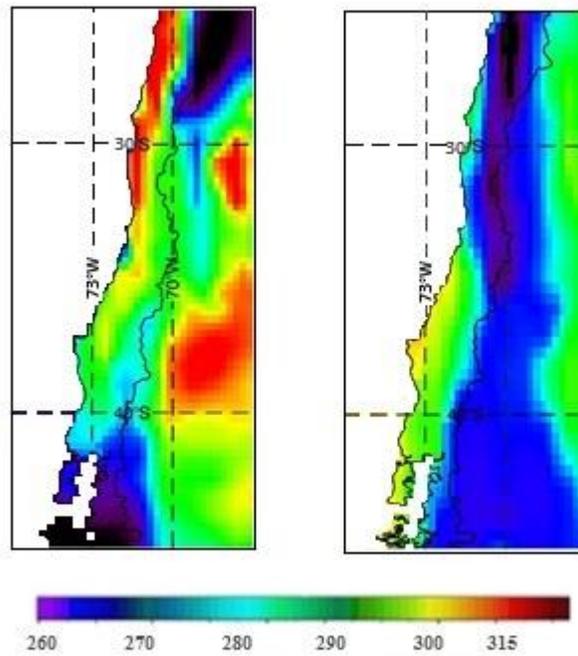


Figura 4. ERA-Interim STL1 Temperatura del suelo para enero del 2015 (izquierda) y junio del 2015 (derecha)

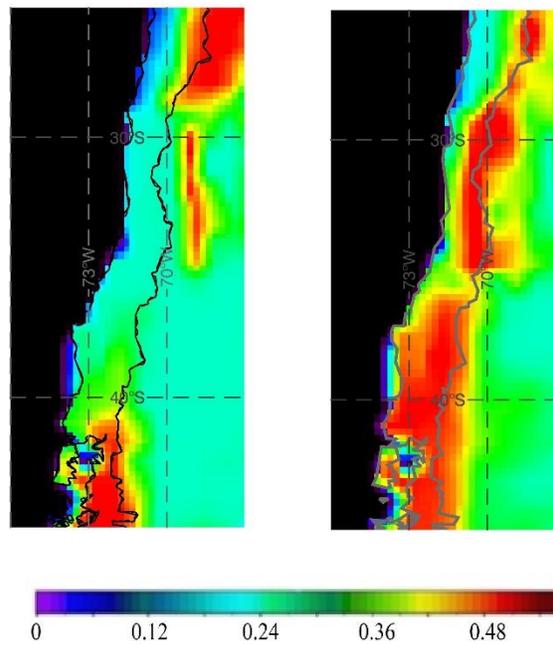


Figura 5. ERA- Interim SVWL1 Humedad del suelo para enero del 2015 (izquierda) y junio del 2015 (derecha)

4.2.4 Datos *in-situ*

Los datos a utilizar corresponden a los datos arrojados por las estaciones LAB-net para el periodo entre enero y diciembre del 2015 y terrenos *in-situ* mensuales en los predios aledaños a estas estaciones para el periodo entre marzo y diciembre 2015.

I. Estación LAB-net

Ambas áreas de estudio presentan sitios de instalación LAB-net (Mattar *et al.*, 2014) donde ya se han desarrollado experiencias previas para el monitoreo del contenido de humedad del suelo (Olivera-Guerra *et al.*, 2015). Los instrumentos utilizados para monitorear la humedad del suelo en ambos sitios LAB-net corresponden a dos TDR (*Time domain reflectometry*) a 7 cm y a 20 cm (Campbell CS650 y CS616 respectivamente) de profundidad, los cuales miden la constante dieléctrica arrojando una onda electromagnética de alta frecuencia y midiendo su velocidad de propagación. Lo anterior entrega mediciones del contenido volumétrico del agua, las que permitieron realizar comparaciones con los datos estimados por el método óptico microondas-pasivas y de esta manera realizar la validación. Otros instrumentos instalados en las estaciones LAB-net se detallan a continuación.

Chimbarongo: La estación LAB-net en este sitio (Figura 6) almacena cada 5 minutos el promedio de las siguientes variables: temperatura del suelo a 7 cm y a 20 cm (*Campbell Scientific CS650* y *109*), flujo de calor del suelo (*Huskeflux HFP01SC*), temperatura radiométrica de la superficie (*Apogee SI-111*), temperatura del aire y humedad relativa a 2 metros (*Vaisala HMP60*); la radiación solar (*LICOR LI-160 200x*), radiación neta (*Kipp & Zonen NR-Lite 2*), precipitación (*Texas Electrónica TE525 MM*); y la velocidad y dirección del viento (*R. M. Young 3002*) (Mattar *et al.*, 2016).



Figura 6. Estación LAB-net Chimbarongo

Oromo: Por su parte, esta estación LAB-net (Figura 7) está configurada para entregar cada 5 minutos el promedio de las siguientes variables: temperatura del suelo a 7 cm (*CS650*), flujo de calor del suelo (*Huskeflux HFP01SC*), temperatura radiométrica de la superficie (*Apogee SI-111*), temperatura del aire y humedad relativa a 2 metros (*Rotronic HC253*),

radiación entrante y saliente de onda corta y de onda larga (*Kipp & Zonen CNR4*), precipitación (*Texas Electronics TE525MM*) y la velocidad y dirección del viento (*R. M. Young 3002*) (Mattar *et al.*, 2016).



Figura 7. Estación LAB-net Oromo

II. Terreno

En los dos sitios experimentales localizados en Chimbarongo y Oromo se realizaron medidas correspondientes a la humedad del suelo con dos instrumentos, el *Hydrosense 2* y el *ML3 theta-probe*, los cuales permiten estimar el contenido volumétrico de la humedad del suelo correspondiente al largo de las varas (12 y 5 cm respectivamente). Además se capturaron puntos con un GPS. Estas mediciones se realizaron una vez al mes para el periodo entre marzo del 2015 y febrero del 2016.

Chimbarongo: las medidas se desarrollaron sobre cultivos en hileras (Figura 8 (a), (b), (d), (e) y (g)) separadas por distancias de 5x5 metros, 8x5 metros, similares o superiores, capturando los valores de suelo desnudo y bajo el dosel. En el caso de otros cultivos o cultivos en barbecho –como tabaco y trigo (Figura 8 (c), (f))– se realizaron muestreos sistemáticos intentando abarcar la mayor superficie del cultivo.



(a)



(b)

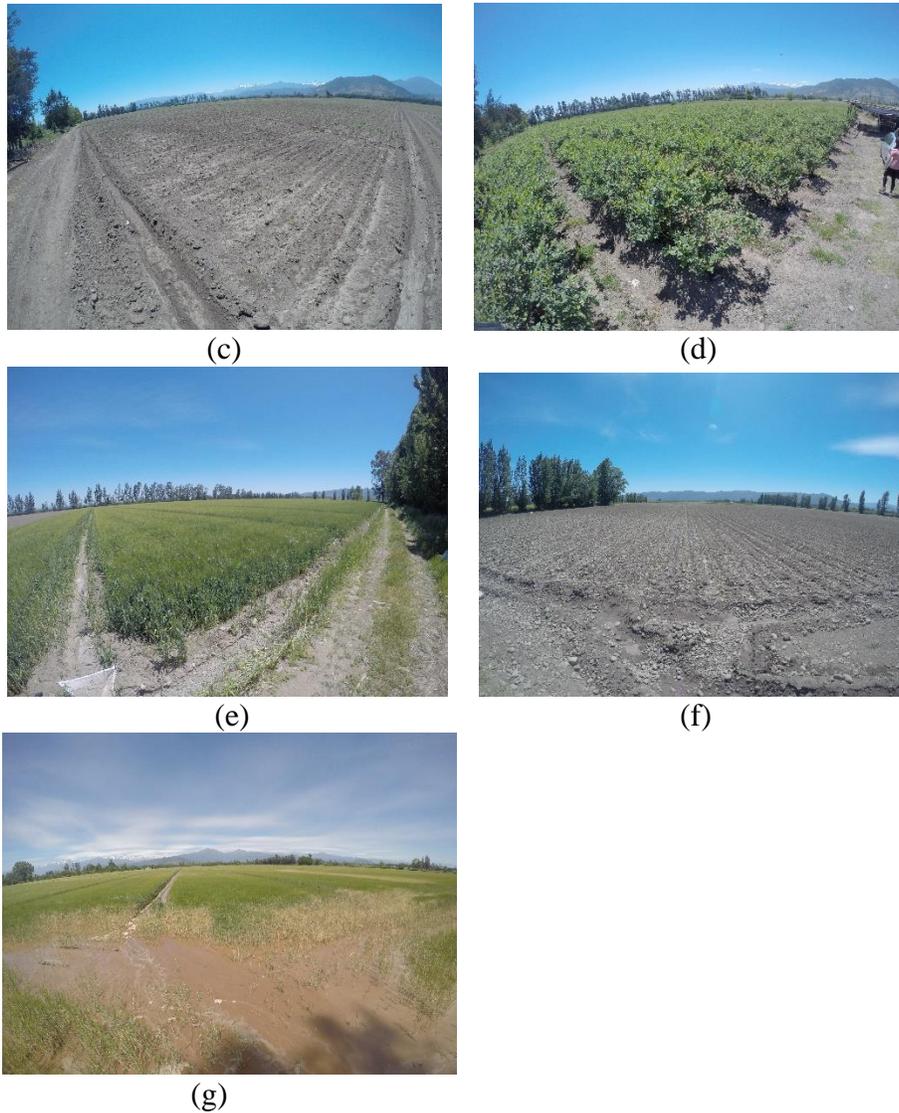


Figura 8. Cultivos: (a) frambuesa, (b) pimentón, (c) tabaco (barbecho), (d) arándanos, (e) trigo, (f) trigo (barbecho) y (g) trigo

Oromo: Las medidas se desarrollaron en praderas de secano de suelos ñadis y suelos trumao. El muestreo fue en torno a jaulas de exclusión de 0.5 x 2 metros dentro de una pequeña superficie de características homogéneas donde se realizaron tres mediciones por cada jaula de exclusión y monitoreo de praderas. Esto con el fin de para obtener un promedio con su respectiva desviación estándar. En promedio, los lugares monitoreados dos a tres jaulas de exclusión y fueron monitoreados más de 3 lugares (Figura 9).



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Continúa

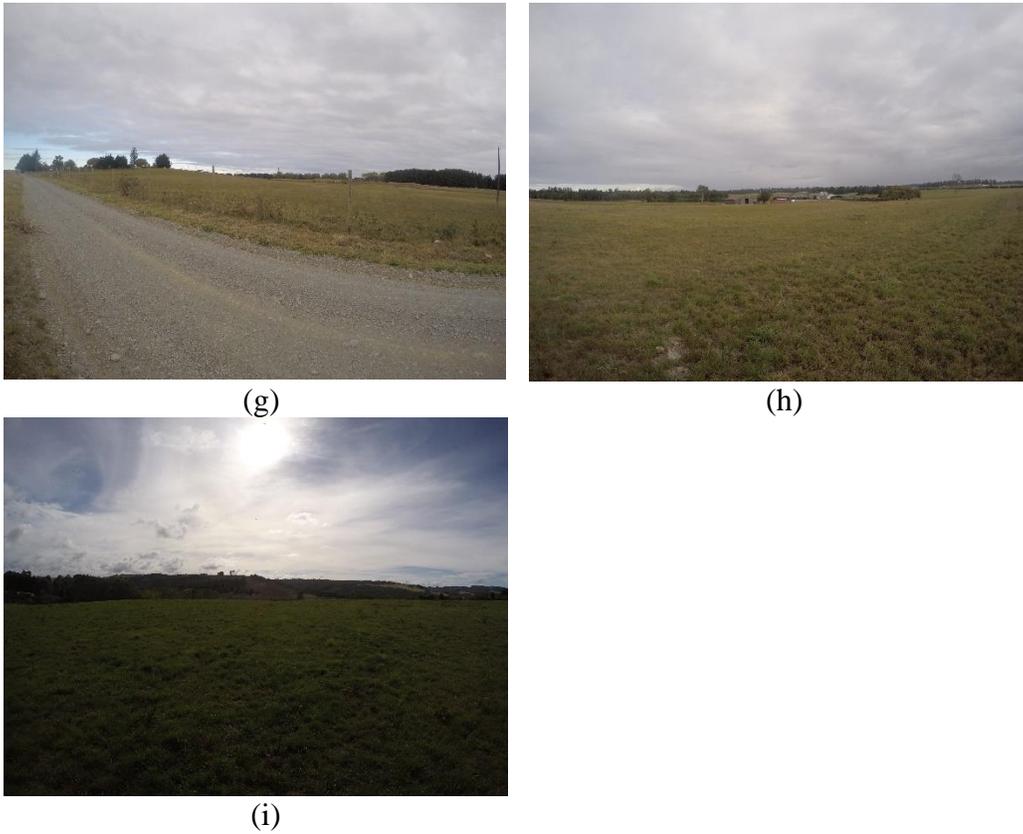


Figura 9. Praderas donde se realizaron muestreos en terreno en Oromo: (a) Frölich, (b) Gebauer, (c) Hinojosa, (d) Keim, (e) Los Hualles, (f) Amthauer, (g) Teuber, (h) Tronador y (i) Vesperinas. Fotos tomadas el 30 de marzo del 2015

Los muestreos en terreno mensuales fueron necesarios para detectar y analizar los cambios de la humedad de suelo en zonas con una alta heterogeneidad espacial, caso Chimbarongo y la homogeneidad que existe en Oromo con respecto la resolución espacial del método óptico microondas-pasivo (25 km x 25 km).

4.3 Métodos

4.3.1 Estimación la humedad del suelo mediante un método óptico microondas pasivo

Para estimar la humedad del suelo en las zonas de Chimbarongo y Oromo se utilizó el método óptico microondas-pasivo previamente calibrado en el área de estudio por Santamaría-Artigas *et al.* (2016) (1). Este método utiliza la temperatura de brillo emitida por la banda-L (SMOS L3TB), las temperaturas del suelo proporcionadas por ERA-Interim y un índice de vegetación (NDVI) obtenido por MODIS. Se estimó la humedad del suelo para el año 2015. Para ello, previamente los productos STL1, NDVI fueron sistematizados a los píxeles de la resolución espacial de SMOS L3TB (25 x 25 km) a través de un filtro de moda.

$$\log(w_s) = a \left(\log \left(1 - \frac{TB(\theta,H)}{T_c} \right) \right) + b \left(\log \left(1 - \frac{TB(\theta,V)}{T_c} \right) \right) + c * Veg + d \quad (1)$$

Donde w_s corresponde a la humedad, a , b , c y d a coeficientes de regresión, $TB(\theta,V)$ y $TB(\theta,H)$ corresponden a las temperaturas de brillo vertical y horizontal, T_c a la temperatura efectiva del suelo y Veg al indicador de vegetación NDVI. Los coeficientes a , b , c y d fueron tomados de Santamaría-Artigas *et al.* (2016).

Se filtraron los datos anómalos utilizando el índice de polarización $PR = (TB_v - TB_h) / (TB_v + TB_h)$, donde TB_v y TB_h corresponden a la temperatura de brillo vertical y horizontal respectivamente. Este índice permite identificar los errores en la señal microondas, como las producidas por el suelo congelado y los valores negativos que indican una inversión en la magnitud de la temperatura de brillo horizontal sobre la temperatura de brillo vertical, lo cual es un patrón anómalo (Mattar *et al.*, 2012).

4.3.2 Validación de la humedad del suelo estimada mediante datos entregados por la red LAB-net

La validación de la humedad del suelo obtenida mediante el método OPM se realizó con la aplicación de diversos estadísticos que permitieron validar los valores entregados por el método OPM con respecto a los datos de dos estaciones LAB-net así como las medidas de campo realizadas en los sitios de, Chimbarongo y Oromo. Para este proceso de validación, los datos de las estaciones LAB-net se procesaron para el periodo que corresponde al año 2015. La humedad del suelo estimada mediante el método OPM fue comparada con los datos de humedad del suelo medidos en la primera capa de profundidad de las estaciones LAB-net (7 centímetros), con el producto SWVL1 (*Volumetric soil water layer 1*), y con las mediciones *in-situ* realizadas entre marzo y diciembre del 2015, a través del coeficiente de correlación

(r), la raíz del error cuadrático medio ($RMSE$), la raíz del error cuadrático medio sin el sesgo ($ubRMSE$) y el sesgo ($bias$). Estos cuatro estadísticos son los más utilizados para la validación de productos de humedad del suelo derivados de sensores remotos, tales como SMOS, ASCAT, entre otros (Albergel *et al.*, 2013; Miernieki *et al.*, 2014).

La justificación de usar diversos estadísticos se debe a que estos se rigen por la naturaleza de la propia variable y son influenciados por su sensibilidad a otras variables, tales como precipitaciones, rugosidad del suelo, etc. (Entekhabi *et al.* 2010; Albergel *et al.*, 2013), los cuales se describen a continuación

El coeficiente de correlación (r) es el estadístico más utilizado para medir el grado de relación lineal entre la humedad del suelo estimada y observada, expresado en la ecuación (2):

$$r = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (estimada_n - \overline{estimada})(in\ situ_n - \overline{in\ situ})}{\sigma_{estimada} \sigma_{in\ situ}} \quad (2)$$

Donde, $\sigma_{estimada} \sigma_{in\ situ}$ son las desviaciones estándar de la humedad del suelo estimada e *in-situ* respectivamente, N es la longitud del registro en una estación y $\overline{estimada}$ e $\overline{in\ situ}$ representan los promedios de las estimaciones y mediciones *in-situ*. El rango para r es entre -1 y +1, donde el máximo valor es una constante positiva que no significa que los valores estimados e *in-situ* sean idénticos, solo indica que los dos campos tienen el mismo patrón. Para cuantificar las diferencias entre dos campos el estadístico más utilizado es el $RMSE$ (*root mean square error*), el cual incluye el sesgo en su estimación (3):

$$bias = \frac{\sum \epsilon_i - \theta_i}{N} \quad (3)$$

Donde, ϵ_i corresponde al dato estimado, θ_i al dato *in-situ* y N al tamaño de la muestra. Finalmente el $RMSE$ (4) se expresa como:

$$RMSE = \sqrt{bias^2 + \sigma^2} \quad (4)$$

A pesar que el $RMSE$ es el estadístico más utilizado en validaciones de diversas variables ambientales, para el caso de la humedad del suelo solo describe la variación vertical significativa, tales como efectos de la rugosidad, y puede estar comprometida si existen sesgos en la media y/o en la diferencias en la amplitud de las fluctuaciones estimadas por el método utilizado dando lugar a valores altos del $RMSE$ (Entekhabi *et al.*, 2010).

El sesgo ($bias$) es de gran utilidad, ya que indica la dirección media de los valores observados. Un sesgo positivo indica que el método de estimación tiende a subestimar los valores *in-situ*,

mientras que un sesgo negativo el método es subestimado por los valores *in-situ* (Albergel *et al.*, 2013). Su expresión se encuentra en la Ecuación (3).

Debido a que el *RMSE* se ve comprometido por la presencia de sesgos, un buen estadístico es el *ubRMSE* (*unbiased root mean square error*), el cual se calcula después de eliminar la diferencia de las medias a largo plazo (el sesgo), excluyendo los ciclos estacionales, pero incluyendo la variabilidad de las observaciones *in-situ* (Entekhabi *et al.*, 2010; Albergel *et al.*, 2013). Se expresa en la ecuación (5) y simplificada en la ecuación (6).

$$ubRMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \{[(estimada_n - \overline{estimada_n}) - (in\ situ_n - \overline{in\ situ_n})]^2\}} \quad (5)$$

$$ubRMSE^2 = RMSE^2 - Bias^2 \quad (6)$$

Adicionalmente, y como complemento a la validación se realizó el análisis de la irrigación y de eventos pluviométricos en Chimbarongo detectando el posible desfase al utilizar la serie de datos entregada por las estaciones LAB-net. Este análisis permitió examinar la concordancia de estos datos de humedad del suelo estimados por el método OPM analizando la evolución temporal de las precipitaciones en comparación con la humedad medida *in-situ* (Louvet *et al.* 2015 y Rötzer *et al.* 2014).

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

La figura 10 muestra la distribución de los sitios monitoreados para cada tipo de cultivo en la zona de Chimbarongo, y la curva fenológica representando el vigor de la vegetación mediante el NDVI de la zona ubicada al punto más próximo a la estación LAB-net. En esta figura se aprecian los muestreos *in-situ* realizados durante el año 2015 con el fin de caracterizar la información *in-situ* de manera espacial y temporal sobre los diversos tipos de cultivo. En el caso del cultivo de frambuesa, donde está instalada la estación LAB-net, el muestreo fue el más representativo en términos de número de puntos y fecha. Lo anterior se debe a las dimensiones del cultivo y a las diversas fases fenológicas que permitieron caracterizar los distintos estados del cultivo en una fase de máxima irrigación, durante los meses de diciembre a febrero, y en una fase donde solo hubo aporte pluviométrico (meses de julio y agosto).

Mientras en el caso de cultivos como tabaco, la gran extensión (mayor a 16 hectáreas), imposibilitaba realizar un muestreo homogéneo abarcando la mayor parte del predio, debido a dos razones fundamentales: la dificultad para acceder a ciertas zonas y a la gran abundancia de suelos con clastos (mayor a 30 cm) y un aumento de la concentración de estos en los primeros centímetros de perfil imposibilitando la medida con los instrumentos *TDR CS616* y *Thetraprobe ML3*. Es importante destacar que los cultivos de pimentón y poroto verde fueron rotados por trigo a mediados del 2015 con el fin de aprovechar el aporte hídrico debido a la pluviometría de invierno (julio, agosto y septiembre). También cabe destacar que las variaciones del NDVI durante el 2015 no fueron significativas, presentando una amplitud menor a 0.2, lo que hace referencia a una superficie de alto vigor de vegetación y por ende, un alto contenido de agua. Finalmente, se debe agregar que existen factores que impidieron la toma de datos en algunas fechas como para el caso de tabaco 2, porotos verdes y arándanos, que hacen relación con la implementación de agroquímicos en el momento de realizar medidas *in-situ*.

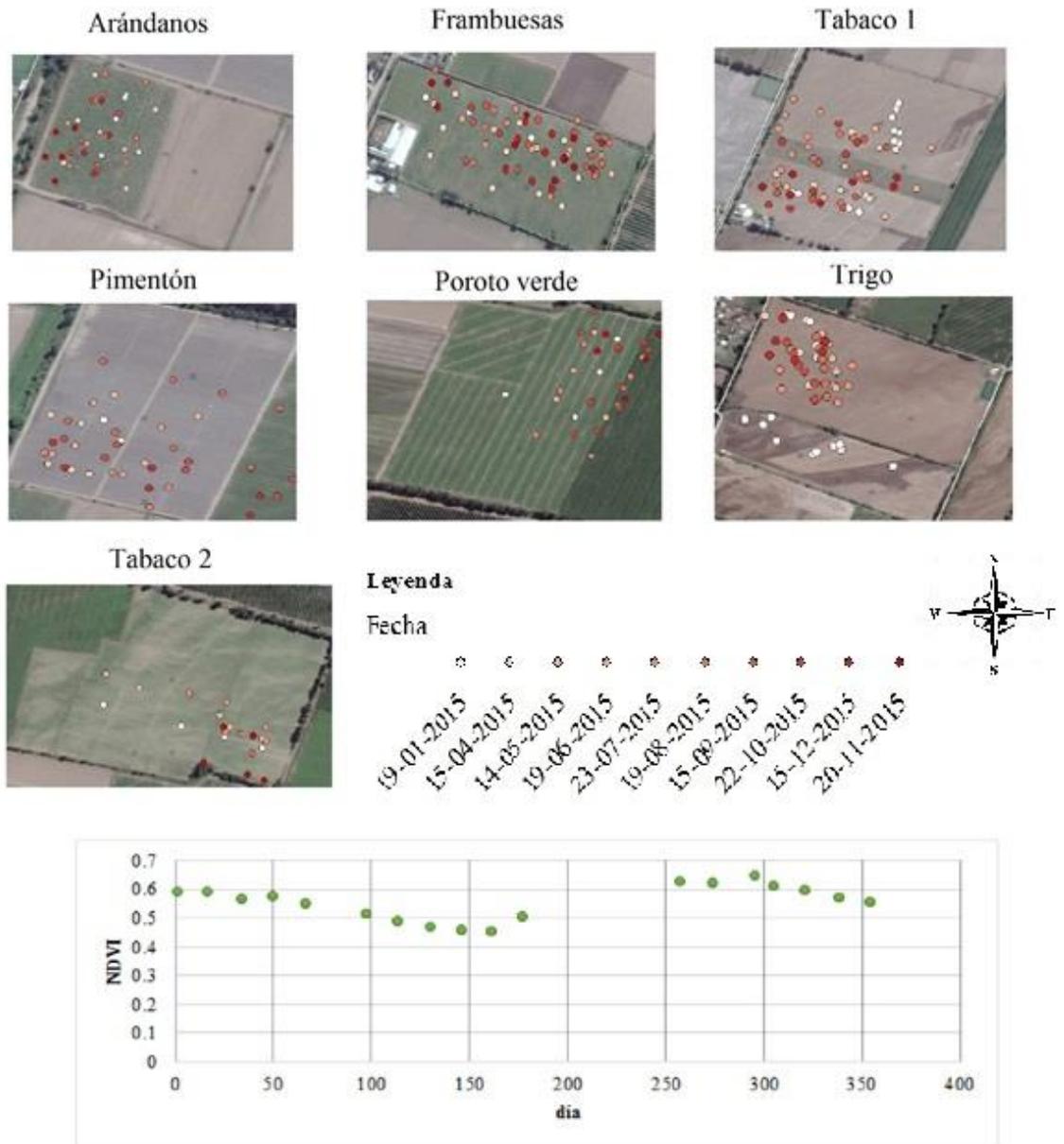


Figura 10. Sitios de muestreo y NDVI para el año 2015 en el sector de Chimbarongo

Para el caso de Oromo (Figura 11), la distribución de los puntos correspondió a un criterio específico de medición, ya que las medidas se realizaron según las ubicaciones de las jaulas de exclusión y control de crecimiento de praderas que se encontraban en los predios. Si bien es cierto, los predios corresponden a praderas, estas presentan diferencias respecto al grupo de suelo (trumao o ñadis), tales como sectores de Tronador, Teuber y Keim (suelos trumaos) y sectores de Los Laureles, Gebauer y Los Hualles (suelos ñadis) generando contrastes significativos en los valores de humedad del suelo medido *in-situ*, con valores mayores en los suelos ñadis, presentan un pobre drenaje. Otras diferencias destacan el tipo de manejo (riego y/o fertilización) y el sistema pastoril (bovino lechero, carne u ovino).

La distribución de los puntos de medida es concentrada alrededor de las jaulas de exclusión y crecimiento de praderas, puesto que estas son representativas del terreno generando valores medios del sitio y sus respectivas variaciones. El NDVI es significativamente mayor que el sector de Chimbarongo ($p < 0.05$), siendo el valor mínimo de 0.5 y una tendencia constante, cercana a 0.8 entre los meses de mayo a diciembre. Se destaca el significativo decrecimiento del vigor entre los primeros meses del 2015, experimentando una variación de un 30% entre enero y febrero. Este efecto es atribuido principalmente a una abrupta disminución de precipitaciones (2.5 mm en enero registrados en la estación Oromo) que influyó drásticamente en el vigor de la vegetación, en el contenido volumétrico del agua en el suelo y por ende en la productividad de las praderas.

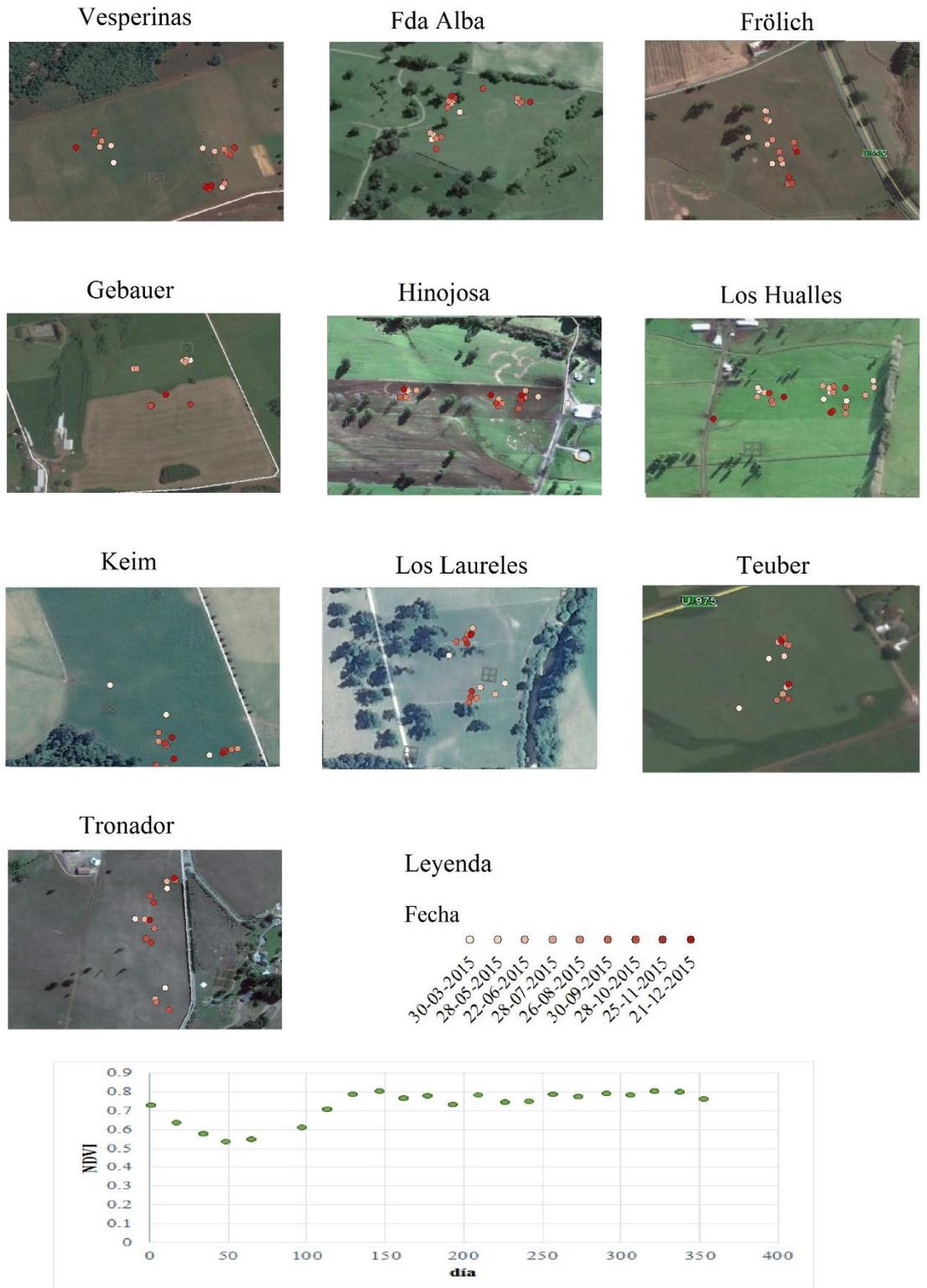


Figura 11. Sitios de muestreo y NDVI para el año 2015 en el sector de Oromo

5.1 Estimación la humedad del suelo mediante un método óptico microondas pasivo

Los cuadros 2 y 3 muestran los coeficientes de calibración utilizados para Chimbarongo y Oromo respectivamente. Estos coeficientes derivan del método OPM y fueron estimados para una resolución de 25 x 25 km donde se encontraban las estaciones LAB-net. Los coeficientes en ambos sitios no muestran una variación estadísticamente significativa ($p>0.05$) para los tres años de calibración (2010, 2011 y 2012). Estos coeficientes fueron derivados de Santamaría-Artigas *et al* (2016) donde se describió un alto coeficiente de determinación al incluir el NDVI en el algoritmo OPM. Aunque cada coeficiente (a, b, c y d) no cambia significativamente según el año, estos si experimentan una diferencia al ser estimados con o sin NDVI. Similares trabajos demuestran este efecto con otros indicadores de vegetación como LAI y el mismo NDVI (Parrens *et al.*, 2011; Miernecki *et al.*, 2014).

Para el caso de este trabajo, se utilizó el promedio de los coeficientes para la estimación de la humedad del suelo a partir del método OPM. Los resultados de esta estimación para el 2015 y sus respectivas comparaciones con datos *in-situ* se muestran en la figura 12 para Chimbarongo y 13 para Oromo, respectivamente.

Cuadro 2. Coeficientes de calibración de Chimbarongo

Coeficiente	Coeficientes con VEG=NDVI				Coeficientes con VEG=0			
	2010	2011	2012	Promedio	2010	2011	2012	Promedio
a	0.4655	0.3488	0.5036	0.4393	0.6321	0.5465	0.6567	0.6117
b	0.1055	0.1333	0.0767	0.1052	0.1366	0.1745	0.0672	0.1261
c	0.2470	0.5491	-0.1017	0.2315	-0.6879	-0.6422	-0.8868	-0.7390
d	-0.9087	-1.1688	-0.7900	-0.9558				

Cuadro 3. Coeficientes de calibración de Oromo

Coeficiente	Coeficientes con VEG=NDVI				Coeficientes con VEG=0			
	2010	2011	2012	Promedio	2010	2011	2012	Promedio
a	0.0726	0.1650	0.0221	0.0866	0.0541	0.1571	0.0101	0.0738
b	0.0994	0.1289	0.2369	0.1551	0.1009	0.1324	0.2492	0.1608
c	0.1307	0.2786	0.4241	0.2778	-0.8049	-0.5763	-0.5888	-0.6566
d	-0.8782	-0.7982	-0.9503	-0.8756				

En relación a los valores de estimación de la humedad del suelo, la figura 12 muestra la estimación de la humedad del suelo para el sitio de Chimbarongo. Los datos de la estación LAB-net de Chimbarongo presentan una marcada influencia local debido a los periodos de irrigación que van desde noviembre a marzo. Estos periodos, en los cuales existe una gran disponibilidad de agua para su uso en riego, presentan discrepancias con los valores

entregados por SMOS, ERA Interim o estimados por el método OPM. Más aun, es posible establecer que los sensores instalados a 7 y a 20 cm, muestran un contenido volumétrico de agua en el suelo similar, lo que indica la importante cantidad de agua usada para irrigación en fase con las propiedades del suelo descritas en Mattar *et al* (2016). Sin embargo entre mayo y septiembre si se evidencian diferencias, lo cual se explica por el cambio de lugar de la estación y su posterior calibración en el nuevo sitio.

Los muestreos en terreno realizados durante el 2015 muestran también una diferencia con la estación LAB-net, lo que podría indicar que la zona donde mide la estación LAB-net Chimbarongo es sensiblemente mayor que toda la zona donde se realizaron los muestreos en terreno mensualmente. En efecto, para los meses de verano (diciembre, enero y febrero), las estimaciones de humedad del suelo entregadas por ERA presentan una estimación en fase con las precipitaciones y mayor a los resultados entregados por SMOS y el método OPM al incluir o no el NDVI. ERA también muestra un comportamiento distinto en los meses de invierno en comparación a SMOS y OPM, pero no es posible hacer un análisis de los valores entregados por ERA y LAB-net debido a la falta de datos en ese período. De las estimaciones realizadas, el método OPM sin NDVI tiende a generar una sub-estimación (en promedio) de la humedad del suelo en la zona de estudio de Chimbarongo. Se observa, además, que los muestreos *in-situ* mensuales tienen un comportamiento similar a los entregados por el método OPM con NDVI, lo que vuelve a explicar la sitio-dependencia de la estación LAB-net.

Para el caso de SMOS, los valores de humedad del suelo entregados por el producto SM3 (humedad del suelo) tienen una leve correlación con los eventos pluviométricos, no obstante esto no ocurre en invierno (julio y agosto), sumado a que no existen datos con suficiente calidad para poder observar este tipo de relaciones.

Un aspecto importante para destacar es el efecto “*Dry down*” que ocurren entre noviembre y enero, donde la humedad del suelo disminuye en los valores entregados por ERA Interim, SMOS y el método OPM (con y sin NDVI). Además, una disminución también es observada en los muestreos mensuales *in-situ*.

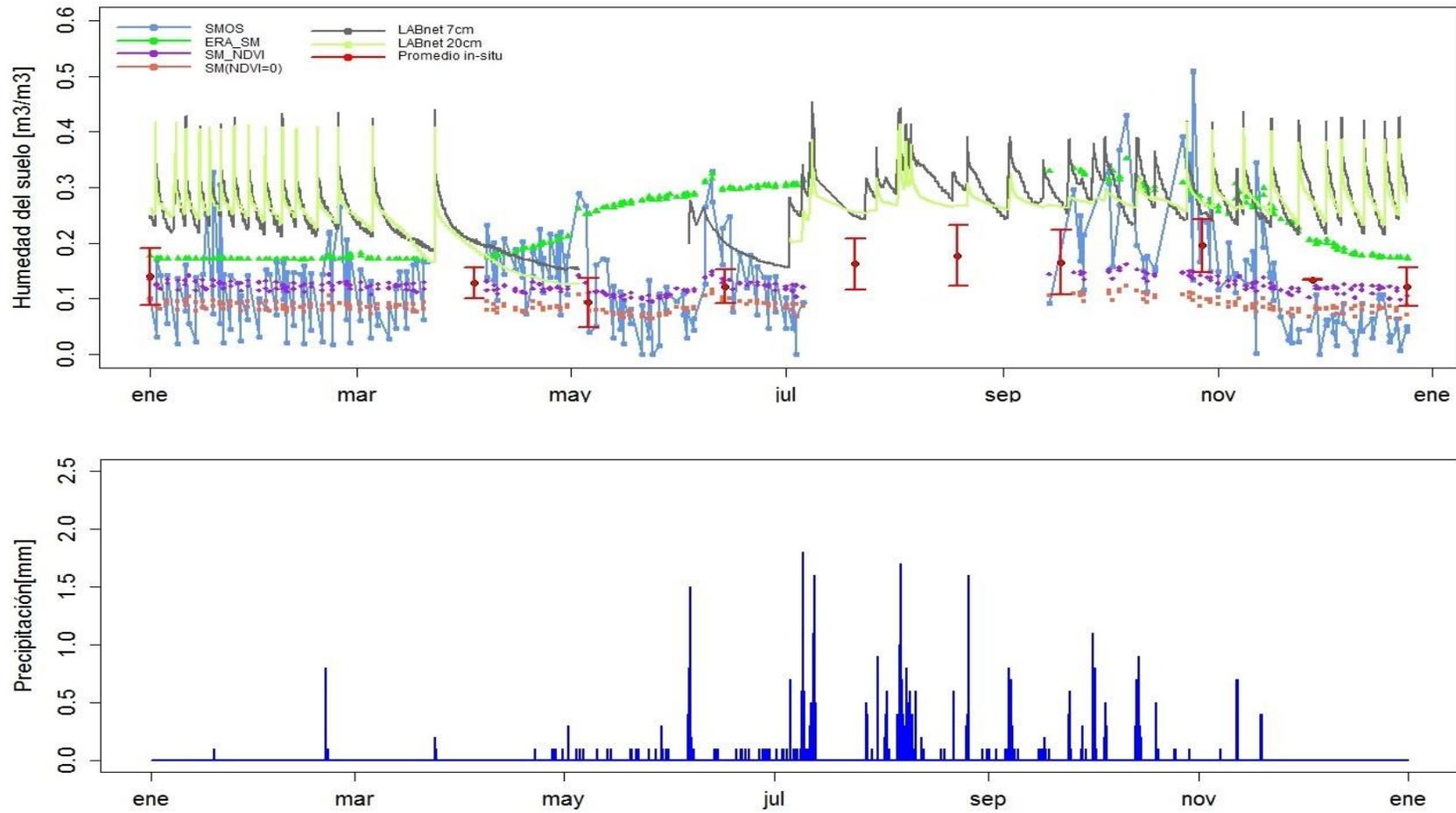


Figura 12. Humedad del suelo (arriba) y precipitación (abajo) para año 2015, Chimbarongo

A diferencia de Chimbarongo, los datos LAB-net de la estación Oromo si presentan diferencias en la humedad del suelo medida a distinta profundidad (7 y 20 cm), siendo levemente menor la humedad del suelo medida a 20 centímetros. Esto no se puede apreciar en los meses de invierno, debido a la falta de datos a 20 cm (Figura 13).

Para el caso de Oromo, las estimaciones realizadas por el método OPM con y sin NDVI son similares a los valores de humedad del suelo entregados por ERA Interim durante todo el 2015. Sin embargo, los valores estimados por el OPM son poco sensibles a los eventos pluviométricos, donde los valores de ERA presentan variaciones atribuibles a este tipo de variable meteorológica. Si bien, las estimaciones del OPM muestran una variación justo en los periodos donde ocurrieron eventos pluviométricos, estos son leves y solo evidenciables en los meses de otoño (ejemplo marzo y abril) y primavera (por ejemplo, noviembre).

Por otra parte, la humedad del suelo entregada por SMOS es muy similar a los valores entregados por la estación LAB-net de Oromo en los meses de verano y otoño, pero muy diferente en magnitud para los meses de invierno, lo que se atribuye principalmente al elevado contenido de agua en el suelo entregado por SMOS ($>0.8 \text{ m}^3/\text{m}^3$). Esto se puede atribuir al efecto de escurrimiento superficial que ocurre en gran parte de los suelos de la región de Los Lagos que corresponden al tipo ñadis, caracterizado por un mal drenaje producto de una capa de fierrillo ubicada a 60 centímetros de profundidad (Casanova *et al.*, 2013). Se destaca que los valores los muestreos en terreno sobre los diferentes predios presentan un valor mayor que la estación de Oromo así como la estimación del OPM y ERA Interim reanalysis. Lo anterior se puede explicar a que en la mayor parte de los predios, el efecto del manejo genera una mayor cobertura vegetal y por ende una mayor humedad. Sin embargo, este manejo en la zona es esporádico o inexistente. Finalmente, es importante destacar que para los meses de marzo y diciembre del 2015, es posible apreciar una alta variación en contraste con la variación de los predios en invierno, lo cual se explica, en abril por un episodio de importantes precipitaciones, mientras que en diciembre se explica por el impacto del riego en las praderas, donde es posible encontrar sectores con valores extremos al contenido volumétrico de agua en el suelo que pueden variar un 35% en verano y menos de un 5% en invierno.

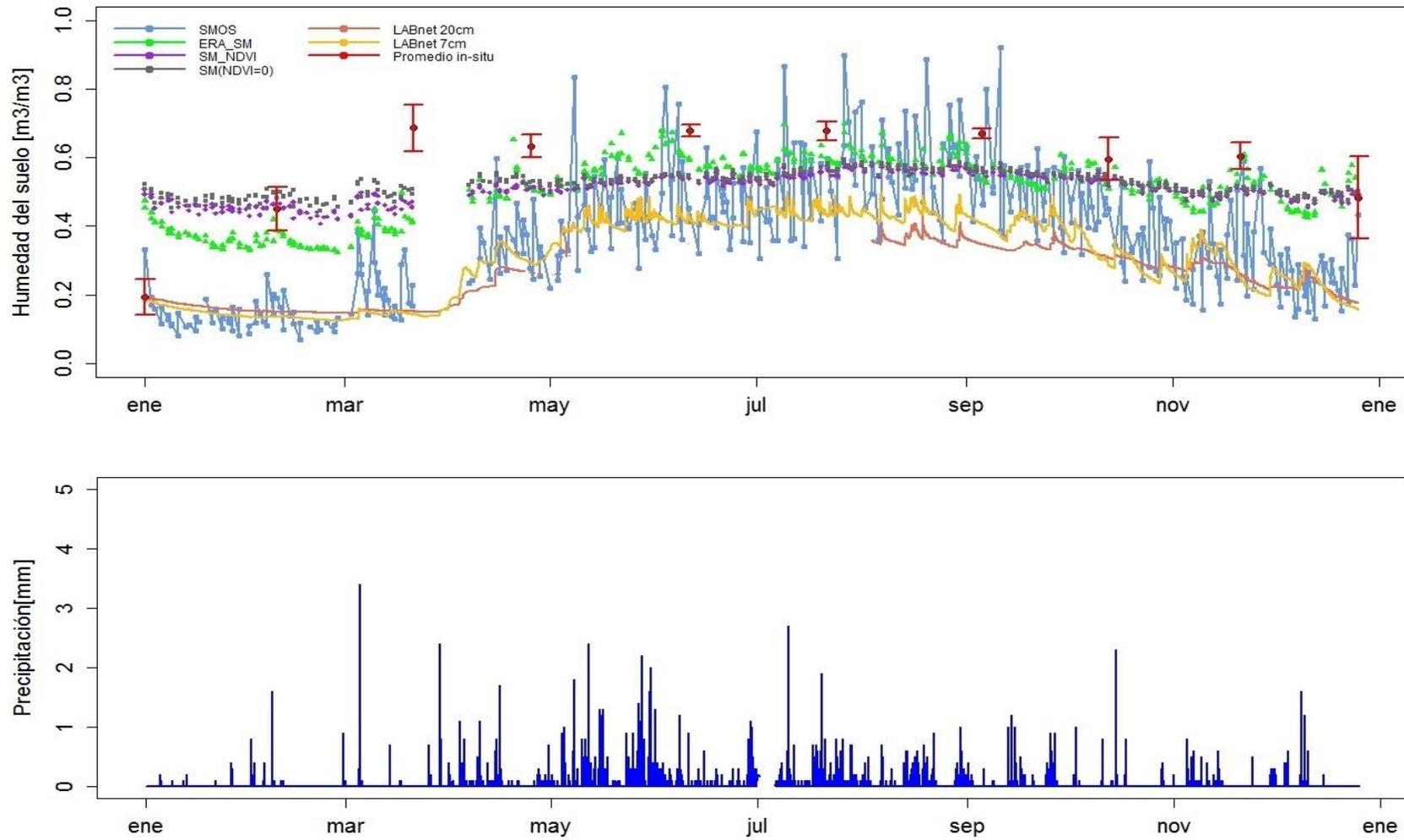


Figura 13. Humedad del suelo (arriba) y precipitación (abajo) para año 2015, Oromo

5.2 Validación la estimación de la humedad del suelo mediante datos entregados por la red LAB-net

La validación de las estimaciones del OPM se presenta en los cuadros 4 y 5 para Chimbarongo y Oromo respectivamente. A partir de los resultados, es posible apreciar que el RMSE disminuye al utilizar el NDVI en las estimaciones de la humedad del suelo. Esta disminución es, en promedio, similar un 1% m³/m³. Un aspecto fundamental es la sub estimación de los valores de humedad del suelo estimados a partir del OPM que se aprecia en el sector de Chimbarongo. Esto se puede evidenciar debido a los negativos los *bias* calculados para las comparaciones entre OPM y ERA, LAB-net y valores *in-situ* mensuales. Sin embargo, esto último no se observa en el sector de Oromo (LAB-net), donde los valores de bias varían según el año experimentando un aumento o disminución con los valores de ERA.

La mayor correlación existe en la zona de Oromo en relación a la estimación de la humedad del suelo mediante OPM y ERA (mayor a 0.8), mientras que en Chimbarongo la correlación entre estos dos modelos es muy baja. Para la comparación entre el OPM y los datos de la estación LAB-net, la correlación es menor a 0.4, probablemente atribuible al efecto sitio dependiente que generan las estaciones. Es importante destacar que el efecto del NDVI en las estimaciones de la humedad del suelo aumenta el coeficiente de correlación al comparar estas estimaciones con valores de humedad del suelo entregados por ERA y los muestreos en terreno mensuales. Este resultado destaca el uso del NDVI como una variable importante en el uso de OPM al mejorar las estimaciones de la humedad del suelo en relación al no uso del NDVI.

En el caso de Chimbarongo el ubRMSE es considerablemente menor al RMSE, debido a los altos valores del bias para ERA, LABnet y muestreos en terreno. Esto explica que existe una alta variabilidad de las observaciones en Chimbarongo, la cual es similar en todos los casos. Lo anterior disminuye considerablemente en Oromo por el efecto del bias.

Cuadro 4. Validación método OPM con NDVI y con NDVI=0, Chimbarongo

Variables	SM(VEG=NDVI)				SM(VEG=0)			
	R	bias	RMSE	ubRMSE	R	bias	RMSE	ubRMSE
ERA	0.28927	-0.10466	0.11804	0.05459	0.34463	-0.14097	0.15098	0.05408
LABnet	0.23266	-0.12966	0.13952	0.05152	0.15023	-0.16105	0.16857	0.04978
Terrenos	0.88044	-0.15380	0.16336	0.05507	0.84561	-0.15515	0.16380	0.05253

Cuadro 5. Validación método OPM con NDVI y con NDVI=0, Oromo

Variables	SM(VEG=NDVI)				SM(VEG=0)			
	R	bias	RMSE	ubRMSE	R	bias	RMSE	ubRMSE
ERA	0.90212	0.00161	0.03443	0.03439	0.83730	0.00960	0.04014	0.03898
LABnet	0.02878	-0.00605	0.09260	0.09240	0.02922	0.00183	0.09715	0.09713
terrenos	0.66107	0.00786	0.04475	0.04406	0.47137	0.00801	0.04472	0.04399

6. DISCUSIÓN

El uso del índice de vegetación NDVI mejora la estimación de la humedad del suelo al ser comparado con datos de ERA y muestreos en terreno. Si bien es cierto, existen evidencias previas que demuestran el impacto del NDVI a nivel *in-situ* (Mattar *et al.*, 2012) y a nivel regional (Santamaría-Artigas *et al.*, 2016), los resultados presentados en este trabajo demuestran la fusión sinérgica óptico-microondas pasivo como una herramienta útil para la estimación de la humedad del suelo de forma independiente a la entregada por SMOS. Lo anterior contribuye a la interacción entre los datos de diferentes fuentes, la banda L del dominio microondas, el dominio óptico y los datos de reanalysis.

Cabe destacar que en este trabajo solo se utilizó el ángulo de 42.5° de los datos de SMOS para la estimación de la humedad del suelo, a pesar que trabajos previos han utilizado la bi o multi angularidad como fuente adicional de información (Mattar *et al.*, 2012; Wigneron *et al.*, 2004), ya que este ángulo es el que concentra la mayor cantidad de datos.

Por otra parte, para la estimación de la humedad del suelo mediante el método óptico microondas pasivo se debe tener en cuenta que la información proveniente de las distintas fuentes es a diferentes profundidades del suelo, tales como la temperatura de brillo de SMOS, entre 0 y 4 cm de profundidad, el índice de vegetación a nivel de superficie y la temperatura de ERA Interim entre los primeros 7 cm del suelo. Es así que los valores de ERA y SMOS pueden variar producto de las posibles diferencias en el contenido de agua en el suelo y su relación a las estimaciones del OPM.

Las medidas de SMOS solo revelan el fuerte impacto de la precipitación en la estimación de la humedad del suelo. Esto se aprecia en los sectores de Chimbarongo y Oromo. No obstante, la variación presentada por SMOS disminuye al utilizar el método OPM en los mismos sectores, encontrando resultados similares a ERA, principalmente en el sector de Oromo.

Estos resultados muestran ciertas dificultades al utilizar los valores de SMOS de manera directa como un simple estimador de la humedad del suelo en Chile sin previo análisis. El uso de valores de humedad del suelo de SMOS en las zonas de estudio analizadas, podría generar ciertas falencias al utilizarse en estimación de índices de sequía o derivados, a modo de ejemplo el Índice de Severidad de la Sequía de Palmer (Palmer, 1965) que requiere en su algoritmo de la variable mencionada, tendiendo a sub o sobre estimar este tipo de índices hídricos en Chile. Un factor relevante a analizar en el método OPM es la resolución espacial entregada por SMOS de un área equivalente a 25 x 25 km, la cual no es representativa en zonas heterogéneas.

Finalmente, la validación de este trabajo ha sido parcial y puede ser mejorada mediante más años de calibración para ver la variación con respecto a fenómenos como El niño y la validación *in-situ* en sitios más representativos de la región, los cuales no presenten irrigación. Por lo tanto, es de esperar que una vez mejorada esta validación, se produzcan avances significativos en el uso de sistemas sinérgicos para la estimación de la humedad.

7. CONCLUSIÓN

En este trabajo se validaron, por primera vez en Chile, los valores de humedad del suelo estimados mediante un método óptico microondas pasivo a partir de datos estaciones de monitoreo y muestreos en terreno de esta variable. Los resultados muestran que el uso del NDVI en la estimación del OPM mejoran sustancialmente los valores de humedad del suelo estimada, los cuales tienden a ser comparables con los valores estimados desde ERA Interim reanalysis y las medidas *in-situ*, pero solo en zonas homogéneas.

La estimación de la humedad del suelo en Chile mediante el método OPM genera una importante alternativa para la entrega de información crítica en los sistemas productivos agropecuarios. El uso de información espacio-temporal a nivel nacional de la humedad del suelo presentaría un significativo avance ante futuros eventos climáticos extremos como sequías o para ser incorporadas en sistemas de alerta y monitoreo nacional como el caso de los incendios.

Finalmente, la disminución de la productividad agrícola y pecuaria que ha registrado Chile en los últimos años se podría aminorar con la inclusión de estas nuevas fuentes para el manejo, destacando además, que Chile es un país considerablemente vulnerable frente al cambio climático, por lo que este tipo de información es fundamental para la toma de decisiones frente a eventos extremos como sequías y riesgo de incendios.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Ahmad, M.F.; S. Runping and Y. Jing. 2012. Soil Moisture Retrieval through Satellite Data for Gansu and Xinjiang Region of China. *Pakistan Journal of Meteorology* 9(17):93-98
- Albergel, C.; P. De Rosnay.; C. Grunier; J. Muñoz-Sabater; S. Hasenauer; L. Isaksen *et al.* 2011. Evaluation of remotely sensed and modelled soil moisture products using global ground-based *in-situ* observations. *Remote Sensing of Environment*, 118:215-226.
- Albergel, C.; W. Dorigo; R.H. Reichle.; G. Balsamo; P. De Rosnay; J. Muñoz-Sabater *et al.* 2013. Skill and Global Trend Analysis of Soil Moisture from Reanalyses and Microwave Remote Sensing. *J. Hydrometeorol*, 14:1259–1277
- Albergel, C.; L. Brocca; W. Wagner; P. De Rosnay and J.C. Calvet. 2013. Selection of performance metrics for global soil moisture products: the case of ASCAT product. *Remote Sensing of Energy Fluxes and Soil Moisture Content*. 18:427-444
- Balsamo, G.; C. Albergel; A. Beljaars.; S. Boussetta; E. Brun; H. Cloke *et al.* 2015. ERA-Interim/Land: a global land surface reanalysis data set. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 19:389-407
- Bindlish, R.; T. Jackson; M. Cosh; T. Zhao and P. O’Neill. 2015. Global Soil Moisture From the Aquarius/SAC-D Satellite: Description and Initial Assessment. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 12(5): 923-927
- Brocca, L.; R. Morbidelli.; F. Melone and T. Moramarco. 2007. Soil moisture spatial variability in experimental areas of Central Italy, *J. Hydrol.*, 333:356–373.
- Brocca, L.; F. Melone; T. Moramarco and R. Morbidelli. 2010. Spatial-temporal variability of soil moisture and its estimation across scales. *Water Resources Research*. 46 (2): 14 p.
- Casanova M.; O. Salazar; O. Seguel and W. Luzio. 201. *The Soils of Chile*. Universidad de Chile. Editorial Springer. 183 pp.
- Chen, J. M. and J. Cihlar. 1996. Retrieving Leaf Area Index of Boreal Conifer Forests Using Landsat TM Images. *Remote Sensing of Environment*, 55:153-162
- CIREN. s.a. Estudio Integral de Riego de la Cuenca del Río Mataquito: Tomo C: Suelos. 250p.
- CIREN 1978, Estudio de Suelos de la provincia de Valdivia. Estudio Realizado en Convenio IREN-Universidad Austral de Chile, Fac. de Ciencias Agrarias, Insto, de Suelos y Abonos, Santiago. 84-85.

- Dee, D.P.; S.M. Uppala; A.J. Simmons; P. Berrisford; P. Poli; S. Kobayashi. *et al.* 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 137:553-597
- Dobriyal, P.; A. Qureshi; R. Badola and S. Hussain. 2012. A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management. *Journal of Hydrology*, 458–459
- Dorigo, W.A.; W. Wagner; R. Hohensinn; S. Hahn; C. Paulik; M. Drusch *et al.* 2011. The International Soil Moisture Network: a data hosting facility for global *in-situ* soil moisture measurements. *J. Hydrol.* 8:1609-1663.
- Eltahir, E. 1998. A Soil Moisture-Rainfall Feedback Mechanism: 1. Theory and observations. *Water Resources Research.* 34(4):765-776.
- Entekhabi, D. E.; P. Njoku; T. O'Neill; J. Jackson; J. Thomas; J. Entin and I. Eastwood. 2010. The Soil Moisture Active/Passive Mission (SMAP), *Eos Trans.* 88(52)
- Entin, J. K.; A. Robock; K.Y. Vinnikov; S.E. Hollinger; S. Liu and A. Namkhai. 2000. Temporal and spatial scales of observed soil moisture variations in the extratropics, *J. Geophys. Res.*105: 11865–11877.
- Hermosilla, S. M. and R. J. Cárdenas. 2007. Determinación de alofán en suelos derivados de cenizas volcánicas del sur de Chile y análisis general de resultados", Universidad de La Frontera.
- Holzman, M.E.; R. Rivas and M.C. Piccolo. 2014. Estimating soil moisture and the relationship with crop yield using surface temperature and vegetation index. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation.* 28: 181-192
- Huete; A.R.; K. Didan; T. Miura; E.P. Rodriguez; X.D. Gao and L.G. Ferreira. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices, *Remote Sensing of Environment* 83:195–213.
- Jackson, T. J., and T.J. Schmugge. 1991. Vegetation effects on the microwave emission of soils. *Remote Sensing of Environment.* 36: 203–212.
- Jackson, T.J.; D. Chen; M. Cosh; F. Li; M. Anderson and C. Walthall. 2004. Vegetation water content mapping using Landsat data derived normalized difference water index for corn and soybeans. *Remote Sensing of Environment.* 92: 475-482.
- Jackson, T.; R. Bindlish; M.H. Cosh; T. Zhao; P.J. Starks; D. Bosch *et al.* 2012. Validation of Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) Soil Moisture Over Watershed Networks in the U.S. *Proc. IEEE.* 50(5):1530-1543.

- Kerr, Y. 2007. Soil moisture from space: Where are we? *Hydrogeology Journal*, 15: 117–120
- Kerr, Y.H.; P. Waldteufel; J.P. Wigneron; S. Delwart; F. Cabot; J.M Boutin *et al.* 2010. The SMOS Mission: New Tool for Monitoring Key Elements of the Global Water Cycle. *Proc. IEEE*. 98(5):666–687.
- Kerr, Y.H.; P. Waldteufel; P. Richaume; J.P. Wigneron; P. Ferrazzoli; A. Mahmoodi *et al.* 2012. The SMOS Soil Moisture Retrieval Algorithm. *Proc. IEEE*. 50(5):1384-1403.
- Koster, R.; P.A. Dirmeyer; Z. Guo; G. Bonan; E. Chan; C.T. Gordon *et al.* 2004. Regions of Strong Coupling Between Soil Moisture and Precipitation. *Science*. 305: 1138 - 1140
- Kottek, M.; J. Grieser; C. Beck; B. Rudolf and F. Rubel. 2006. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*. 15(3):259-263
- Louvet, S.; T. Pellarin; A. Al Bitar; B. Cappelaere; S. Galle; M. Grippa *et al.* 2015.. SMOS soil moisture product evaluation over West-Africa from local to regional scale. *Remote Sensing of Environment* 156: 383-394.
- Mallick, K.; B. Bhattacharya and N.K. Patel. 2009. Estimating volumetric surface moisture content for cropped soils using a soil wetness index based on surface temperature and NDVI. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(8): 1327–1342.
- Mattar, C.; J.P Wigneron; J.A. Sobrino; N. Novello; J.C. Calvet; C. Albergel *et al.* 2012. A Combined Optical-Microwave Method to Retrieve Soil Moisture Over Vegetated Areas. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing* 50(5): 1404-1413.
- Mattar, C.; A. Santamaría-Artigas; C. Durán-Alarcón; L. Olivera-Guerra and R. Fuster. 2014. LAB-net the First Chilean soil moisture network for Remote Sensing Applications. *Proc. IV Recent Advances in Quantitative Remote Sensing (RAQRS)*, 22 – 26 Septiembre, Valencia, España.
- Mattar, C.; A. Santamaría-Artigas; C. Durán-Alarcón; L. Olivera-Guerra; R. Fuster y D. Borvarán. 2016. The LAB-net soil moisture network: application to termal remote Sensing and Surface energy balance.
- Mialon, A.; J.P. Wigneron; P. De Rosnay; M.J. Escorihuel; Y.H. Kerr. 2012. Evaluating the L-MEB Model from Long-Term Microwave Measurements Over a Rough Field. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 50(5)
- Miernecki, M.; J.P. Wigneron; E. López-Baeza; Y. Kerr; R. De Jeu; G. De Lannoy *et al.* 2014. Comparison of SMOS and SMAP soil moisture retrieval approaches using tower-based radiometer data over a vineyard field. *Remote Sensing of Environment*. 154: 89-101.

- Mwangi, E.; F. Wetterhall; E. Dutra; F. Di Giuseppe and F. Pappenberger. 2014. Forecasting droughts in East Africa. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18, 611-620.
- Njoku, E.G. and D. Entekhabi. 1996. Passive microwave remote sensing of soil moisture. *J. Hydrol.* 184, 101–129.
- Olivera-Guerra, L.E; O. Merlin; C. Mattar; C. Durán-Alarcón; A. Santamaría-Artigas and V. Stefan. 2015. Combining meteorological and lysimeter data to evaluate energy and water fluxes over a row crop for remote sensing applications. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 26 – 31 July 2015, Milan, Italy.
- Palmer, W.C. (1965): Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: the new Crop Moisture Index – *Weatherwise*, 21:156-161.
- Panciera, R.; Walker, J.P; Kalma, J.D; Kim, E.J; Saleh, K. and Wigneron, J.P. 2009. Evaluation of the SMOS L-MEB passive microwave soil moisture retrieval algorithm. *Remote Sensing of Environment.* 113: 435-444
- Parrens, M.; E. Zakharova; S. Lafont; J.C. Calvet; Y. Kerr; W. Wagner and J.P. Wigneron. 2011. Comparing Soil moisture retrievals from SMOS and ASCAT over France. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss* 8:8565-8607
- Paulik C.; W. Dorigo; W. Wagner and R. Kidd R. 2014. Validation of the ASCAT Soil Water Index using *in-situ* data from the International Soil Moisture Network. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 30: 1–8
- Pellarin, T.; J.C. Calvet and J.P. Wigneron. 2003. Surface Soil Moisture Retrieval from L-Band Radiometry: A Global Regression Study. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing.* 40(9):2037-2051.
- Pérez, C. and A. Muñoz. 2006. *Teledetección Nociones y Aplicaciones*. Universidad de Salamanca. España. 356 pp.
- Piles, M. 2010. Multiscale soil moisture retrievals from microwave remote sensing observations. Ph. D. Tesis en Sensores Remotos, Universidad Politécnica de Catalunya, Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones. Barcelona, España. 159 p.
- Robinson, D.A., C.S. Campbell; J.W. Hopmans; B.K. Hornbuckle; S.B. Jones; R. Knight; F. Ogden; J. Selker and O. Wendroth. 2008. Soil moisture measurements for ecological and hydrological watershed scale observatories: a review. *Vadose Zone J.* 7: 358–389.
- Rötzer, K.; C. Montzka; H. Bogen; W. Wagner; Y. Kerr; R. Kidd and H. Vereecken. 2014. Catchment scale validation of SMOS and ASCAT soil moisture products using hydrological modeling and temporal stability analysis. *Remote Sensing of Environment.* 519: 934-946.

- Saleh, K.; J.P. Wigneron; P. de Rosnay; J.C. Calvet; M.J. Escorihuela; Y. Kerr and P. Waldteufel. 2006. Impact of rain interception by vegetation and mulch on the L-band emission of natural grass. *Remote Sensing of Environment* 101:127-139
- Sanhueza, C.; J. Palma; P. Valenzuela; O. Araneda y K. Calderón. 2011. Evaluación del comportamiento geotécnico de suelos volcánicos chilenos para su uso como material de filtro en la depuración de aguas residuales domésticas. *Revista de la construcción* 10(2):66-81.
- Santamaría-Artigas, A.; C. Mattar and J.P. Wigneron. 2016. Application of a combined optical-passive microwave method to retrieve soil moisture at regional scale over Chile: Sensitivity to land cover types. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 9(4):1939-1504.
- Solano, R., K. Didan, A. Jacobson and A. Huete. 2010. MODIS Vegetation Indices (MOD13) C5 User's Guide. Terrestrial Biophysics and Remote Sensing Lab. 38p.
- Sobrino, J. A., B. Franch; C. Mattar and J.C. Jiménez-Muñoz. 2012. A method to estimate soil moisture from Airborne Hyperspectral Scanner (AHS) and aster data: application to sen2flex and sen3exp campaigns. *Remote Sensing of Environment*, 17: 415 – 428.
- Srivastava, P.; D. Han; M.A. Rico Ramirez and T. Islam. 2013. Appraisal of SMOS soil moisture at a catchment scale in a temperate maritime climate. *Journal of Hydrology* 498:292-304
- Ulaby, F. T.; R.K. Moore and A.K. Fung. 1986. Microwave remote sensing: Active, passive Vol III: From theory to applications. Dedham, MA: Artech House.
- Wang, Q.; S. Adiku; J. Tenhunen and A. Granier. 2005. On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site. *Remote Sensing of Environment* 94:244-255
- Wang, Z.; C. Liu and A. Huete. 2003. From AVHRR-NDVI to MODIS-EVI: Advances in vegetation index research. *Acta Ecológica Sinica* 23(5):979-987
- Wang, L. and J. J. Qu. 2009. Satellite remote sensing applications for surface soil moisture monitoring: A review. *Earth Sci.* 3(2): 237-247
- Wang, Y.; C. Woodcock; W. Buernmann; P. Stenberg; P. Voipio; H. Smolander *et al.* 2004. Evaluation of the MODIS LAI algorithm at a coniferous forest site in Finland. *Remote Sensing of Environment* 91(1):114-127
- Wigneron, J-P., P. Waldteufel; A. Chanzy; J. Calvet and Y. Kerr. 2000. Two-dimensional microwave interferometer retrieval capabilities over land surfaces SMOS mission. *Remote Sensing of Environment* 73:270–282

Wigneron, J.P.; J.C. Calvet; T. Pellarin; A.A. Van de Griend; M. Beger and P. Ferrazzoli. 2003. Retrieving near-surface soil moisture from microwave radiometric observations: Current status and future plans. *Remote Sensing of Environment*. 85:489-506

Wigneron, J.P.; J.C. Calvet; P. de Rosnay; Y. Kerr; P. Waldteufel; K. Saleh; M. Escorihuela and A. Kruszewski. 2004. Soil Moisture Retrievals from Biangular L-Band Passive Microwave Observations. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 1(4): 277-281

Wigneron, J.P.; Kerr, Y.; Waldteufel, Saleh, K.; Escorihuela, M. and Richaume, P. 2007. L-Band Microwave Emission of the Biosphere Model (L-MEB) model: Description and calibration against experimental data sets over crop fields. *Remote Sensing of Environment*. 107:63

Zhao, T.; Shi, J.; Bindlish, R.; Jackson, T.; Cosh, M.; Jiang, L. *et al.* 2015. Parametric exponentially correlated surface emission model for L-band passive microwave soil moisture retrieval. *Physics and Chemistry of the Earth*.

9. ANEXOS

Anexo 1. Descripción de áreas de muestreo en zona Chimbarongo

Cultivo	Latitud	Longitud	Descripción
Frambuesa	-34.727469	-70.979794	Cultivo compuesto casi en su totalidad por frambuesas, a excepción de un parche compuesto por cultivos rotativos de avena sp y vicia sp
Tabaco	-34.722998	-70.976812	Cultivo de tabaco con un parche en medio compuesto por plantaciones de papas
Pimentón	-34.718188	-70.974273	Corresponde a un cultivo rotativo entre pimentones y trigo, este último sembrado en el mes de septiembre
Trigo	-34.734456	-71.016291	Se sembró maíz el mes de septiembre del 2015, anteriormente correspondía a un cultivo de porotos verdes
Tabaco	-34.733567	-71.016096	El segundo cultivo de tabaco se encuentra al lado de la rotación trigo-poroto verde. A diferencia del primer cultivo de tabaco, presenta un suelo más pedregoso
Trigo	-34.713184	-71.025257	Corresponde a un cultivo de trigo sin rotación durante el año 2015

Anexo 2. Descripción de áreas de muestreo en zona Región de Los Lagos

Propietario	Latitud	Longitud	Descripción
Gebauer	-34.719095	-70.977462	Corresponde a una pradera con manejo rotativo de bovinos. En general presenta un suelo compacto

Continúa

Teuber	-40.993604	-72.953575	Pradera en buen estado. Suelos estables
Vesperinas	-41.464453	-73.547466	Pradera con gran manejo y en buen estado. Suelos estables
Amthauer	-40.996417	-73.592334	Pradera con suelo anegado e inestable
F. Alba	-40.478337	-73.057885	Esta pradera presenta una gran superficie en pendiente, con suelos anegados y en relieve
Hinojosa	-40.764659	-72.738557	Corresponde a un cultivo de trigo sin rotación durante el año 2015
Los Hualles	-41.117355	-73.097453	Pradera con gran superficie en pendiente
Keim	-40.857009	-73.071563	Pradera estable
Lácteos			Pradera con un considerable
Tronador	-40.890717	-73.012222	manejo, y en pendiente
Frolich	-40.61402	-73.091425	Pradera